

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CEPILLOS DE LIMPIEZA PARA PANELES SOLARES



Andres Camilo Delvasto Gutiérrez

CÓDIGO: 2020069

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.006.769.610

Hernan Dario Fonseca Forero

CÓDIGO: 2010539

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.192.910.424

Javier Sebastián Pardo López

CÓDIGO: 2010379

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.003.475.755

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C.

2024

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CEPILLOS DE LIMPIEZA PARA PANELES SOLARES

Andres Camilo Delvasto Gutiérrez

CÓDIGO: 2020069

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.006.769.610

Hernan Dario Fonseca Forero

CÓDIGO: 2010539

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.192.910.424

Javier Sebastián Pardo López

CÓDIGO: 2010379

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.003.475.755

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO DE LA
UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

DIRECTOR:

M.SC. MARCO ANTONIO JINETE GOMEZ

Ing. Electrónico, Magíster Automatización industrial

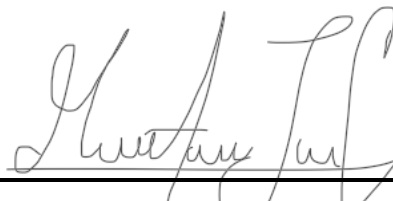
**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

BOGOTÁ, D.C.

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que el documento de los estudiantes Andrés Camilo Delvasto Gutiérrez, Javier Sebastián Pardo López y Hernán Darío Fonseca Forero han cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentran preparados para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia



MARCO ANTONIO JINETE GOMEZ

Director del Proyecto

DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi refugio y mi impulso. Su amor incondicional, paciencia y apoyo constante han sido fundamentales para que este sueño se convierta en realidad. Gracias por cada sacrificio, por creer en mí y por darme la fortaleza para superar cada desafío. Este logro es tanto de ustedes como mío.

A mis amigos, por acompañarme en cada paso de este camino, por sus palabras de aliento y por las risas que han aligerado los momentos más difíciles. Gracias por su amistad sincera y por hacer de esta experiencia algo inolvidable.

Javier Sebastián Pardo López

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso, fuente de esperanza y fe en los momentos de mayor desafío. A mis padres, por su amor, sacrificio y ejemplo, y a mi hermano, por su apoyo constante; ustedes son mi inspiración y motivo para seguir adelante. A mis familiares, por su cariño y ánimo, y a mis amigos, quienes han sido un pilar en este camino; con ellos he compartido sueños y retos que nos exigieron sacrificio y perseverancia. Hoy estamos a puertas de cumplir nuestra meta como ingenieros.

A mí mismo, por la dedicación, el esfuerzo y la resiliencia para superar cada desafío, recordándome siempre que los sueños se construyen con constancia. A quienes, de alguna manera, aportaron a mi formación, brindándome su conocimiento y guía, les dedico este logro con gratitud y aprecio.

Andres Camilo Delvasto Gutiérrez

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios, quien me ha dado la fortaleza y las oportunidades para alcanzar este logro tan importante. A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional, su amor, sus sacrificios, por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia, por estar siempre a mi lado brindándome confianza y ánimo por ser mi inspiración y mi fuerza en los momentos difíciles.

A mis amigos, quienes con su increíble apoyo, paciencia y talento hicieron posible este trabajo. Muchas gracias por su ayuda incondicional, por cada idea, cada corrección, y cada minuto dedicado, no hubiera sido posible sin ustedes.

A mis familiares, quienes me acompañaron y me brindaron su respaldo a lo largo de todo este proceso.

Hernan Dario Fonseca Forero

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la elaboración de esta tesis a aquellas personas que fueron partícipes en nuestro proceso formativo, ya que su apoyo, orientación y dedicación fueron fundamentales para alcanzar este logro. En primer lugar, queremos expresar un profundo agradecimiento a los Ingenieros Marco Antonio Jinete Gómez, Néstor Fernando Penagos Quintero, Baldomero Méndez Pallares, Luis Carlos Meneses Silva y Rubén Darío Hernández Beleño quienes, con su vasta experiencia y conocimiento, nos brindaron no solo una enseñanza técnica, sino también valiosas lecciones de vida. Gracias a sus consejos y orientaciones, no solo crecimos como estudiantes, sino también como personas, aprendiendo la importancia de la ética profesional, la perseverancia y el compromiso con la excelencia en todo lo que hacemos.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la empresa Ideagro, que confió en nosotros y nos brindó las herramientas necesarias para llevar a cabo este proyecto. Su generosidad al proporcionarnos el robot de limpieza de paneles solares, con el cual pudimos experimentar y desarrollar este trabajo, fue fundamental para la realización de esta tesis. Su apoyo y confianza fueron decisivos para materializar nuestras ideas y alcanzar los objetivos planteados.

Deseamos también reconocer a los laboratoristas Kalix Jahier Osorio Linares y Julio Hernando Ruiz Ortega, quienes nos apoyaron durante muchas horas en el laboratorio. Su paciencia y disposición para ayudarnos durante las largas noches de trabajo fueron clave para poder cumplir con las exigencias de los proyectos. Siempre estuvieron allí para resolver nuestras dudas, guiarnos en el manejo de los equipos y ofrecernos su experiencia en cada momento. Gracias a su apoyo, pudimos superar los obstáculos que se presentaron a lo largo de nuestra formación.

A todos ellos les debemos no solo el conocimiento adquirido, sino también las herramientas personales que nos permitirán enfrentar los retos que nos esperan en nuestra vida profesional. Su contribución a nuestro proceso formativo ha sido invaluable, y por ello les estaremos muy agradecidos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
NOTA DE ACEPTACIÓN.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS	5
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE ANEXOS.....	12
INTRODUCCIÓN	13
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
1. GENERALIDADES	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1.1. Antecedentes del Problema	18
1.1.2. Descripción del Problema	19
1.1.3. Formulación del Problema.....	19
1.1.4. Línea de Investigación del Programa.....	19
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.3. OBJETIVOS	20
1.3.1. Objetivo General.....	20
1.3.2. Objetivos Específicos.....	21
1.4. DELIMITACIONES DEL PROBLEMA	21
1.4.1. Alcances y Limitaciones	21
1.5. MARDO DE REFERENCIA	22
1.5.1. Marco Teórico	22
1.5.1.1. Energía Solar en Colombia y su Impacto en la Transición Energética	22
1.5.1.2. La Importancia del Mantenimiento y la Limpieza en Paneles Solares	23

1.5.1.3.	Principios de Diseño en Cepillos de Limpieza para Superficies Delicadas	23
1.5.1.4.	Selección de Materiales para Cepillos y Aplicaciones de Limpieza	24
1.5.1.5.	Principios de Optimización en el Diseño de Componentes Robóticos	24
1.5.1.6.	Desafíos en la Implementación de Tecnología de Limpieza para Energías Renovables	25
1.5.2.	Estado del Arte.....	25
1.5.2.1.	Soluciones Actuales para la Limpieza de Paneles Solares.....	26
1.5.2.2.	Desafíos en el Diseño de Cepillos para Limpieza Robótica de Paneles Solares	27
1.5.2.3.	Selección de Materiales para Cepillos en Aplicaciones de Energía Solar	27
1.5.2.4.	Avances Tecnológicos en el Diseño de Cepillos para Robótica de Limpieza de Paneles	28
1.5.2.5.	Oportunidades de Mejora en el Diseño de Cepillos para Paneles Solares	29
2.	METODOLOGÍA.....	30
2.1.	INTODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	30
3.	CÁLCULO Y ANÁLISIS DE PROTOTIPOS	34
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS CEPILLOS DE KWUNPHI	34
3.2.	ANÁLISIS DE PATRONES	37
3.3.	ANÁLISIS DE FIBRAS DE MATERIALES	44
3.4.	CÁLCULOS DE CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS.....	47
3.5.	Construcción de los prototipos	64
3.6.	DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS DE CEPILLOS.....	66
3.6.1.	Características de los Prototipos	66
3.6.1.1.	Patrón Recto.....	67
3.6.1.2.	Patrón Helicoidal.....	68
3.6.1.3.	Patrón Espiral.....	69
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS DE PROTOTIPOS	71
4.1.	PRUEBAS DE PROTOTIPOS PATRONES	71
4.2.	ANÁLISIS DE PRUEBAS	75

4.3.	EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA.....	76
4.4.	COMPARACIÓN DE PATRONES EN LIMPIEZA	78
4.5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	82
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS DE CERDAS	84
5.1.	CÁLCULOS Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO	84
5.2.	PRUEBAS PROTOTIPO CERDAS.....	98
5.3.	ANÁLISIS DE PRUEBAS	100
5.4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	101
6.	DISEÑO FINAL.....	103
6.1.	CÁLCULOS Y CARACTERÍSTICAS.....	103
6.1.1.	Materiales del Eje.....	104
6.1.2.	Materiales de la Base	105
6.1.3.	Cálculos	106
6.1.4.	Características del Cepillo.....	122
6.2.	MODELADO.....	122
6.2.1.	Núcleo de Eje.....	122
6.2.1.1.	Plano	123
6.2.2.	Base del Eje	124
6.2.3.	Cepillo.....	126
6.3.	SIMULACIÓN	126
6.4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	131
6.4.5.	Tensión Axial y Tensión de Flexión	132
7.	CONCLUSIONES	134
8.	RECOMENDACIONES.....	136
9.	Bibliografía.....	139
	ANEXO A. PANELES ANTES Y DESPUES	143
	ANEXO B. PROCESAMIENTO DE IMAGEN.....	159

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.....	35
Tabla 2.....	36
Tabla 3.....	44
Tabla 4.....	46
Tabla 7.....	76
Tabla 5.....	78
Tabla 6.....	79
Tabla 7.....	79
Tabla 8.....	80
Tabla 9.....	80
Tabla 10.....	81
Tabla 11.....	82
Tabla 12.....	101
Tabla 13.....	101
Tabla 14.....	104
Tabla 15.....	105
Tabla 16.....	122
Tabla 17.....	127
Tabla 18.....	127
Tabla 19.....	129
Tabla 20.....	128
Tabla 21.....	130

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Ilustración 1	35
Ilustración 2	36
Ilustración 3	38
Ilustración 4	39
Ilustración 5	39
Ilustración 6	40
Ilustración 7	41
Ilustración 8	42
Ilustración 9	43
Ilustración 10	64
Ilustración 11	65
Ilustración 12	65
Ilustración 13	66
Ilustración 14	67
Ilustración 15	68
Ilustración 16	69
Ilustración 17	72
Ilustración 18	73
Ilustración 19	74
Ilustración 20	76
Ilustración 21	77
Ilustración 22	99
Ilustración 23	99
Ilustración 24	100
Ilustración 25	101
Ilustración 26	123
Ilustración 27	123

Ilustración 28	124
Ilustración 29	125
Ilustración 30	125
Ilustración 31	126
Ilustración 32	129
Ilustración 33	128
Ilustración 34	130

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Paneles antes y después.

ANEXO B. Procesamiento de imagen.

INTRODUCCIÓN

Colombia, un país bendecido con una abundancia de recursos naturales, se encuentra en un punto de inflexión energética y está tratando de equilibrar su desarrollo económico con la protección del medio ambiente. En este contexto, la energía solar resulta ser una solución prometedora.

La transición energética de Colombia está marcada por un creciente interés en las fuentes de energía renovables, con los paneles solares liderando el camino hacia un futuro más sostenible. La energía solar, que aprovecha la radiación solar a través de paneles fotovoltaicos, se ha convertido en una alternativa importante para diversificar la matriz energética de Colombia, reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el cambio climático.

Aunque Colombia es tradicionalmente un país centrado en la producción de energía hidroeléctrica, no se puede subestimar el potencial solar del país. Con abundantes horas de sol durante todo el año y una ubicación privilegiada cerca del ecuador, Colombia presenta condiciones ideales para la producción de energía solar.

Solmic (2023) afirma que actualmente, el país cuenta con 17 parques fotovoltaicos, 9 proyectos de autogeneración a gran escala y más de 1.500 proyectos solares de autogeneración a pequeña escala que generan una capacidad neta de 388MW.

El uso de paneles solares en Colombia ha aumentado, impulsado por políticas gubernamentales favorables, incentivos fiscales y una creciente conciencia de la importancia de la sostenibilidad ambiental. Grandes proyectos solares se están desarrollando en varias regiones del país, desde el Caribe hasta los Andes, con el objetivo de diversificar el suministro energético y garantizar un suministro confiable y limpio.

Sin embargo, existen desafíos que superar en el camino hacia una transición energética exitosa. Estos incluyen la necesidad de mejorar la infraestructura eléctrica, resolver problemas de generación intermitente de energía solar y abordar las preocupaciones socioeconómicas relacionadas con la transición de las industrias tradicionales. A pesar de estos obstáculos, el impulso hacia la energía solar en Colombia es innegable y representa una oportunidad apasionante para transformar el sector energético y avanzar hacia un futuro más sostenible y resiliente.

La empresa Ideagro, al ver el potencial de avance de la transición energética, más específico en los paneles solares, vieron una oportunidad de negocio, para prestar el servicio de limpieza de los mismos, mediante el uso de un Robot diseñado para la limpieza de los paneles. Ideagro es una de las empresas pioneras en prestar este servicio en Colombia.

La empresa Ideagro adquirió un robot de limpieza de paneles solares de la marca china Kwunphi, pero descubrió que no cumplía con sus expectativas en términos de eficacia de limpieza. Ante esta situación, decidieron diseñar un nuevo cepillo para mejorar su rendimiento. Sin embargo, el nuevo diseño tampoco cumplió con las expectativas, ya que resultó ser demasiado rígido y pesado. Esta rigidez y peso adicionales del cepillo contribuyeron a una limpieza ineficaz de los paneles solares, lo que generó preocupaciones adicionales sobre la efectividad del robot en su conjunto.

Para abordar estos desafíos, el proyecto se centrará en realizar un exhaustivo análisis de los materiales y el diseño del cepillo. Se buscarán materiales más ligeros y flexibles que permitan una limpieza efectiva sin ejercer demasiada presión sobre los paneles solares. Además, se explorarán opciones de distribución de las cerdas que optimicen la limpieza sin comprometer la estabilidad del cepillo. La colaboración con expertos en ingeniería de materiales y diseño mecánico será fundamental para garantizar que el nuevo cepillo sea más eficiente y adecuado para el funcionamiento del robot en diversas

condiciones. Mediante pruebas rigurosas y ajustes iterativos, se espera desarrollar un cepillo que mejore significativamente la eficacia de limpieza del robot y satisfaga las necesidades específicas de Ideagro.

RESUMEN

Esta tesis se enfoca en el rediseño de un cepillo para el robot Kwunphi utilizado por la empresa Ideagro en la limpieza de paneles solares, con el objetivo de superar las limitaciones de los dos cepillos actuales. El cepillo original del robot, con cerdas extra suaves, es efectivo para remover polvo superficial, pero resulta ineficaz frente a suciedades más adheridas debido a la suavidad de sus filamentos. Por otro lado, el segundo cepillo, que la empresa construyó, presenta un peso excesivo y una rigidez en las cerdas que afecta su funcionamiento: el cepillo tiende a saltar sobre la superficie sin lograr una limpieza continua y, además, puede rayar los paneles debido a la fricción generada por la dureza de las fibras.

Para resolver estos problemas, se propone el diseño de un cepillo completamente nuevo, que supere las deficiencias de ambos modelos existentes y ofrezca un rendimiento optimizado. Este nuevo cepillo será más ligero y flexible, con una distribución de cerdas que asegura una limpieza eficaz sin dañar la superficie de los paneles solares. La propuesta de diseño incluye un análisis detallado de materiales y simulaciones de funcionamiento, así como pruebas prácticas y la colaboración de expertos en ingeniería de materiales y diseño mecánico. Con esta mejora, el nuevo cepillo busca cumplir con los estándares de eficiencia y durabilidad que Ideagro necesita para diversas condiciones operativas, proporcionando un desempeño superior a los cepillos actuales.

Palabras Clave: Rediseño, Optimización, Eficiencia, Materiales

ABSTRACT

This thesis focuses on the redesign of a brush for the Kwunphi robot used by Ideagro to clean solar panels, with the objective of overcoming the limitations of the two current brushes. The robot's original brush, with extra soft bristles, is effective for removing surface dust, but is ineffective against more adherent dirt due to the softness of its filaments. On the other hand, the second brush, which the company built, has an excessive weight and stiffness in the bristles that affects its operation: the brush tends to jump on the surface without achieving a continuous cleaning and, in addition, it can scratch the panels due to the friction generated by the hardness of the fibers.

To solve these problems, it is proposed to design a completely new brush that overcomes the shortcomings of both existing models and offers optimized performance. This new brush will be lighter and more flexible, with a bristle distribution that ensures effective cleaning without damaging the surface of the solar panels. The design proposal includes detailed material analysis and performance simulations, as well as hands-on testing and collaboration with experts in materials engineering and mechanical design. With this improvement, the new brush seeks to meet the efficiency and durability standards Ideagro needs for various operating conditions, providing superior performance to current brushes.

Keywords: *Redesign, Optimization, Efficiency, Materials*

1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mantenimiento adecuado de los paneles solares es esencial para maximizar su eficiencia en la generación de energía. En la empresa Ideagro, se ha implementado el uso del robot Kwunphi para la limpieza de paneles solares, sin embargo, los resultados no han sido los esperados debido a deficiencias en el diseño del cepillo de limpieza. El cepillo original del robot presenta cerdas demasiado suaves, que son insuficientes para eliminar la suciedad adherida, mientras que el segundo cepillo, diseñado por la empresa, es excesivamente rígido y pesado. Esta combinación de rigidez y peso provoca saltos en el cepillo, reduce la eficacia de la limpieza y puede causar daños en la superficie de los paneles solares. Esta situación plantea la necesidad de un rediseño del cepillo que optimice la limpieza sin comprometer la integridad de los paneles.

1.1.1. Antecedentes del Problema

La limpieza de paneles solares ha cobrado relevancia en el sector de las energías renovables, ya que la acumulación de polvo y residuos en su superficie disminuye la capacidad de absorción de luz solar, afectando su eficiencia. Ideagro, una empresa colombiana que presta servicios de mantenimiento para sistemas fotovoltaicos ha adoptado la tecnología de limpieza robótica como el robot Kwunphi para optimizar sus procesos. Sin embargo, los cepillos disponibles hasta ahora no cumplen con los estándares de limpieza requeridos. Esta problemática es común en el sector, y la falta de cepillos adecuados que combinen suavidad y eficacia plantea un reto importante en la industria, ya que los paneles solares requieren un mantenimiento que no compromete su durabilidad ni su rendimiento energético.

1.1.2. Descripción del Problema

El robot de limpieza Kwunphi de Ideagro actualmente utiliza un cepillo con cerdas demasiado suaves en su versión original, que es incapaz de eliminar la suciedad adherida. Por otro lado, el cepillo alternativo construido por la empresa es rígido y pesado, lo que provoca saltos durante la limpieza y aumenta el riesgo de rayaduras en la superficie de los paneles solares. Estas deficiencias resultan en una limpieza ineficaz y potencialmente dañina, lo que afecta la calidad del servicio y reduce el tiempo de vida útil de los paneles. Esta situación exige un rediseño que permita combinar la flexibilidad necesaria para una limpieza efectiva con un material que sea lo suficientemente suave para evitar daños, pero lo suficientemente rígido para eliminar la suciedad incrustada.

1.1.3. Formulación del Problema

¿Cómo se puede rediseñar el cepillo de limpieza del robot Kwunphi para mejorar su eficacia en la remoción de suciedad en paneles solares, optimizando su peso y aumentando la flexibilidad de las fibras, de manera que se garantice una limpieza efectiva y segura sin comprometer la integridad de la superficie?

1.1.4. Línea de Investigación del Programa

Este proyecto se enmarca en la línea de investigación de Diseño y Optimización de Componentes para Robótica en Energías Renovables. Se centra en el desarrollo de soluciones técnicas que mejoren la interacción de dispositivos robóticos con superficies sensibles, aplicando principios de selección de materiales, selección de cerdas y simulaciones mecánicas para alcanzar una limpieza efectiva y segura.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El diseño de un cepillo adecuado para el robot Kwunphi es fundamental para asegurar la eficiencia en la limpieza de paneles solares, aspecto crucial para mantener su rendimiento óptimo. Los problemas observados en los cepillos actuales, como la suavidad excesiva en el modelo original y el peso y rigidez del cepillo construido por la empresa, limitan la capacidad del robot para limpiar adecuadamente las superficies de los paneles. La rigidez excesiva en particular provoca saltos durante la operación, comprometiendo la uniformidad de la limpieza y, además, representa un riesgo para la integridad de los paneles, al aumentar la probabilidad de rayaduras y desgaste de la superficie.

Este proyecto se justifica en la necesidad de desarrollar un cepillo técnicamente optimizado, que supere las limitaciones de los modelos actuales. La propuesta implica una selección cuidadosa de materiales ligeros y flexibles, junto con una configuración de cerdas que permita adaptarse mejor a las superficies y remover eficientemente la suciedad adherida. Este rediseño permitirá a Ideagro mejorar la efectividad y seguridad de sus operaciones de limpieza, aportando una solución que esté alineada con los requisitos de rendimiento y cuidado en el sector de la energía solar en Colombia.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Diseñar e Implementar un cepillo que mejore el rendimiento del cepillo original del robot Kwunphi.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los cepillos originales del robot Kwunphi, evaluando sus materiales, diseño y rendimiento para identificar áreas de mejora y establecer una base comparativa para el desarrollo de un nuevo cepillo más eficiente.
- Evaluar los tipos de cepillos disponibles en el mercado para obtener nuevas ideas y mejorar el diseño del cepillo del robot Kwunphi.
- Diseñar un cepillo para el robot Kwunphi, optimizando su estructura y materiales para mejorar la eficacia y eficiencia en la limpieza de paneles solares, basándose en los datos obtenidos de la caracterización y la evaluación realizada.
- Realizar pruebas prácticas para comparar las ventajas del cepillo estándar incluido con el robot Kwunphi y el nuevo cepillo diseñado, evaluando su rendimiento, eficacia en la limpieza y durabilidad bajo diversas condiciones operativas reales

1.4. DELIMITACIONES DEL PROBLEMA

1.4.1. Alcances y Limitaciones

El proyecto se centrará exclusivamente en el diseño y prueba práctica de un cepillo para el robot Kwunphi, asegurando su compatibilidad con el sistema de control existente y sin alterar otros componentes del robot. Todas las evaluaciones se realizan mediante pruebas físicas en condiciones operativas reales. Las modificaciones propuestas no deberán afectar el funcionamiento del equipo original ni requerir ajustes en el software o hardware de control. El objetivo es mejorar la eficiencia y efectividad de la limpieza de los paneles solares, manteniendo la integridad operativa del robot.

1.5. MANDO DE REFERENCIA

Esta sección establece el contexto general en el cual se desarrolla el proyecto, destacando la relevancia de la limpieza de paneles solares en el marco de la transición energética en Colombia y el mundo. Se examinan los antecedentes relacionados con los métodos actuales de limpieza, los retos tecnológicos que enfrentan las empresas del sector y las iniciativas existentes en el diseño de soluciones robóticas. Este análisis situará el proyecto en un panorama más amplio, permitiendo comprender su importancia dentro de las tendencias y necesidades de la industria de energías renovables.

1.5.1. Marco Teórico

En esta sección se presentan los conceptos fundamentales que sustentan el diseño de cepillos de limpieza para paneles solares. Se abordarán temas como la importancia del mantenimiento adecuado de los paneles, los principios de selección de materiales para aplicaciones específicas, y los patrones de cerdas más utilizados en la industria. También se explorará el impacto de la flexibilidad, la rigidez y la distribución de las cerdas en la eficacia del cepillo, así como las herramientas computacionales empleadas para optimizar su diseño. Estos fundamentos servirán como base para guiar el desarrollo del nuevo cepillo propuesto en el proyecto.

1.5.1.1. Energía Solar en Colombia y su Impacto en la Transición Energética

La energía solar se ha convertido en un componente clave para la transición energética de Colombia, debido a sus condiciones geográficas que ofrecen alta radiación solar durante todo el año. Colombia cuenta con una capacidad instalada de 388 MW de energía solar, proveniente de 17 parques fotovoltaicos, 9 proyectos de autogeneración a gran escala y más de 1.500 proyectos de autogeneración a pequeña escala (Solmic, 2023). Esta creciente adopción de tecnología solar no solo diversifica la matriz

energética nacional, sino que también contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental del sector energético. En este contexto, el mantenimiento efectivo de los paneles solares es fundamental para asegurar su rendimiento y garantizar la rentabilidad de estas inversiones en energías renovables.

1.5.1.2. La Importancia del Mantenimiento y la Limpieza en Paneles Solares

La eficiencia de los paneles solares puede verse afectada en hasta un 20% o más debido a la acumulación de polvo, suciedad y partículas en su superficie (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2020). Esta disminución en la eficiencia ocurre porque las partículas depositadas impiden la absorción óptima de la radiación solar, lo cual reduce la generación de energía. La limpieza regular y efectiva de los paneles solares es, por lo tanto, crucial para mantener su rendimiento, especialmente en regiones con altos niveles de radiación solar, como es el caso de Colombia. La falta de un mantenimiento adecuado puede acortar la vida útil de los paneles, generando costos adicionales y afectando la viabilidad económica de proyectos solares a largo plazo (Jones et al., 2021).

1.5.1.3. Principios de Diseño en Cepillos de Limpieza para Superficies Delicadas

El diseño de cepillos para la limpieza de superficies delicadas, como los paneles solares, requiere un equilibrio entre la rigidez y flexibilidad de las cerdas para garantizar una limpieza eficaz sin dañar la superficie. Estudios en la industria de limpieza de paneles solares han indicado que un cepillo con cerdas demasiado rígidas puede causar rayaduras en la capa protectora del panel, mientras que un cepillo con cerdas excesivamente suaves es ineficaz para remover partículas adheridas (Smith & Chen, 2019). La disposición de las cerdas en patrones como el helicoidal, espiral o lineal, junto con la densidad y ángulo

de inclinación de las cerdas, afecta significativamente el rendimiento de limpieza y la durabilidad de los cepillos, según estudios de la Society for Surface Science.

1.5.1.4. Selección de Materiales para Cepillos y Aplicaciones de Limpieza

La selección de materiales para cepillos de limpieza robótica se basa en criterios de durabilidad, resistencia y flexibilidad. Polímeros como el polipropileno y el nylon son utilizados para las cerdas debido a su resistencia al desgaste y su capacidad de mantener la forma, incluso después de usos prolongados (Society of Plastics Engineers, 2018). Estos materiales son especialmente recomendados para aplicaciones en las que las cerdas estarán en contacto constante con partículas abrasivas y con humedad ocasional, como en el caso de la limpieza de paneles solares expuestos al ambiente. Para el eje del cepillo, materiales como el acero inoxidable y el teflón se destacan por su resistencia a la corrosión y su capacidad de soportar las tensiones de rotación, asegurando la durabilidad y el bajo mantenimiento del sistema de limpieza (Brown & Lewis, 2020).

1.5.1.5. Principios de Optimización en el Diseño de Componentes Robóticos

En robótica aplicada a la limpieza de superficies, el diseño de un cepillo optimizado requiere reducir el peso del sistema, mejorar la flexibilidad de las cerdas y maximizar el área de contacto de manera que se garantice una limpieza uniforme sin comprometer la movilidad del robot. Estudios previos han demostrado que un diseño ligero permite al sistema robótico realizar sus operaciones con mayor eficiencia, minimizando el desgaste del motor y facilitando el control del movimiento del cepillo (García et al., 2021). La optimización de la flexibilidad y distribución de las cerdas también asegura una adaptación adecuada a la superficie del panel, mejorando la eficacia de la limpieza y reduciendo el riesgo de daño.

El uso de simulaciones de dinámica de fluidos y modelos de contacto permite evaluar el comportamiento de los materiales seleccionados bajo condiciones de trabajo, reduciendo así la necesidad de pruebas iterativas y prototipos físicos. Estas herramientas permiten realizar análisis predictivos sobre el desempeño de los cepillos, maximizando la eficiencia del diseño y minimizando el impacto en el sistema robótico en condiciones de uso real (Engineering Simulation Journal, 2019).

1.5.1.6. Desafíos en la Implementación de Tecnología de Limpieza para Energías Renovables

Los sistemas robóticos de limpieza para paneles solares presentan desafíos únicos debido a la necesidad de combinar eficiencia de limpieza y protección de la superficie. En el caso de Ideagro y el robot Kwunphi, la optimización del cepillo representa una oportunidad para resolver problemas operativos asociados con la limpieza de los paneles, asegurando un mantenimiento adecuado sin dañar la superficie ni reducir la vida útil de los paneles. La tecnología de limpieza robótica debe ser capaz de adaptarse a diferentes tipos de suciedad y condiciones ambientales, mientras minimiza la frecuencia de mantenimiento del equipo. Al mejorar el diseño del cepillo, se puede incrementar la eficiencia operativa del robot, ofreciendo una solución alineada con las necesidades de sostenibilidad y rendimiento en el sector de la energía solar en Colombia (Renewable Energy Technologies Journal, 2022).

1.5.2. Estado del Arte

Para comprender cómo otros investigadores y profesionales han abordado los desafíos relacionados con la limpieza de paneles solares, se realizará una revisión exhaustiva de artículos científicos, tesis, reportes técnicos y patentes. Este análisis permitirá identificar las estrategias más relevantes en el diseño de cepillos, los materiales utilizados, las configuraciones de cerdas y las tecnologías aplicadas en robótica de limpieza.

1.5.2.1. Soluciones Actuales para la Limpieza de Paneles Solares

El mantenimiento eficiente de paneles solares es crítico para optimizar la generación de energía, ya que estudios han demostrado que la acumulación de suciedad y polvo puede reducir la eficiencia en hasta un 20-25%, dependiendo de las condiciones ambientales y geográficas (Shobokshy et al., 1985, *Energía solar*). Las tecnologías de limpieza pueden clasificarse en tres enfoques principales: limpieza manual, limpieza automatizada mediante sistemas fijos y limpieza robótica autónoma, cada uno con beneficios y limitaciones específicas.

La limpieza manual, aunque es la técnica más tradicional y económica, presenta limitaciones considerables en instalaciones de gran escala debido al alto consumo de agua ya los riesgos asociados para el personal, especialmente en áreas de difícil acceso (Daher et al., 2016, *Renewable y Reseñas de Energía Sostenible*). Los sistemas de limpieza automatizados fijos, como brazos de rociado y cepillos mecánicos, han evolucionado para ofrecer soluciones eficientes en grandes plantas solares. No obstante, son caros de instalar y mantener, y tienden a ser difíciles de adaptar a distintos ajustes de plantas solares (Ibrahim et al., 2011, *International Journal of Photoenergy*).

La robótica de limpieza se ha convertido en la solución más prometedora, especialmente en instalaciones solares de gran escala en regiones como Oriente Medio, donde la escasez de agua y la acumulación de polvo son problemáticas. Los robots de limpieza autónomos, que pueden operar con poco o nulo consumo de agua, permiten una limpieza constante y eficiente, incrementando así la generación de energía sin interrumpir las operaciones (Díaz et al., 2019, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*). Las investigaciones actuales en el diseño de robots de limpieza están enfocadas en mejorar la movilidad y eficiencia de los cepillos, particularmente para garantizar una limpieza uniforme sin dañar los paneles.

1.5.2.2. Desafíos en el Diseño de Cepillos para Limpieza Robótica de Paneles Solares

El diseño de cepillos para robots de limpieza de paneles solares debe equilibrar la eficacia de remoción de suciedad y la protección de la superficie del panel, la cual es susceptible a rayaduras que disminuyen la eficiencia del sistema. Estudios realizados en la caracterización de cepillos para superficies sensibles muestran que los cepillos con cerdas excesivamente suaves caen en la remoción de partículas adheridas, mientras que los cepillos con cerdas muy rígidas incrementan el riesgo de daños en la superficie de los paneles (Li et al., 2020, *Revista de Producción Más Limpia*).

El patrón de las cerdas ya sea helicoidal, espiral o lineal, juega un papel crítico en la distribución de la presión y en la uniformidad de la limpieza. En un estudio comparativo, García y Molina (2018) analizaron diferentes configuraciones de cepillos y concluyeron que los patrones helicoidales y espirales resultan más efectivos para remover partículas debido a su capacidad para mantener un contacto continuo y adaptarse a irregularidades en la superficie (García & Molina). , 2018, *Informes Energéticos*). Asimismo, el peso del cepillo influye en la eficacia de limpieza; un cepillo excesivamente pesado puede aumentar la carga sobre el sistema robótico y dificultar su movimiento, lo cual es particularmente relevante en instalaciones inclinadas (Rahman & Williams, 2021, *Robotics and Automation Letters*).

1.5.2.3. Selección de Materiales para Cepillos en Aplicaciones de Energía Solar

La selección de materiales en el diseño de cepillos es fundamental para asegurar su durabilidad y efectividad en aplicaciones de limpieza intensiva. En aplicaciones solares, los materiales de las cerdas deben resistir el desgaste y conservar su forma después de un uso prolongado. Los polímeros como el polipropileno y el nylon son opciones populares debido a su resistencia a la abrasión y capacidad de mantener la rigidez en condiciones de limpieza prolongadas (Society of Plastics Engineers, 2018).

Un estudio sobre materiales de cerdas realizado por Smith y Chen (2018) en *Applied Surface Science* demostró que el nylon es particularmente eficaz en la remoción. *Revista de ciencia de materiales*). En cuanto al eje del cepillo, materiales como el acero inoxidable y el teflón son preferidos por su resistencia a la corrosión y su capacidad de soportar tensiones mecánicas prolongadas, asegurando una mayor durabilidad en aplicaciones de limpieza solar (Brown & Lewis, 2019, *Materials Performance*).

1.5.2.4. Avances Tecnológicos en el Diseño de Cepillos para Robótica de Limpieza de Paneles

La investigación y desarrollo en tecnología de limpieza para paneles solares ha abordado desafíos específicos en términos de durabilidad y eficiencia. Un estudio realizado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) evaluó la efectividad de cerdas con diámetros de entre 0,25 mm y 0,8 mm, concluyendo que estas dimensiones ofrecen una combinación óptima de flexibilidad y resistencia al desgaste, lo cual es crucial para prolongar la vida útil del cepillo. Además, el ángulo de inclinación y el patrón de distribución de las cerdas se han identificado como factores clave para optimizar la limpieza, especialmente en términos de minimizar el consumo de agua.

La simulación computacional ha jugado un papel importante en la mejora de los diseños de cepillos. Investigaciones como las de Rahim y González (2019) en *Engineering Simulation Journal* destacan la aplicación de simulaciones de dinámica de fluidos y de contacto para predecir el comportamiento de los cepillos en condiciones reales. Estas simulaciones permiten ajustar y optimizar el diseño sin necesidad de realizar pruebas físicas reiteradas, reduciendo los costos de desarrollo y mejorando la precisión del diseño final. La simulación de contacto mecánico, en particular, permite evaluar la interacción de las cerdas con la superficie del panel, asegurando un diseño efectivo y seguro para los paneles solares.

1.5.2.5. Oportunidades de Mejora en el Diseño de Cepillos para Paneles Solares

A pesar de los avances en el diseño de cepillos de limpieza, existen limitaciones que requieren ser abordadas. Las investigaciones han señalado que el desgaste de las cerdas, especialmente en ambientes de alta suciedad, y el deterioro de materiales debido a la exposición ambiental afecta la durabilidad de los cepillos en aplicaciones solares (Jones, 2022, *IEEE Transactions on Robotics*). Estas limitaciones representan una oportunidad para innovar en el desarrollo de cepillos que emplean materiales más resistentes y configuraciones optimizadas que prolongan su vida útil, asegurando una limpieza efectiva y continua.

2. METODOLOGÍA

2.1. INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para abordar el rediseño del cepillo de limpieza del robot Kwunphi y mejorar su efectividad en la limpieza de paneles solares, se ha estructurado una serie de pruebas y análisis que orientan la selección de materiales, la configuración de las cerdas y la caracterización de patrones óptimos para diseñar un cepillo más eficiente y compatible con el robot. Este enfoque se centra en la experimentación práctica y el análisis comparativo de prototipos, buscando un equilibrio entre peso, flexibilidad y durabilidad para optimizar la limpieza sin comprometer la integridad del robot ni su sistema de control.

La metodología experimental está organizada en etapas clave, iniciando con la definición de las variables de estudio y el diseño experimental, seguido por la selección de materiales y equipos para los prototipos de cepillos. En el proceso, se han identificado las variables independientes y dependientes que afectan el rendimiento del cepillo, permitiendo diseñar pruebas sistemáticas para cada prototipo y obtener datos comparativos sobre su efectividad. Cada componente de esta metodología ha sido elegido con el objetivo de asegurar la compatibilidad del nuevo cepillo con el robot Kwunphi y mejorar su rendimiento en condiciones reales de operación, simuladas a través de superficies y materiales que representan residuos comunes en los paneles solares. Este proceso exhaustivo busca validar el diseño propuesto y sus mejoras mediante resultados objetivos obtenidos en pruebas controladas.

2.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación sigue un enfoque experimental con el objetivo de optimizar el diseño del cepillo de limpieza del robot Kwunphi, utilizado para el mantenimiento de paneles solares. Este enfoque es pertinente debido a la naturaleza técnica y práctica del problema: el diseño actual del cepillo presenta limitaciones en términos de flexibilidad y efectividad, lo cual afecta directamente la eficiencia en la limpieza y, por ende, el rendimiento de los paneles solares. Dado que el éxito de la investigación depende de la comparación de diferentes diseños y configuraciones de cepillos en condiciones controladas y realistas, el enfoque experimental permite manipular variables específicas (como el patrón de cerdas y el material) para evaluar su efecto en la limpieza y estabilidad del cepillo. Así, se obtiene una visión clara de las mejoras posibles.

2.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación está estructurada como un estudio experimental comparativo, diseñado para evaluar la efectividad de distintos prototipos de cepillos bajo condiciones de limpieza simuladas. Se analizarán cinco configuraciones de cepillos: el cepillo original incluido con el robot Kwunphi y cuatro prototipos diseñados con patrones de cerdas alternativos (lineal, helicoidal, espiral y uno fabricado por la empresa IDEAGRO). Este diseño experimental permite comparar el desempeño de cada modelo de cepillo en términos de eficiencia de limpieza, resistencia al desgaste y estabilidad en operación. La elección de un diseño comparativo es crucial, ya que facilita la identificación de los aspectos específicos de cada diseño que contribuyen a una mayor efectividad en la remoción de residuos, además de resaltar los desafíos estructurales que deben ser abordados para un rendimiento óptimo. Al realizar las pruebas en paneles acrílicos, se simulan condiciones que asemejan las de los paneles solares, lo cual asegura que los hallazgos sean relevantes y aplicables al entorno real de operación.

2.4. VARIABLE E HIPÓTESIS

Para estructurar adecuadamente el estudio, se han identificado variables clave que afectan el rendimiento de los distintos diseños de cepillo:

Variables independientes: Estas incluyen el tipo de material de las cerdas (polipropileno en diámetro 0.25mm y poliamida 6 en diámetro de 0.45 mm), el patrón de las cerdas (lineal, helicoidal, espiral), y el peso total del cepillo, cada uno de los cuales se espera que influya de manera significativa en la eficiencia y estabilidad del cepillo.

Variables dependientes: Se evaluará la eficiencia de limpieza (porcentaje de residuos removidos de la superficie de acrílico que simula el panel solar), la durabilidad del cepillo (resistencia de las cerdas y el eje después de varias pruebas), y la estabilidad durante el funcionamiento (presencia o ausencia de saltos y vibraciones).

2.5. MATERIALES Y EQUIPOS

La selección de materiales y equipos en la fase de desarrollo de los prototipos se fundamenta en la necesidad de evaluar distintas configuraciones y materiales de cerdas, buscando optimizar el diseño del cepillo para cumplir con los requisitos de peso, flexibilidad y eficiencia en la limpieza que plantea el entorno de operación de los paneles solares. A continuación, se detallan los materiales seleccionados para los prototipos, junto con el equipo básico empleado en su construcción y pruebas.

- **Materiales:**

Eje de madera (palo de escoba): Se utiliza un eje de madera de un palo de escoba con un diámetro de 24 mm y una longitud de 800 mm. Este material permite construir prototipos de manera rápida y económica, proporcionando una estructura adecuada para pruebas iniciales de rendimiento.

Cerdas de polipropileno en diámetros de 0.25 mm, 0.35 mm y 0.45 mm: Se emplean cerdas de polipropileno en tres diámetros diferentes para evaluar la influencia del grosor en la efectividad de limpieza y en la flexibilidad del cepillo. Este material es adecuado por su resistencia y flexibilidad, lo cual permite analizar cuál diámetro ofrece mejores resultados para el diseño final.

Fijación de cerdas: Las fibras de polipropileno fueron fijadas al eje mediante silicona aplicada con pistola, logrando un ajuste reforzado. Este método de fijación garantiza la estabilidad de las cerdas durante las pruebas, proporcionando una base firme para evaluar la efectividad del cepillo.

Panel de acrílico: Se utiliza un panel de acrílico para simular la superficie de un panel solar, permitiendo la estandarización en las pruebas de limpieza y asegurando que los resultados reflejen condiciones de operación reales.

Materiales de prueba: Para simular los residuos comunes en los paneles solares, se emplean harina (0.57 g/cm^3), arena de río (1.52 g/cm^3) y gravilla fina (1.80 g/cm^3), tanto en condiciones de limpieza en seco como con agua. Estos materiales permiten una evaluación completa de la efectividad de cada diseño de cepillo en situaciones que representan diferentes niveles de suciedad.

- **Equipos:**

Taladro con broca de 3/16: Un taladro con una broca de 3/16 fue utilizado para perforar los agujeros en el eje, facilitando la inserción de las cerdas de polipropileno en el prototipo. Este equipo es esencial para garantizar precisión en el montaje de las cerdas y consistencia en la distribución del cepillo.

Robot de limpieza Kwunphi: Este equipo permite la evaluación de los cepillos en condiciones operativas reales, asegurando que los prototipos sean compatibles con el sistema de control del robot y cumplan con los requisitos funcionales de la empresa Ideagro.

3. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE PROTOTIPOS

El presente capítulo aborda el proceso de diseño, caracterización y construcción de prototipos de cepillos para el robot Kwunphi, orientado a mejorar su desempeño en la limpieza de paneles solares. Se realiza un análisis de distintos patrones de cepillos y de los materiales de las fibras, así como una evaluación de las características de cada prototipo desarrollado. Mediante cálculos y pruebas, se identifican los parámetros que influyen en la eficiencia del cepillo, estableciendo una base comparativa para seleccionar el diseño más óptimo.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEPILLOS DE KWUNPHI

Se llevará a cabo la caracterización del sistema de limpieza del robot Kwunphi, enfocándose en los cepillos utilizados y sus componentes principales. Se analizarán dos versiones del cepillo: el cepillo original, diseñado con un patrón espiral y cerdas de un solo tipo, y el cepillo construido posteriormente por la empresa, con un patrón lineal y cerdas de dos tipos. Para esta caracterización, se tendrán en cuenta diversos aspectos de diseño, como el material y geometría del eje, la disposición de las cerdas, el peso total y el sistema de fijación de cada componente. Este análisis permitirá identificar las propiedades fundamentales de cada diseño y servirá como referencia para el desarrollo de futuros prototipos de cepillos.

- **Cepillo original de Kwunphi**

Ilustración 1



Fuente. Propia

Tabla 1

Característica	Cepillo Original (Patrón Espiral)
Longitud del eje	800 milímetros
Diámetro del eje	15 milímetros
Material del eje	Acero inoxidable (tubo hueco)
Peso total (eje y cerdas)	1.495 kilogramos
Protuberancia de los filamentos de cerdas	70 milímetros
Longitud de los filamentos de cerdas	85 milímetros
Tipos de cerdas	1 tipo de cerda
Diámetro del filamento de cerda	0.25 mm (clasificación: Extra suave)
Número de líneas de cerdas	1 hélice
Número de pasos por hélice	80 pasos
Paso de hélice	10 milímetros
Sistema de fijación de cerdas	Grafado
Patrón	Espiral

Nota. Características del Cepillo Original (Patrón Espiral)

- Cepillo construido por la empresa

Ilustración 2



Fuente. Propia

Tabla 2

Característica	Cepillo Construido por la Empresa (Patrón Lineal)
Longitud del eje	800 milímetros
Diámetro del eje	52 mm (compuesto)
Composición del eje	Recubrimiento de nylon de 36.77 mm de diámetro, con núcleo hueco de acero inoxidable de 15.23 mm de diámetro
Material del eje	Acero inoxidable (núcleo hueco) y recubrimiento de nylon
Peso total (eje y cerdas)	3.5 kilogramos
Protuberancia de los filamentos de cerdas	66 milímetros
Longitud de los filamentos de cerdas	76.4 milímetros
Tipos de cerdas	2 tipos de cerdas
Diámetro del primer tipo de cerda	0.25 mm (clasificación: Extra suave)
Diámetro del segundo tipo de cerda	0.8 mm (clasificación: Extradura)
Número de líneas de cerdas	8 líneas del primer tipo, 8 líneas del segundo tipo
Número de agujeros del primer tipo de cerda	117 agujeros por línea, total de 936 agujeros
Número de agujeros del segundo tipo de cerda	122 agujeros por línea, total de 976 agujeros
Distancia entre agujeros	11.5 milímetros
Sistema de fijación de cerdas	Directamente al recubrimiento de nylon
Patrón	Lineal

Nota. Características del Cepillo Construido por la Empresa (Patrón Lineal)

A través de un análisis exhaustivo, se han identificado las principales características de ambos cepillos, resaltando aspectos clave como la configuración del eje, los materiales utilizados y el diseño de las cerdas. Este proceso ha permitido entender cómo cada característica influye en el rendimiento del cepillo en la limpieza de paneles solares. La información recopilada será fundamental para el diseño de nuevos prototipos, permitiendo seleccionar y ajustar aquellas características que maximicen la eficiencia

y adaptabilidad del cepillo. Con estos datos, se puede optimizar el rendimiento de futuros cepillos, mejorando su capacidad de limpieza y prolongando la vida útil del sistema en condiciones operativas reales.

3.2. ANÁLISIS DE PATRONES

En el diseño de los prototipos de cepillos para el robot Kwunphi, se evaluaron varios patrones de cerdas, cada uno con sus características y aplicaciones específicas. A continuación, se presentan los patrones considerados en esta investigación:

- **Patrón Recto**

Descripción: Las cerdas están dispuestas en filas paralelas al eje del cepillo, formando una estructura uniforme y simétrica. Esta configuración facilita el contacto directo con la superficie, asegurando una cobertura constante. Es adecuado para áreas de suciedad distribuida homogéneamente.

Ventajas: Proporciona una limpieza uniforme en superficies planas, permitiendo un barrido efectivo sin dejar zonas sin cubrir. Su simplicidad también reduce el desgaste del cepillo y permite un mantenimiento rápido.

Ilustración 3



Fuente. Alibaba. (s. f.). Industrial roller cylinder nylon brush for conveyor cleaning [Cepillo tipo rodillo recto]. Alibaba. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-roller-cylinder-nylon-brush-for-1600559824695.html>

- **Patrón Helicoidal**

Descripción: Las cerdas siguen una disposición en espiral a lo largo del eje, rodeando el cepillo de forma continua. Esto permite que el cepillo genere un movimiento rotacional que arrastra la suciedad a lo largo de la superficie. Es ideal para superficies con suciedad adherida.

Ventajas: Optimiza el arrastre de partículas, aumentando la efectividad en superficies irregulares. Permite una limpieza dinámica en acumulaciones difíciles, ideal para remover residuos de alta densidad y adherencia.

Ilustración 4



Fuente. Cepillos Regios. (s. f.). Cepillo tipo rodillo con cerdas helicoidales o tipo hélice [Cepillo helicoidal]. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://cepillosregios.com/producto/cepillo-tipo-rodillo-con-cerdas-helicoidales-o-tipo-helice/>

- **Patrón Espiral:**

Descripción: Las cerdas están organizadas en un patrón espiral con enfoque específico, generando una disposición compacta en áreas clave. Este patrón concentra la presión en puntos específicos, mejorando la capacidad de limpieza en zonas difíciles.

Ilustración 5



Fuente. Alibaba. (s. f.). Nylon bristle strip circular spiral industrial brush [Cepillo espiral]. Alibaba. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Nylon-Bristle-Strip-Circular-Spiral-Industrial-60394088511.html?spm=a2700.7724857.0.0.a217194cgm95ec>

Ventajas: Ideal para suciedad localizada, permitiendo una limpieza precisa en manchas difíciles. Su enfoque puntual reduce el tiempo de limpieza en áreas problemáticas, maximizando la eficiencia sin múltiples pasadas.

- **Patrón Circular**

Descripción: Cerdas dispuestas en círculos concéntricos alrededor del eje del cepillo, formando una estructura radial que cubre el área central. Esta disposición permite que el cepillo se adapte a puntos específicos de la superficie.

Ventajas: Facilita la limpieza en áreas localizadas con el uso de movimiento centrífugo. Es eficaz en la remoción de manchas específicas y concentradas, generando un contacto uniforme en cada rotación.

Ilustración 6



Fuente. Hiltrento. (s. f.). Cepillo circular convergente cuerpo madera [Cepillo circular]. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://www.hiltrento.com/cepillos-rotativos/316-cepillo-circular-convergente-cuerpo-madera.html>

- **Patrón en Cruz**

Descripción: Las cerdas están dispuestas en forma de cruz en el eje del cepillo, formando una estructura que intercepta en ángulos de 90 grados. Esta configuración permite una cobertura en varias direcciones.

Ventajas: Ofrece una limpieza multidireccional que alcanza áreas de difícil acceso. Permite cubrir diferentes ángulos, útil en superficies complejas y con geometrías irregulares, optimizando la eficacia en cada pasada.

Ilustración 7



Fuente. Homecenter. (s. f.). Accesorio cepillo en cruz [Cepillo en cruz]. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://homecenter.falabella.com.co/homecenter-co/product/128212939/Accesorio-Cepillo-En-Cruz/128213043>

- **Patrón de Flecha**

Descripción: Las cerdas están dispuestas en forma de flecha, orientadas en una dirección específica a lo largo del eje del cepillo. Este patrón guía el movimiento de limpieza hacia una dirección.

Ilustración 8



Fuente. Bazar Loco. (s. f.). Cepillo rotativo limpieza de cristales top [Cepillo de flecha]. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://bazarloco.com/cepillo-limpieza-rotativo-electrico/cepillo-rotativo-limpieza-de-cristales-top.html>

Ventajas: Mejora la eficiencia de la limpieza al enfocar el movimiento en una sola dirección. Facilita la captura de suciedad en áreas lineales, canalizando los residuos hacia un borde específico.

- **Patrón de Conicidad:**

Descripción: Las cerdas están dispuestas en una estructura cónica, disminuyendo en diámetro hacia los extremos del cepillo. Esto permite que el cepillo acceda a espacios estrechos y ángulos difíciles.

Ventajas: Facilita la limpieza en rincones y áreas angostas, adaptándose a contornos complejos. Su estructura permite un contacto uniforme en áreas de difícil acceso, maximizando la cobertura en superficies complicadas.

Ilustración 9

Fuente. *Todo en Cepillos. (s. f.). Cepillo rotativo [Cepillo cónico]. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://todoencepilllos.com/cepillo-rotativo/>*

Tras un análisis exhaustivo de los patrones evaluados y su efectividad, se seleccionaron los patrones recto, helicoidal y espiral para el diseño de los prototipos de cepillos del robot Kwunphi. Esta elección se fundamenta en tres consideraciones clave:

- **Eficacia en la Limpieza:** Los patrones seleccionados maximizan el contacto con la superficie, optimizando la eliminación de suciedad en paneles solares. En particular, los patrones helicoidal y espiral facilitan el arrastre efectivo de partículas adheridas, incluso en condiciones de suciedad compleja.
- **Versatilidad:** La combinación de estos patrones permite adaptarse a diversos tipos de suciedad y condiciones operativas. El patrón recto es adecuado para limpiezas generales, mientras que los patrones helicoidal y espiral ofrecen una limpieza intensiva en áreas con suciedad persistente.
- **Facilidad de Fabricación:** Estos patrones son fáciles de prototipar con los materiales disponibles, lo cual agiliza el diseño y las pruebas, manteniendo un enfoque práctico en el desarrollo.

En conclusión, los patrones recto, helicoidal y espiral fueron seleccionados por su efectividad, versatilidad y facilidad de implementación, siendo la opción óptima para mejorar el rendimiento del cepillo en la limpieza de paneles solares del robot Kwunphi.

3.3. ANÁLISIS DE FIBRAS DE MATERIALES

La selección del material de las fibras es un factor crucial en el diseño de un cepillo de limpieza eficiente para paneles solares. A continuación, se presenta una tabla comparativa con algunas de las fibras comerciales más comunes en el mercado y sus principales características.

Tabla 2

Material	Durabilidad	Rigidez	Resistencia al Desgaste	Rango de Temperatura (°C)	Precio	Aplicaciones Típicas
Poliamida 6 (PA 6)	Alta	Media	Alta	-20 a 85	\$ 16.000	Buena resistencia al estrés mecánico (flexión/tracción) y a la abrasión. Buena elasticidad y capacidad de recuperación.
Poliamida 6.6 (PA 6,6)	Muy Alta	Alta	Muy alta	-25 a 110	\$ 20.000	Alta resistencia al desgaste y a la abrasión, buena capacidad de recuperación y resistencia al calor. Ideal para trabajos exigentes.
Poliamida 6.10 (PA 6,10)	Media	Baja	Media	-30 a 90	\$ 28.000	Menor absorción de agua, pero baja resistencia a la abrasión. Se recomienda en uso en seco.
Poliamida 6.12 (PA 6,12)	Muy Alta	Alta	Muy alta	-30 a 120	\$ 28.000	Mayor resistencia a la abrasión en comparación con PA 6.6, buena estabilidad en ambientes húmedos, baja permeabilidad. Ideal para trabajos intensivos.
Poliéster (PBT)	Alta	Media	Muy alta	-30 a 100	\$ 12.000	Recomendado en entornos húmedos y de alimentos. Buena recuperación elástica y resistencia al desgaste. Adecuado para aplicaciones intensivas y limpieza.
Polipropileno (PP)	Media	Baja	Media	-20 a 80	\$ 6.000	Buena resistencia a agentes químicos y abrasivos. Cepillos de uso económico, baja resistencia al desgaste. Ideal para limpieza variada y trabajos ligeros.

Nota. Tabla 3 (especificaciones de las cerdas)

Para los prototipos del cepillo de limpieza de paneles solares, el polipropileno (PP) se presenta como una opción adecuada por varias razones:

1. Costo Asequible: El PP es el material más económico de la tabla (6,000), lo que permite realizar múltiples pruebas sin un gran impacto en el presupuesto. Esto es ideal en la fase de desarrollo, donde es importante probar y ajustar sin costos elevados.
2. Resistencia Química Adecuada: A pesar de ser una opción económica, el polipropileno ofrece buena resistencia a agentes químicos. Esto es útil para aplicaciones en exteriores, ya que permite que el prototipo soporte ciertas condiciones ambientales sin deteriorarse rápidamente.

3. **Peso Ligero:** Su baja densidad contribuye a que el cepillo sea liviano, lo cual facilita evaluar la carga sobre el motor del robot y optimizar la eficiencia del sistema. Esto es especialmente útil en prototipos, donde se busca probar el rendimiento general.
4. **Resistencia a la humedad:** Aunque el PP no es tan duradero como otros materiales, su resistencia a la humedad es suficiente para pruebas iniciales al aire libre. Esto permite evaluar el rendimiento del cepillo en condiciones reales sin la necesidad de un material de alta resistencia en esta fase.

El polipropileno (PP) es una elección práctica para los prototipos de cepillos, ya que combina bajo costo, resistencia química adecuada y ligereza. Esto permite realizar pruebas y ajustes sin comprometer el presupuesto, antes de considerar otros materiales para la versión final del cepillo.

Para establecer una base técnica sólida en el diseño de los prototipos, se ha definido una clasificación de los diámetros de las cerdas, cada uno con aplicaciones específicas en función de su nivel de suavidad y flexibilidad. Esta clasificación ayuda a seleccionar el diámetro más adecuado para optimizar la limpieza de los paneles solares sin dañar su superficie.

Tabla 3

Clasificación de Suavidad	Diámetro de las fibras (mm)	Descripción Técnica	Aplicaciones Típicas
Extra Suave	0.05 - 0.15	Fibras ultra finas y flexibles, recomendadas para un contacto extremadamente delicado en superficies sensibles.	Limpieza de componentes ópticos y electrónicos, superficies muy delicadas.
Suave	0.15 - 0.30	Fibras finas que equilibran suavidad y eficacia, evitando rayaduras.	Limpieza de paneles solares, vidrios, y superficies lisas, removiendo polvo y partículas pequeñas.
Media	0.30 - 0.45	Fibras con rigidez moderada, adecuadas para superficies que requieren presión ligera sin riesgo de daño.	Limpieza de marcos y bordes de paneles solares, superficies exteriores con suciedad moderada.
Dura	0.45 - 0.60	Cerdas firmes para remover residuos adheridos en áreas que toleran una limpieza más intensa.	Remoción de suciedad resistente en estructuras de soporte y zonas de suciedad persistente.
Extra Dura	0.60 - 0.75	Cerdas muy rígidas, diseñadas para condiciones de limpieza exigentes en superficies no delicadas.	Eliminación de residuos difíciles en entornos industriales y superficies robustas.

Fuente. Cepillo Técnico. (2021, junio). Cepillos técnicos para placas solares . Recuperado de <https://www.cepillotecnico.es/2021>

/06/cepillos-tecnicos-para-placas-solares/

En esta fase inicial, se utilizará un diámetro de 0.25mm para las cerdas de los prototipos, lo cual asegura un equilibrio entre suavidad y eficacia en la remoción de partículas. Este tamaño de filamento permite evaluar el rendimiento general del cepillo y su adaptabilidad a las condiciones de limpieza requeridas para paneles solares.

Para los prototipos finales, se analizará si es necesario ajustar el diámetro de las cerdas para mejorar su efectividad. Además, estos resultados influyen en la elección del diámetro de filamento en el

diseño final, asegurando que el cepillo ofrezca el mejor rendimiento en términos de limpieza y protección de la superficie del panel.

3.4. CÁLCULOS DE CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS

Datos A Tener En Cuenta:

- Distancia Fin a Fin = 6mm
- Diámetro del mechón = 5mm
- Longitud del eje = 800mm
- Longitud de uso del eje = 763mm
- Diámetro del eje = 24mm

Solución Prototipo Patrón Recto:

- **Número de Agujeros**

Longitud total del eje (palo de escoba): L=763 mm

Para calcular el número de agujeros (N) a lo largo del eje, podemos usar la fórmula:

$$N \approx \frac{L}{\text{distancia deseada entre agujeros}}$$

$$N \approx \frac{763\text{mm}}{6\text{mm}} \approx 127 \text{ agujeros}$$

(1)

Aproximadamente 127 agujeros a lo largo del eje.

Plantenberg, K. Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución de Elementos Lineales).

- **Resistencia del Eje (Esfuerzo de Flexión)**

Para calcular la resistencia del eje, consideraremos el momento de flexión, ya que el eje soportará el peso del cepillo y la presión aplicada durante la limpieza.

Datos necesarios:

- Material: Palo de escoba
- Diámetro del eje: $d = 24\text{mm} \rightarrow 0.024\text{m}$
- Longitud del eje: $L = 800\text{mm} \rightarrow 0.8\text{m}$
- Peso del cepillo y el eje: $m = 0.55\text{ kg}$
- Fuerza (Peso):

$$F = (m)(g)$$

$$F = (0.55\text{Kg})(9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$F = 5.3955\text{N}$$

(2)

- **Cálculo del Momento de Flexión Máximo (M):**

Asumimos que la fuerza se aplica en el centro del eje, por lo tanto:

$$M = \frac{(F)(L)}{4}$$

Sustituyendo los valores:

$$M = \frac{(5.3955\text{N})(0.8\text{m})}{4} \rightarrow M = 1.0791\text{Nm}$$

(3)

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 251, capítulo 6 (Análisis de Flexión en Vigas).

- **Calcular la distancia máxima al eje neutro (c)**

Para un eje circular, la distancia máxima al eje neutro c es la mitad del diámetro del eje:

$$c = \frac{d}{2}$$

$$c = \frac{0.024m}{2}$$

$$c = 0.012m$$

(4)

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 246, capítulo 5 (Flexión en Ejes).

- **Momento de inercia (I)**

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi(0.024m)^4}{64} = 1.62 \times 10^{-8} m^4$$

(5)

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 267, capítulo 6 (Propiedades Geométricas de Secciones).

- **Esfuerzo de Flexión (σ):**

$$\sigma = \frac{(M)(c)}{I}$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{(1.0791Nm)(0.012m)}{1.62 \times 10^{-8}m^4} \approx 799.3KPa$$

(6)

Resultado: La resistencia del eje es aproximadamente 799.3KPa, lo cual es seguro para madera bajo estas condiciones de carga.

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 231, capítulo 5 (Esfuerzos por Flexión).

- **Distancia entre Agujeros**

Longitud total del eje L=763 mm

Número de agujeros deseado N=127

$$d = \frac{L}{N} = \frac{763 \text{ mm}}{127} \approx 6 \text{ mm}$$

(7)

La distancia entre agujeros sería aproximadamente 6mm.

Plantenberg, K., Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución Lineal en Geometría Mecánica).

- **Ángulo de Inclinación**

Un patrón recto, las cerdas no están dispuestas en un ángulo helicoidal, sino alineadas de forma perpendicular al eje. Es tal que cada una de ellas se proyecta a 90 grados respecto al eje.

- **Distancia entre hélices**

$$D_v = \frac{d}{N}$$

$$D_v = \frac{24mm}{6}$$

$$D_v = 4mm$$

(8)

Esta es la distancia entre cada hélice en el sentido vertical, o radial sobre el diámetro del eje.

Muvdi, B.B., y McNabb, J.W., Engineering Mechanics of Materials, 3rd Edition, Springer, 2012, página 312, capítulo 7 (Distribución en Hélices y Elementos Helicoidales).

- **Protuberancia de las cerdas**

Longitud total de cada filamento de cerda: L=90 mm

Diámetro del eje: d=24mm

La protuberancia efectiva de las cerdas se calcula como la longitud que sobresale del eje:

$$L_c = L - \frac{d}{2}$$

Sustituyendo:

$$L_c = 90mm - \frac{24mm}{2} \rightarrow 90mm - 12mm = 78mm$$

(9)

La protuberancia de las cerdas es de aproximadamente 78 mm.

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 320, capítulo 5 (Componentes Sobresalientes en Ejes).

Solución Prototipo Patrón Helicoidal:

- **Número de Agujeros**

Longitud total del eje (palo de escoba): L= 763 mm

Para calcular el número de agujeros (N) a lo largo del eje, podemos usar la fórmula:

$$N \approx \frac{L}{\text{distancia deseada entre agujeros}}$$

$$N \approx \frac{763mm}{6mm} \approx 127 \text{ agujeros}$$

(10)

Aproximadamente 127 agujeros a lo largo del eje.

Plantenberg, K. Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución de Elementos Lineales).

- **Resistencia del Eje (Esfuerzo de Flexión)**

Para calcular la resistencia del eje, consideraremos el momento de flexión, ya que el eje soportará el peso del cepillo y la presión aplicada durante la limpieza.

Datos necesarios:

- Material: Palo de escoba
- Diámetro del eje: $d=24\text{mm} \rightarrow 0.024\text{m}$
- Longitud del eje: $L=800\text{ mm} \rightarrow 0.8\text{m}$
- Peso del cepillo y el eje: $m=0.55\text{ kg}$
- Fuerza (Peso):

$$F = (m)(g)$$

$$F = (0.55\text{Kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$F = 5.3955\text{N}$$

(11)

- **Cálculo del Momento de Flexión Máximo (M):**

Asumimos que la fuerza se aplica en el centro del eje, por lo tanto:

$$M = \frac{(F)(L)}{4}$$

Sustituyendo los valores:

$$M = \frac{(5.3955\text{N})(0.8\text{m})}{4} \rightarrow M = 1.0791\text{Nm}$$

(11)

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 251, capítulo 6

(Análisis de Flexión en Vigas).

- **Calcular la distancia máxima al eje neutro (c)**

Para un eje circular, la distancia máxima al eje neutro c es la mitad del diámetro del eje:

$$c = \frac{d}{2}$$

$$c = \frac{0.024m}{2}$$

$$c = 0.012m$$

(12)

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 246, capítulo 5 (Flexión en Ejes).

- **Momento de inercia (I):**

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi(0.024m)^4}{64} = 1.62 \times 10^{-8} m^4$$

(13)

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 267, capítulo 6 (Propiedades Geométricas de Secciones).

- **Esfuerzo de Flexión (σ):**

$$\sigma = \frac{(M)(c)}{I}$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{(1.0791Nm)(0.012m)}{1.62 \times 10^{-8}m^4} \approx 799.3KPa$$

(14)

Resultado: La resistencia del eje es aproximadamente 799.3KPa, lo cual es seguro para madera bajo estas condiciones de carga.

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 231, capítulo 5 (Esfuerzos por Flexión).

- **Distancia entre Agujeros**

Longitud total del eje L= 763mm

Número de agujeros deseado N= 127

$$d = \frac{L}{N} = \frac{763 \text{ mm}}{133} \approx 6 \text{ mm}$$

(15)

La distancia entre agujeros sería aproximadamente 6mm.

Plantenberg, K., Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución Lineal en Geometría Mecánica).

- **Paso de Hélice (P)**

Con 2 pasos de hélice en una longitud de 763 mm, podemos calcular el paso de la hélice (P) como la distancia total dividida entre el número de pasos:

$$P = \frac{L}{\text{número de pasos}} = \frac{763\text{mm}}{2} = 381.5\text{mm}$$

(16)

El paso de la hélice es de 381.5 mm.

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Resortes Helicoidales y Hélices).

- **Ángulo de Inclinación de la Hélice (θ):**

Para determinar el ángulo de inclinación (θ), utilizamos la fórmula:

$$\theta = \arctan \left(\frac{P}{\pi d} \right)$$

donde P =381.5 mm y d =24 mm

Sustituyendo:

$$\theta = \arctan \left(\frac{381.5\text{mm}}{(\pi)(24\text{mm})} \right)$$

$$\theta \approx \arctan \left(\frac{381.5}{75.4} \right) \rightarrow \arctan (5.1) \approx 78.82^\circ$$

(17)

El ángulo de inclinación de la hélice es aproximadamente de 78.82 grados.

Budynas, R.G. y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Geometría de Hélices y Ángulos de Inclinación).

- **Ángulo De Separación**

El ángulo de separación entre cada hélice alrededor de la circunferencia. Este ángulo de separación se calcula como:

$$\text{Ángulo de Separación} = \frac{360^\circ}{\text{Numero de helices}} \rightarrow \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

(18)

Las 6 hélices estarán separadas por un ángulo de 60 grados alrededor del eje, lo que permite una distribución uniforme de las cerdas.

Mott, Robert L., Machine Elements in Mechanical Design , 6th Edition, Pearson, 2017, página 259, capítulo 7 (Técnicas de fijación, unión y conexión).

- **Distancia entre hélices**

$$D_v = \frac{d}{N}$$

$$D_v = \frac{24mm}{6}$$

$$D_v = 4mm$$

(19)

Esta es la distancia entre cada hélice en el sentido vertical, o radial sobre el diámetro del eje.

Muvdi, B.B., y McNabb, J.W., Engineering Mechanics of Materials, 3rd Edition, Springer, 2012, página 312, capítulo 7 (Distribución en Hélices y Elementos Helicoidales).

- **Protuberancia de las cerdas**

Longitud total de cada filamento de cerda: $L=90\text{ mm}$

Diámetro del eje: $d=24\text{mm}$

La protuberancia efectiva de las cerdas se calcula como la longitud que sobresale del eje:

$$L_c = L - \frac{D}{2}$$

Sustituyendo:

$$L_c = 90\text{mm} - \frac{24\text{mm}}{2} \rightarrow 90\text{mm} - 12\text{mm} = 78\text{mm}$$

(20)

La protuberancia de las cerdas es de aproximadamente 78 mm.

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 320, capítulo 5 (Componentes Sobresalientes en Ejes).

Solución Prototipo Patrón Espiral:

- **Número de Agujeros**

Longitud total del eje (palo de escoba): $L=763\text{ mm}$

Para calcular el número de agujeros (N) a lo largo del eje, podemos usar la fórmula:

$$N \approx \frac{L}{\text{distancia deseada entre agujeros}}$$

$$N \approx \frac{763\text{mm}}{6\text{mm}} \approx 127 \text{ agujeros}$$

(21)

Aproximadamente 127 agujeros a lo largo del eje.

Plantenberg, K. Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución de Elementos Lineales).

- **Resistencia del Eje (Esfuerzo de Flexión)**

Para calcular la resistencia del eje, consideraremos el momento de flexión, ya que el eje soportará el peso del cepillo y la presión aplicada durante la limpieza.

Datos necesarios:

- Material: Palo de escoba
- Diámetro del eje: $d=24\text{mm} \rightarrow 0.024\text{m}$
- Longitud del eje: $L=800\text{ mm} \rightarrow 0.8\text{m}$
- Peso del cepillo y el eje: $m=0.4\text{ kg}$
- Fuerza (Peso):

$$F = (m)(g)$$

$$F = 0.4\text{Kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 3.924\text{N}$$

(22)

- **Cálculo del Momento de Flexión Máximo (M):**

Asumimos que la fuerza se aplica en el centro del eje, por lo tanto:

$$M = \frac{(F)(L)}{4}$$

Sustituyendo los valores:

$$M = \frac{(3.924N)(0.8m)}{4} \rightarrow M = 0.7848Nm$$

(23)

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 251, capítulo 6

(Análisis de Flexión en Vigas).

- **Calcular la distancia máxima al eje neutro (c)**

Para un eje circular, la distancia máxima al eje neutro c es la mitad del diámetro del eje:

$$c = \frac{d}{2}$$

$$c = \frac{0.024m}{2}$$

$$c = 0.012m$$

(24)

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 246, capítulo

5 (Flexión en Ejes).

- **Momento de inercia (I):**

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi(0.024m)^4}{64} = 1.62 \times 10^{-8} m^4$$

(25)

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 267, capítulo 6 (Propiedades Geométricas de Secciones).

- **Esfuerzo de Flexión (σ):**

$$\sigma = \frac{(M)(c)}{I}$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{(1.0791Nm)(0.012m)}{1.62 \times 10^{-8}m^4} \approx 584 \text{ KPa}$$

(26)

Resultado: La resistencia del eje es aproximadamente 584 KPa, lo cual es seguro para madera bajo estas condiciones de carga.

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 231, capítulo 5 (Esfuerzos por Flexión).

- **Distancia entre Agujeros**

Longitud total del eje L=763 mm

Número de agujeros deseado N=127

$$d = \frac{L}{N} = \frac{763mm}{127} \approx 6mm$$

(27)

La distancia entre agujeros sería aproximadamente 6 mm.

Plantenberg, K., Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución Lineal en Geometría Mecánica).

- **Paso de Hélice (P)**

Dado que tenemos 14 pasos por hélice y el eje tiene una longitud de 763 mm, el paso de cada hélice se calcula dividiendo la longitud total entre el número de pasos:

$$P = \frac{L}{\text{número de pasos}} = \frac{763\text{mm}}{14} = 54.5\text{mm}$$

El paso de la hélice es de 54.5 mm.

(28)

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Resortes Helicoidales y Hélices).

- **Ángulo de Inclinación de la Hélice (θ):**

Para determinar el ángulo de inclinación (θ), utilizamos la fórmula:

$$\theta = \arctan \left(\frac{P}{\pi d} \right)$$

donde P = 80 mm y d = 24 mm

Sustituyendo:

$$\theta = \arctan \left(\frac{54.5\text{mm}}{(\pi)(24\text{mm})} \right)$$

$$\theta \approx \arctan \left(\frac{54.5}{75.4} \right) \rightarrow \arctan (0.7228) \approx 35^\circ$$

(29)

El ángulo de inclinación de la hélice es aproximadamente de 35 grados.

Budynas, R.G. y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Geometría de Hélices y Ángulos de Inclinación).

- **Ángulo De Separación**

El ángulo de separación entre cada hélice alrededor de la circunferencia. Este ángulo de separación se calcula como:

$$\text{Ángulo de Separación} = \frac{360^\circ}{\text{Numero de helices}} \rightarrow \frac{360^\circ}{2} = 180^\circ \quad (30)$$

El ángulo de separación entre hélices es 180 grados, lo que significa que están opuestas entre sí alrededor del eje.

Mott, Robert L., Machine Elements in Mechanical Design , 6th Edition, Pearson, 2017, página 259, capítulo 7 (Técnicas de fijación, unión y conexión).

- **Protuberancia de las cerdas**

Longitud total de cada filamento de cerda: L=90 mm

Diámetro del eje: d= 24mm

La protuberancia efectiva de las cerdas se calcula como la longitud que sobresale del eje:

$$L_c = L - \frac{d}{2}$$

Sustituyendo:

$$L_c = 90mm - \frac{24mm}{2} \rightarrow 90mm - 12mm = 78mm$$

(31)

La protuberancia de las cerdas es de aproximadamente 78 mm.

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 320, capítulo 5 (Componentes Sobresalientes en Ejes).

3.5. Construcción de los prototipos

- Se seleccionó un eje cilíndrico de madera (palo de escoba), al cual se le realizó un corte preciso a una longitud de 800 mm. Posteriormente, se efectuaron perforaciones de 15 mm de profundidad en el eje, conforme a las especificaciones establecidas para cada prototipo

Ilustración 10



Fuente. Propia

- Se adquirieron las cerdas mediante la empresa PRODUCTOS TR, estableciendo contacto directo para su compra. Posteriormente, las cerdas fueron insertadas cuidadosamente en el eje, siguiendo el procedimiento de ensamblaje específico.

Ilustración 11



Fuente. Propia

- Para garantizar la fijación de las cerdas en el eje, se empleó silicona como material adhesivo, asegurando su estabilidad y minimizando el riesgo de desprendimiento durante la operación.

Ilustración 12



Fuente. Propia

- Finalmente, se efectuó un orificio en el eje para permitir su ajuste preciso en la base del robot, facilitando así la instalación y el acople adecuado del cepillo.

Ilustración 13



Fuente. Propia

3.6. DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS DE CEPILLOS

El cepillo original del robot Kwunphi está diseñado con materiales de alta resistencia, lo cual le proporciona durabilidad, pero también contribuye a un peso considerable que dificulta su maniobrabilidad. La rigidez de sus cerdas genera una presión elevada sobre los paneles, lo que, en lugar de mejorar la limpieza, puede ocasionar un desgaste innecesario o incluso daño en las superficies fotovoltaicas más delicadas. Este diseño inicial resulta poco efectivo para remover partículas finas o adheridas, y su peso limita su adaptabilidad a diferentes condiciones de limpieza.

3.6.1. Características de los Prototipos

Para resolver las deficiencias identificadas en el cepillo original del robot Kwunphi, se diseñaron tres prototipos con patrones de cerdas distintos: recto, helicoidal y en espiral. Estos patrones fueron seleccionados considerando factores clave como la distribución de las cerdas y su interacción con la superficie de los paneles solares, buscando optimizar tanto la eficiencia en la remoción de suciedad como la flexibilidad necesaria para adaptarse a distintas condiciones de limpieza.

El diseño de cada prototipo se centró en mejorar dos aspectos fundamentales: la flexibilidad de las cerdas y la reducción del peso total del cepillo. La rigidez y peso excesivos del cepillo original no sólo reducían la efectividad en la limpieza, sino que además aumentaban el riesgo de dañar los paneles solares. Por ello, se exploraron materiales más ligeros y estructuras de soporte que permitiera un contacto más adaptable y seguro con la superficie del panel, sin comprometer la durabilidad.

3.6.1.1. Patrón Recto

Ilustración 14



Fuente. *Propia*

El patrón recto fue diseñado para proporcionar un trazo de limpieza uniforme, optimizando la cobertura del área de contacto en cada pasada. Este diseño facilita una limpieza lineal continua, lo que lo hace particularmente eficaz para eliminar partículas ligeras y polvo que no están fuertemente adheridos a la superficie del panel. La disposición recta de las cerdas permite una distribución homogénea de la presión sobre el área de limpieza, asegurando que cada pasada mantenga un nivel constante de contacto con la superficie.

3.6.1.2. Patrón Helicoidal

Ilustración 15



Fuente. *Propia*

El cepillo con patrón helicoidal presenta cerdas dispuestas en forma de hélice a lo largo de la base del cepillo, lo que genera un trazo de limpieza más dinámico y eficiente. Este diseño facilita una mejor adaptación a las irregularidades en la superficie del panel solar, permitiendo que las cerdas se ajusten suavemente a las variaciones sin aplicar una presión excesiva que pueda dañar la superficie. La disposición en hélice optimiza la dispersión de partículas, desplazándose hacia los bordes a medida que el cepillo avanza, lo que reduce la acumulación de residuos en el centro y contribuye a una limpieza uniforme y continua.

3.6.1.3. Patrón Espiral

Ilustración 16



Fuente. *Propia*

El cepillo con patrón en espiral del cepillo presenta cerdas dispuestas en una configuración circular, generando un trazo de limpieza concéntrico a medida que el cepillo se mueve sobre la superficie del panel solar. Este diseño maximiza el área de contacto de manera progresiva, lo que permite un aumento gradual de la presión en cada pasada sin riesgo de dañar la superficie. La estructura en espiral también facilita una cobertura uniforme y controlada, optimizando el esfuerzo de limpieza especialmente en áreas con acumulación de suciedad resistente.

Cada uno de estos diseños representa un enfoque específico para resolver los problemas de limpieza identificados en el cepillo original del robot Kwunphi. La selección de patrones diversos, como el recto, helicoidal y en espiral, responde a la necesidad de adaptar el cepillo a diferentes tipos de suciedad y condiciones de operación en los paneles solares. Cada patrón ofrece características particulares de interacción con la superficie, permitiendo optimizar aspectos como la presión de contacto, la dispersión de partículas y la cobertura de limpieza.

La implementación de estos diseños brinda la oportunidad de realizar una evaluación comparativa exhaustiva de su efectividad en condiciones de limpieza simuladas y reales, proporcionando datos clave sobre su rendimiento y durabilidad. En las próximas secciones, se detalla el rendimiento de cada diseño en pruebas experimentales, lo que permitirá identificar el patrón óptimo para maximizar la eficacia del robot y minimizar el impacto en la superficie de los paneles solares. Este análisis comparativo es esencial para seleccionar el diseño final, orientado a satisfacer las necesidades específicas de mantenimiento en la industria solar.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS DE PROTOTIPOS

Este capítulo detalla las pruebas realizadas en los diferentes prototipos de cepillos diseñados, evaluando su rendimiento en distintas condiciones de limpieza y en función de su patrón de cerdas. La comparación entre los patrones recto, helicoidal y espiral permite identificar qué características y configuraciones resultan más eficientes para la remoción de diferentes tipos de suciedad en paneles solares.

4.1. PRUEBAS DE PROTOTIPOS PATRONES

En esta evaluación, analizaremos la eficacia de los cuatro tipos de cepillos de limpieza aplicados sobre paneles solares: el cepillo con el patrón original, el cepillo con el patrón lineal, el cepillo con el patrón espiral, el cepillo con el patrón helicoidal y el cepillo fabricado por la empresa IDEAGRO. La prueba se realizará sobre una superficie de acrílico para simular las características del material de los paneles solares y se utilizarán tres materiales con distintas densidades y propiedades: harina, arena de río y gravilla fina. Cada uno de estos materiales representa tipos específicos de suciedad que comúnmente se encuentran en el entorno exterior y que pueden afectar el rendimiento de los paneles solares.

La selección de materiales para las pruebas de limpieza de paneles solares es fundamental para simular adecuadamente las condiciones reales de suciedad ambiental. A continuación, se presenta una comparación de los materiales utilizados en las pruebas con elementos comunes en el entorno, basada en sus densidades:

- **Harina**

Ilustración 17



Fuente. Propia

Densidad y simulación de polvo fino: La harina, con una densidad promedio de aproximadamente $0,57 \text{ g/cm}^3$, es ideal para simular partículas finas de polvo urbano o agrícola en entornos secos. Su densidad se encuentra en el rango entre 0.410 y 0.547 g/cm^3 , lo que la convierte en un buen material para representar partículas que afectan la limpieza de superficies expuestas (U .S . Department of Agriculture , Soil Survey Laboratory Methods Manual , 2018) .

Comportamiento en condiciones húmedas: Cuando la harina se humedece, su consistencia cambia a una sustancia pegajosa, análoga al barro o lodo que se forma en días de lluvia ligera. Esta propiedad es clave para pruebas que simulan ambientes con alta humedad o presencia de agua (Fetzer , J. et al ., Journal of Agriculture and Food Chemistry , 2020).

Similitud con excremento de aves en cuanto a adherencia: La harina húmeda, al secarse, forma una capa resistente y difícil de remover, similar al excremento de aves que se adhiere a superficies exteriores expuestas (Jiang , Z . et al ., Environmental Science & Tecnología , 2018).

- **Arena de Río**

Ilustración 18



Fuente. *Propia*

Densidad y simulación de partículas transportadas por viento: La arena de río, con una densidad cercana a 1.52 g/cm^3 , representa partículas de tierra y arena combinadas presentes en zonas áridas o cercanas a cuerpos de agua. Esta densidad la hace adecuada para simular condiciones de suciedad causadas por partículas de mayor tamaño que el polvo fino (*Thompson , L. , & Miller , R. , Soil Science Society of America Journal , 2017*).

Comportamiento en condiciones húmedas: En ambientes húmedos, la arena se vuelve más adherente, asemejando la acumulación de tierra húmeda o barro en entornos expuestos al polvo. Esta propiedad es particularmente útil para simular la suciedad en paneles solares después de lluvias (*Smith , K. , Journal of Environmental Quality , 2019*).

- **Gravilla fina**

Ilustración 19



Fuente. Propia

Densidad y representación de partículas gruesas: La gravilla fina, con una densidad aproximada de $1,80 \text{ g/cm}^3$, es representativa de partículas más gruesas, como pequeños fragmentos minerales. Este tipo de partículas es común en entornos industriales o zonas donde hay tormentas de viento. (*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018).

Comportamiento en condiciones húmedas y adherencia: La gravilla, cuando se encuentra mojada, simula la acumulación de materiales pesados en presencia de barro o tierra húmeda. Esta combinación de densidad y adherencia representa bien las condiciones de suciedad presentes en áreas urbanas o industriales tras lluvias fuertes (*Geotechnical and Geological Engineering Journal* , 2017).

En las siguientes tablas, presentamos un análisis detallado de las pruebas realizadas utilizando cada tipo de cepillo. El objetivo de estas pruebas es determinar la efectividad del cepillo en la remoción de tierra o suciedad adherida a la superficie de interés. Este análisis ayudará a evaluar el rendimiento del cepillo y su capacidad para dejar la superficie lo más limpia posible.

A continuación, se proporciona el enlace al video en el que se documenta la realización de todas las pruebas, tanto en condiciones de limpieza en seco como en mojado. Este material audiovisual complementa la evidencia presentada y permite observar el proceso y resultados de cada prueba en detalle.

Link: <https://youtu.be/7y7CgBy5mrk?si=kXqKi8u7Q8P2Jr2w>

4.2. ANÁLISIS DE PRUEBAS

A partir de las pruebas realizadas previamente con los diferentes tipos de cepillos el cepillo de patrón original, el cepillo de patrón lineal, el cepillo de patrón en espiral, el cepillo de patrón helicoidal y el cepillo de la empresa IDEAGRO se procederá con un análisis detallado mediante procesamiento de imágenes. Para este análisis, se utilizará un programa desarrollado en Python empleando la biblioteca OpenCV, Numpy y Matplotlib que permitirán evaluar el porcentaje de limpieza logrado por cada cepillo.

El procedimiento incluirá la captura de imágenes del acrílico antes y después del paso de cada cepillo, estableciendo un punto de referencia inicial de "100% sucio" (acrílico completamente cubierto por el material) y comparándolo con el estado posterior a la limpieza. El programa, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes, analizará estas fotos para calcular el porcentaje de suciedad residual en cada prueba, lo que permitirá evaluar y comparar de forma precisa la eficacia de cada cepillo bajo las condiciones mencionadas (materiales en seco y en húmedo). A través de este análisis objetivo, se busca identificar el cepillo que logre el mayor grado de limpieza, permitiendo seleccionar el diseño más eficiente para mantener los paneles solares en condiciones óptimas de captación de energía.

4.3. EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA

4.3.1. Algoritmo de Procesamiento de Imágenes para Cálculo de Puntos Negros Retirados

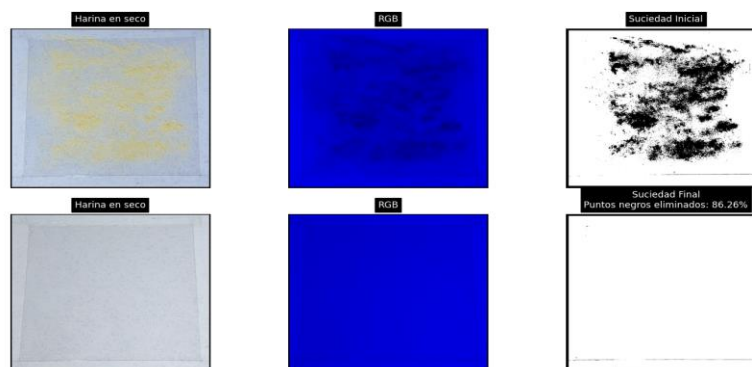
Tabla 4

1. Importación de librerías: *cv2*, *numpy*, *matplotlib*, *pandas*.
2. Definición de rutas de las imágenes:
 - *image_path_1* y *image_path_2*.
3. Lectura de imágenes: *img1* y *img2*.
4. Conversión de *img1* y *img2* a espacio de color RGB.
5. Redimensionamiento de *img2* para que coincida con las dimensiones de *img1*.
6. Aplicación de filtros:
 - Filtro de mediana en *img1*.
 - Filtro bilateral en *img2*.
7. Extracción del canal azul:
 - Definición de *extract_blue_channel*.
 - Extracción del canal azul de *img1* y *img2*.
8. Binarización del canal azul:
 - Definición de *binarize_blue_channel*.
 - Binarización de *img1_blue* y *img2_blue*.
9. Aplicación de operaciones morfológicas adicionales en *b2_bin*.
10. Ajuste de dimensiones de *b1_bin* y *b2_bin*.
11. Cálculo de píxeles negros iniciales y finales.
12. Cálculo del porcentaje de puntos negros retirados.
13. Visualización de resultados con *matplotlib*.
14. Impresión de resultados en consola.
15. Creación de un *DataFrame* para el porcentaje de puntos negros retirados.
16. Visualización de la figura generada.

Fuente. Propia

- Ejemplo:

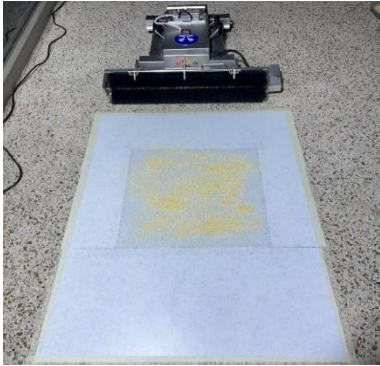
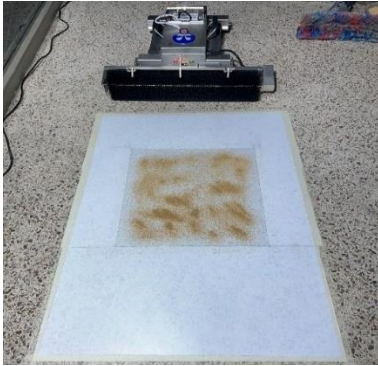
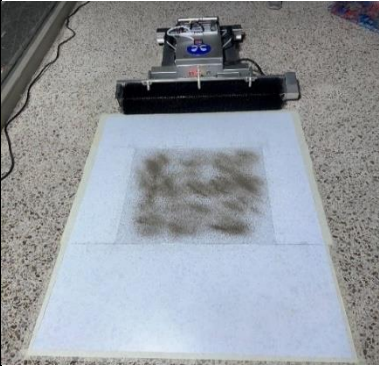
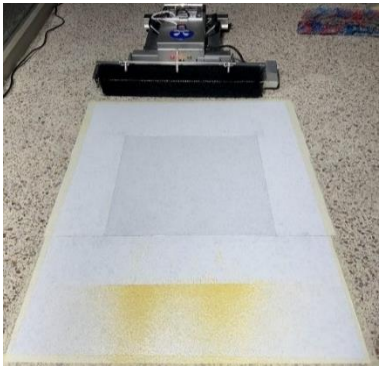
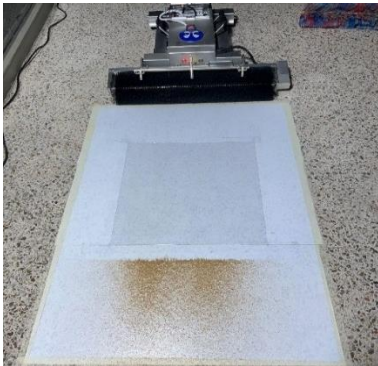
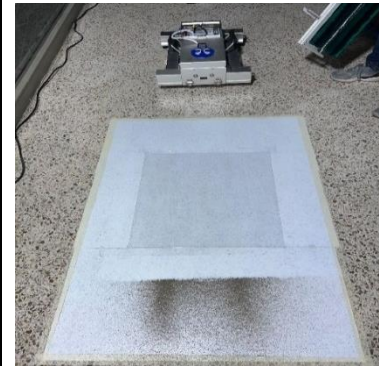
Ilustración 20



Fuente. Propia

En el análisis de la imagen de limpieza de los cepillos sobre la superficie acrílica con distintos materiales, se evaluará la remoción de partículas mediante imágenes en RGB y una comparación binarizada de suciedad inicial y final. El análisis indicará un porcentaje (%) de eliminación de las partículas, demostrando una efectividad de rendimiento en la limpieza. Este enfoque técnico de evaluación permite cuantificar objetivamente la eficiencia del cepillo, resaltando su capacidad de remoción y su posible eficacia para alcanzar una limpieza óptima en aplicaciones reales.

Ilustración 21

Harina en seco	Arena en seco	Gravilla fina en seco
Antes		
		
Después		
		

Fuente. Propia

4.4. COMPARACIÓN DE PATRONES EN LIMPIEZA

Con el análisis realizado a través de procesamiento de imágenes, hemos obtenido los porcentajes de limpieza correspondientes a cada uno de los cepillos evaluados: el cepillo de patrón original, el cepillo de patrón lineal, el cepillo de patrón en espiral, el cepillo de patrón helicoidal y el cepillo fabricado por la empresa IDEAGRO. Estos porcentajes reflejan la cantidad de suciedad residual en el acrílico después del paso de cada cepillo, permitiéndonos tener una medición precisa de su eficacia en la limpieza.

A partir de estos resultados, iniciaremos la comparación entre los diferentes patrones de cepillo, analizando cuál de ellos logra los mejores niveles de limpieza bajo las condiciones de prueba (materiales en seco y en húmedo). Esta comparación detallada nos permitirá identificar el cepillo más eficiente para mantener los paneles solares libres de suciedad, garantizando su máximo rendimiento y durabilidad en entornos reales.

La eficiencia o efectividad en la limpieza será calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Efectividad (\%)} = [(\text{Cantidad de Suciedad Eliminada}) / (\text{Cantidad de Suciedad Inicial})] \times 100$$

- **Harina en Seco**

Tabla 5

CEPILLO	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida (%)	Eficiencia (%)
Cepillo patrón original	100	86.26	86.26
Cepillo Fabricado por IDEAGRO	100	91.49	91.49
Cepillo patrón lineal	100	92.84	92.84
Cepillo patrón espiral	100	92.62	92.62
Cepillo patrón helicoidal	100	93.96	93.96

Fuente. Propia

- **Harina con Agua**

Tabla 6

CEPILLO	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida (%)	Eficiencia (%)
Cepillo patrón original	100	93.00	93.00
Cepillo Fabricado por IDEAGRO	100	93.28	93.28
Cepillo patrón lineal	100	93.25	93.25
Cepillo patrón espiral	100	90.18	90.18
Cepillo patrón helicoidal	100	93.29	93.29

Fuente. Propia

- **Arena en Seco**

Tabla 7

CEPILLO	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida (%)	Eficiencia (%)
Cepillo patrón original	100	92.75	92.75
Cepillo Fabricado por IDEAGRO	100	93.32	93.32
Cepillo patrón lineal	100	94.84	94.84
Cepillo patrón espiral	100	92.53	92.53
Cepillo patrón helicoidal	100	94.39	94.39

Fuente. Propia

- **Arena con Agua**

Tabla 8

CEPILLO	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida (%)	Eficiencia (%)
Cepillo patrón original	100	90.53	90.53
Cepillo Fabricado por IDEAGRO	100	90.59	90.59
Cepillo patrón lineal	100	92.69	92.69
Cepillo patrón espiral	100	90.40	90.40
Cepillo patrón helicoidal	100	92.72	92.72

Fuente. Propia

- **Gravilla Fina en Seco**

Tabla 9

CEPILLO	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida (%)	Eficiencia (%)
Cepillo patrón original	100	92.23	92.23
Cepillo Fabricado por IDEAGRO	100	93.10	93.10
Cepillo patrón lineal	100	92.89	92.89
Cepillo patrón espiral	100	92.31	92.31
Cepillo patrón helicoidal	100	93.45	93.45

Fuente. Propia

- **Gravilla Fina con Agua**

Tabla 10

CEPILLO	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida (%)	Eficiencia (%)
Cepillo patrón original	100	91.25	91.25
Cepillo Fabricado por IDEAGRO	100	92.85	92.85
Cepillo patrón lineal	100	88.07	88.07
Cepillo patrón espiral	100	92.27	92.27
Cepillo patrón helicoidal	100	92.48	92.48

Fuente. Propia

Con la comparación segmentada de los resultados obtenidos para cada cepillo de limpieza a través de las pruebas realizadas, se procederá a un análisis exhaustivo mediante una tabla comparativa. Esta tabla permitirá identificar cuál de los cepillos tuvo el mejor desempeño en la mayoría de las pruebas o en todas ellas, proporcionando una visión clara y ordenada de la eficacia de cada cepillo en diferentes escenarios. El objetivo es determinar cuál de los diseños y configuraciones de cerdas es el más eficiente para mantener la limpieza de los paneles solares, optimizando así su rendimiento en diversas condiciones de suciedad y humedad.

Tabla 11

	Harina en seco	Harina con agua	Arena en seco	Arena con agua	Gravilla fina en seco	Gravilla fina con agua
Cepillo patrón original	86.26	93.00	92.75	90.53	92.23	91.25
Cepillo fabricado por IDEAGRO	91.49	93.28	93.32	90.59	93.10	92.85
Cepillo patrón lineal	92.84	93.25	94.84	92.69	92.89	88.07
Cepillo patrón espiral	92.62	90.18	92.53	90.40	92.31	92.27
Cepillo patrón helicoidal	93.96	93.29	94.39	92.72	93.45	92.48

Fuente. Propia

4.5.INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en el análisis de procesamiento de imágenes, estamos listos para proceder con la interpretación de los datos recopilados. Cada porcentaje de limpieza calculado refleja la eficacia relativa de cada cepillo al remover distintos tipos de suciedad en las pruebas realizadas en seco y en húmedo.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla comparativa, el cepillo con patrón helicoidal se destacó como el más eficiente en 4 de las 6 pruebas realizadas: harina en seco, harina con agua, arena con agua y gravilla fina en seco. Este rendimiento superior en la mayoría de las pruebas confirma la adaptabilidad del diseño helicoidal, el cual ofrece una limpieza efectiva tanto en condiciones secas como húmedas, y con suciedad de diferentes tamaños y características.

El comportamiento sobresaliente del patrón helicoidal puede explicarse por varios factores:

- **Distribución uniforme de cerdas:** El diseño helicoidal permite que las cerdas mantengan un contacto constante y cubra uniformemente la superficie, evitando zonas sin limpieza y reduciendo la acumulación de suciedad en el propio cepillo.
- **Optimización del contacto con la superficie:** La geometría helicoidal se adapta bien a superficies con suciedad adherida o irregular, asegurando la presión adecuada para la remoción de partículas grandes y pequeñas.
- **Adaptabilidad a condiciones húmedas:** El diseño facilita un arrastre eficaz tanto en seco como en húmedo, lo cual es crucial para condiciones de suciedad adherida o acumulada.

En resumen, el cepillo helicoidal ha demostrado ser la mejor opción para optimizar la limpieza de los paneles solares, ya que su diseño permite una limpieza más uniforme y efectiva en diversos entornos ambientales. Esto respalda su selección como el cepillo ideal, pues su capacidad para adaptarse a condiciones variables garantiza un mantenimiento eficaz de los paneles, mejorando la eficiencia operativa del sistema de limpieza.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS DE CERDAS

El presente capítulo explora las pruebas específicas realizadas sobre los tipos de cerdas seleccionadas para el cepillo, evaluando factores como resistencia, durabilidad y flexibilidad en condiciones operativas variables. Este análisis tiene como objetivo determinar el equilibrio óptimo entre suavidad y rigidez de las cerdas, asegurando una limpieza efectiva que minimice el riesgo de daño a la superficie de los paneles solares

5.1. CÁLCULOS Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO

Tras la interpretación de resultados, hemos seleccionado los cepillos de patrón helicoidal como los más efectivos para la limpieza de paneles solares en las condiciones evaluadas. Con este diseño, procederemos a realizar una nueva serie de pruebas con dos cepillos adicionales que mantienen el patrón helicoidal, pero que varían en el tamaño de sus fibras: uno con fibras de 0.45 milímetros y otro con fibras de 0.35 milímetros, formando cerdas de distintos grosores.

Los cálculos para la construcción de estos nuevos cepillos seguirán los mismos parámetros empleados en la fabricación del primer cepillo helicoidal, exceptuando el tamaño de las fibras y el diámetro de las cerdas, que estarán adaptados a las nuevas especificaciones. El objetivo de estas pruebas es determinar cuál de los dos tamaños de fibras optimiza mejor el rendimiento del patrón helicoidal, maximizando la eficacia de limpieza. A través de este análisis comparativo, buscamos identificar el cepillo más adecuado para su uso en aplicaciones prácticas, asegurando una limpieza eficiente y confiable en los paneles solares.

5.1.1. Cálculos Prototipo Cerdas – 0.35mm

Datos a tener en cuenta:

- Longitud de uso del eje = 763mm
- Longitud total del eje = 800mm
- Longitud de cerdas = 100mm
- Diámetro del eje = 24mm
- Peso eje y cerdas = 0.65kg

- **Número de Agujeros**

Longitud total del eje (palo de escoba): L= 763 mm

Para calcular el número de agujeros (N) a lo largo del eje, podemos usar la fórmula:

$$N \approx \frac{L}{\text{distancia deseada entre agujeros}}$$

$$N \approx \frac{763\text{mm}}{6\text{mm}} \approx 127 \text{ agujeros}$$

(32)

Aproximadamente 127 agujeros a lo largo del eje.

Plantenberg, K. Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución de Elementos Lineales).

- **Resistencia del Eje (Esfuerzo de Flexión)**

Para calcular la resistencia del eje, consideraremos el momento de flexión, ya que el eje soportará el peso del cepillo y la presión aplicada durante la limpieza.

Datos necesarios:

- Material: Palo de escoba
- Diámetro del eje: $d=24\text{mm} \rightarrow 0.024\text{m}$
- Longitud del eje: $L=800\text{ mm} \rightarrow 0.8\text{m}$
- Peso del cepillo y el eje: $m=0.65\text{ kg}$
- Fuerza (Peso):

$$F = (m)(g)$$

$$F = (0.65\text{Kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})$$

$$F = 6.37\text{N}$$

(33)

- **Cálculo del Momento de Flexión Máximo (M):**

Asumimos que la fuerza se aplica en el centro del eje, por lo tanto:

$$M = \frac{(F)(L)}{4}$$

Sustituyendo los valores:

$$M = \frac{(6.37\text{N})(0.8\text{m})}{4} \rightarrow M = 1.27\text{Nm}$$

(34)

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 251, capítulo 6 (Análisis de Flexión en Vigas).

- **Calcular la distancia máxima al eje neutro (c)**

Para un eje circular, la distancia máxima al eje neutro c es la mitad del diámetro del eje:

$$c = \frac{d}{2}$$

$$c = \frac{0.024m}{2}$$

$$c = 0.012m$$

(35)

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 246, capítulo 5 (Flexión en Ejes).

- **Momento de inercia (I):**

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi(0.024m)^4}{64} = 1.62 \times 10^{-8} m^4$$

(36)

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 267, capítulo 6 (Propiedades Geométricas de Secciones).

- **Esfuerzo de Flexión (σ):**

$$\sigma = \frac{(M)(c)}{I}$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{(1.27Nm)(0.012m)}{1.62 \times 10^{-8} m^4} \approx 944.66 KPa$$

(37)

Resultado: La resistencia del eje es aproximadamente $799.3 KPa$, lo cual es seguro para madera bajo estas condiciones de carga.

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 231, capítulo 5 (Esfuerzos por Flexión).

- **Distancia entre Agujeros**

Longitud total del eje $L = 763 mm$

Número de agujeros deseado $N = 127$

$$d = \frac{L}{N} = \frac{763 mm}{127} \approx 6 mm$$

(38)

La distancia entre agujeros sería aproximadamente $6 mm$.

Plantenberg, K., Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución Lineal en Geometría Mecánica).

- **Paso de Hélice (P)**

Con 2 pasos de hélice en una longitud de 763 mm, podemos calcular el paso de la hélice (P) como la distancia total dividida entre el número de pasos:

$$P = \frac{L}{\text{número de pasos}} = \frac{763mm}{2} = 381.5mm$$

(39)

El paso de la hélice es de 381.5 mm.

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Resortes Helicoidales y Hélices).

- **Ángulo de Inclinación de la Hélice (θ):**

Para determinar el ángulo de inclinación (θ), utilizamos la fórmula:

$$\theta = \arctan \left(\frac{P}{\pi d} \right)$$

donde P = 381.5 mm y d = 24 mm

Sustituyendo:

$$\theta = \arctan \left(\frac{381.5mm}{(\pi)(24mm)} \right)$$

$$\theta \approx \arctan \left(\frac{381.5}{75.4} \right) \rightarrow \arctan (5.1) \approx 78.82^\circ$$

(40)

El ángulo de inclinación de la hélice es aproximadamente de 78.82 grados.

Budynas, R.G. y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Geometría de Hélices y Ángulos de Inclinación).

- **Ángulo De Separación**

El ángulo de separación entre cada hélice alrededor de la circunferencia. Este ángulo de separación se calcula como:

$$\text{Ángulo de Separación} = \frac{360^\circ}{\text{Numero de helices}} \rightarrow \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

(41)

Las 6 hélices estarán separadas por un ángulo de 60 grados alrededor del eje, lo que permite una distribución uniforme de las cerdas.

Mott, Robert L., Machine Elements in Mechanical Design, 6th Edition, Pearson, 2017, página 259, capítulo 7 (Técnicas de fijación, unión y conexión).

- **Distancia entre hélices**

$$D_v = \frac{d}{N}$$

$$D_v = \frac{24mm}{6}$$

$$D_v = 4mm$$

(42)

Esta es la distancia entre cada hélice en el sentido vertical, o radial sobre el diámetro del eje.

Muvdi, B.B., y McNabb, J.W., Engineering Mechanics of Materials, 3rd Edition, Springer, 2012, página 312, capítulo 7 (Distribución en Hélices y Elementos Helicoidales).

- **Protuberancia de las cerdas**

Longitud total de cada filamento de cerda: $L=100\text{ mm}$

Diámetro del eje: $d=24\text{mm}$

La protuberancia efectiva de las cerdas se calcula como la longitud que sobresale del eje:

$$L_c = L - \frac{D}{2}$$

Sustituyendo:

$$L_c = 100\text{mm} - \frac{24\text{mm}}{2} \rightarrow 100\text{mm} - 12\text{mm} = 88\text{mm}$$

(43)

La protuberancia de las cerdas es de aproximadamente 88 mm.

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 320, capítulo 5 (Componentes Sobresalientes en Ejes)

- **Cálculos Prototipo Cerdas – 0.45mm**

Datos a tener en cuenta:

- Longitud de uso del eje = 763mm
- Longitud total del eje = 800mm
- Longitud de cerdas = 100 mm
- Diámetro del eje = 24mm
- Peso eje y cerdas = 0.75kg

- **Número de Agujeros**

Longitud total del eje (palo de escoba): L= 763 mm

Para calcular el número de agujeros (N) a lo largo del eje, podemos usar la fórmula:

$$N \approx \frac{L}{\text{distancia deseada entre agujeros}}$$

$$N \approx \frac{763\text{mm}}{6\text{mm}} \approx 127 \text{ agujeros}$$

(44)

Aproximadamente 127 agujeros a lo largo del eje.

Plantenberg, K. Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución de Elementos Lineales).

- **Resistencia del Eje (Esfuerzo de Flexión)**

Para calcular la resistencia del eje, consideraremos el momento de flexión, ya que el eje soportará el peso del cepillo y la presión aplicada durante la limpieza.

Datos necesarios:

- Material: Palo de escoba
- Diámetro del eje: d=24mm → 0.024m
- Longitud del eje: L=800 mm→ 0.8m
- Peso del cepillo y el eje: m=0.75 kg
- Fuerza (Peso):

$$F = (m)(g)$$

$$F = (0.75Kg)(9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$F = 7.36N$$

(45)

- **Cálculo del Momento de Flexión Máximo (M):**

Asumimos que la fuerza se aplica en el centro del eje, por lo tanto:

$$M = \frac{(F)(L)}{4}$$

Sustituyendo los valores:

$$M = \frac{(7.36N)(0.8m)}{4} \rightarrow M = 1.472Nm$$

(46)

Gere, J.M., *Mechanics of Materials*, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 251, capítulo 6 (Análisis de Flexión en Vigas).

- **Calcular la distancia máxima al eje neutro (c)**

Para un eje circular, la distancia máxima al eje neutro c es la mitad del diámetro del eje:

$$c = \frac{d}{2}$$

$$c = \frac{0.024m}{2}$$

$$c = 0.012m$$

(47)

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 246, capítulo 5 (Flexión en Ejes).

- **Momento de inercia (I):**

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi(0.024m)^4}{64} = 1.62 \times 10^{-8} m^4$$

(48)

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 267, capítulo 6 (Propiedades Geométricas de Secciones).

- **Esfuerzo de Flexión (σ):**

$$\sigma = \frac{(M)(c)}{I}$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{(1.472Nm)(0.012m)}{1.62 \times 10^{-8} m^4} \approx 1.09 MPa$$

(49)

Resultado: La resistencia del eje es aproximadamente $1.09 MPa$, lo cual es seguro para madera bajo estas condiciones de carga.

Gere, J.M., Mechanics of Materials, 8th Edition, Cengage Learning, 2013, página 231, capítulo 5 (Esfuerzos por Flexión).

- **Distancia entre Agujeros**

Longitud total del eje $L = 763\text{mm}$

Número de agujeros deseado $N = 127$

$$d = \frac{L}{N} = \frac{763\text{ mm}}{127} \approx 6\text{mm}$$

(50)

La distancia entre agujeros sería aproximadamente 6mm.

Plantenberg, K., Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución Lineal en Geometría Mecánica).

- **Paso de Hélice (P)**

Con 2 pasos de hélice en una longitud de 763 mm, podemos calcular el paso de la hélice (P) como la distancia total dividida entre el número de pasos:

$$P = \frac{L}{\text{número de pasos}} = \frac{763\text{mm}}{2} = 381.5\text{mm}$$

(51)

El paso de la hélice es de 381.5 mm.

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Resortes Helicoidales y Hélices).

- **Ángulo de Inclinación de la Hélice (θ):**

Para determinar el ángulo de inclinación (θ), utilizamos la fórmula:

$$\theta = \arctan \left(\frac{P}{\pi d} \right)$$

donde $P = 381.5 \text{ mm}$ y $d = 24 \text{ mm}$

Sustituyendo:

$$\theta = \arctan \left(\frac{381.5 \text{ mm}}{(\pi)(24 \text{ mm})} \right)$$

$$\theta \approx \arctan \left(\frac{381.5}{75.4} \right) \rightarrow \arctan (5.1) \approx 78.82^\circ$$

(52)

El ángulo de inclinación de la hélice es aproximadamente de 78.82 grados.

Budynas, R.G. y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Geometría de Hélices y Ángulos de Inclinación).

- **Ángulo De Separación**

El ángulo de separación entre cada hélice alrededor de la circunferencia. Este ángulo de separación se calcula como:

$$\text{Ángulo de Separación} = \frac{360^\circ}{\text{Numero de helices}} \rightarrow \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

(53)

Las 6 hélices estarán separadas por un ángulo de 60 grados alrededor del eje, lo que permite una distribución uniforme de las cerdas.

Mott, Robert L., *Machine Elements in Mechanical Design, 6th Edition, Pearson, 2017, página 259, capítulo 7 (Técnicas de fijación, unión y conexión).*

- **Distancia entre hélices**

$$D_v = \frac{d}{N}$$

$$D_v = \frac{24mm}{6}$$

$$D_v = 4mm$$

(54)

Esta es la distancia entre cada hélice en el sentido vertical, o radial sobre el diámetro del eje.

Muvdi, B.B., y McNabb, J.W., *Engineering Mechanics of Materials, 3rd Edition, Springer, 2012, página 312, capítulo 7 (Distribución en Hélices y Elementos Helicoidales).*

- **Protuberancia de las cerdas**

Longitud total de cada filamento de cerda: L=100 mm

Diámetro del eje: d=24mm

La protuberancia efectiva de las cerdas se calcula como la longitud que sobresale del eje:

$$L_c = L - \frac{D}{2}$$

Sustituyendo:

$$L_c = 100mm - \frac{24mm}{2} \rightarrow 100mm - 12mm = 88mm$$

(55)

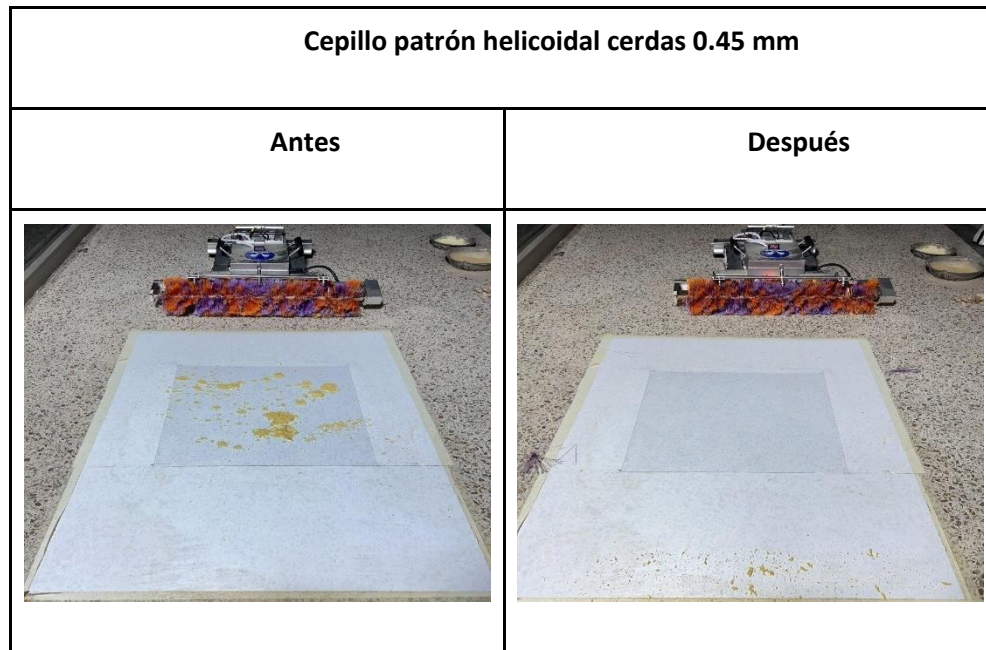
La protuberancia de las cerdas es de aproximadamente 88 mm.

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 320, capítulo 5 (Componentes Sobresalientes en Ejes)

5.2. PRUEBAS PROTOTIPO CERDAS

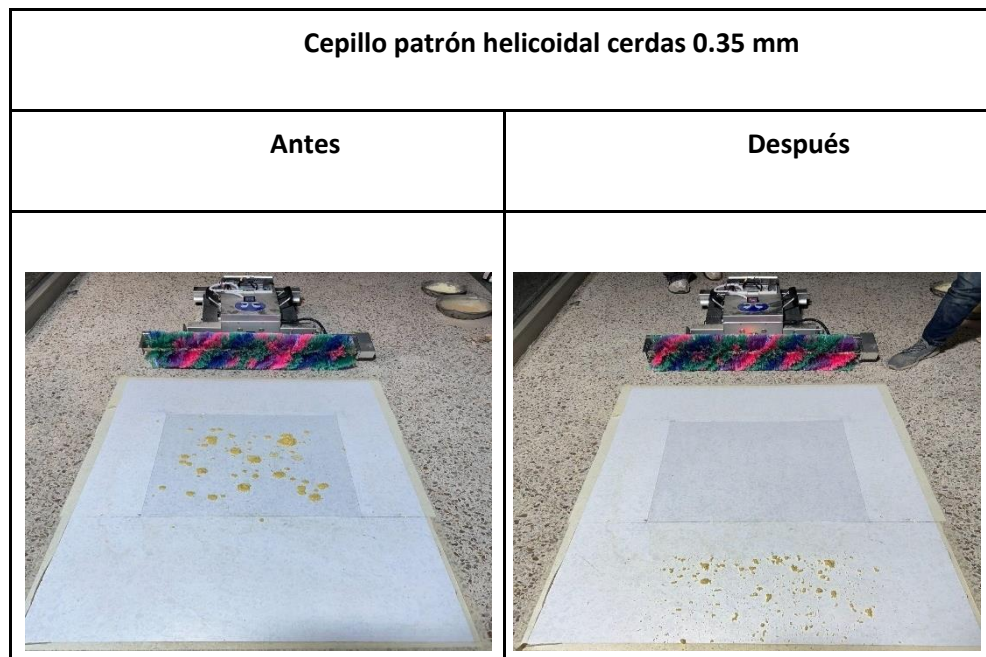
A continuación, se procederá a realizar las pruebas de los dos cepillos helicoidales, pero en esta ocasión, se utilizará únicamente una mezcla de harina y agua. El objetivo de estas pruebas es evaluar la dureza de las cerdas y la efectividad de limpieza de cada cepillo en condiciones específicas. La mezcla de harina y agua simula una suciedad húmeda, permitiendo observar cómo las cerdas de cada cepillo interactúan con materiales pegajosos que podrían representar tipos de suciedad común en exteriores, como el barro o el excremento de aves. Esta fase es crucial para determinar la resistencia de las cerdas bajo condiciones más exigentes, asegurando que los cepillos no solo sean efectivos en seco, sino también en escenarios de suciedad más adherente.

Ilustración 22



Fuente. Propia

Ilustración 23

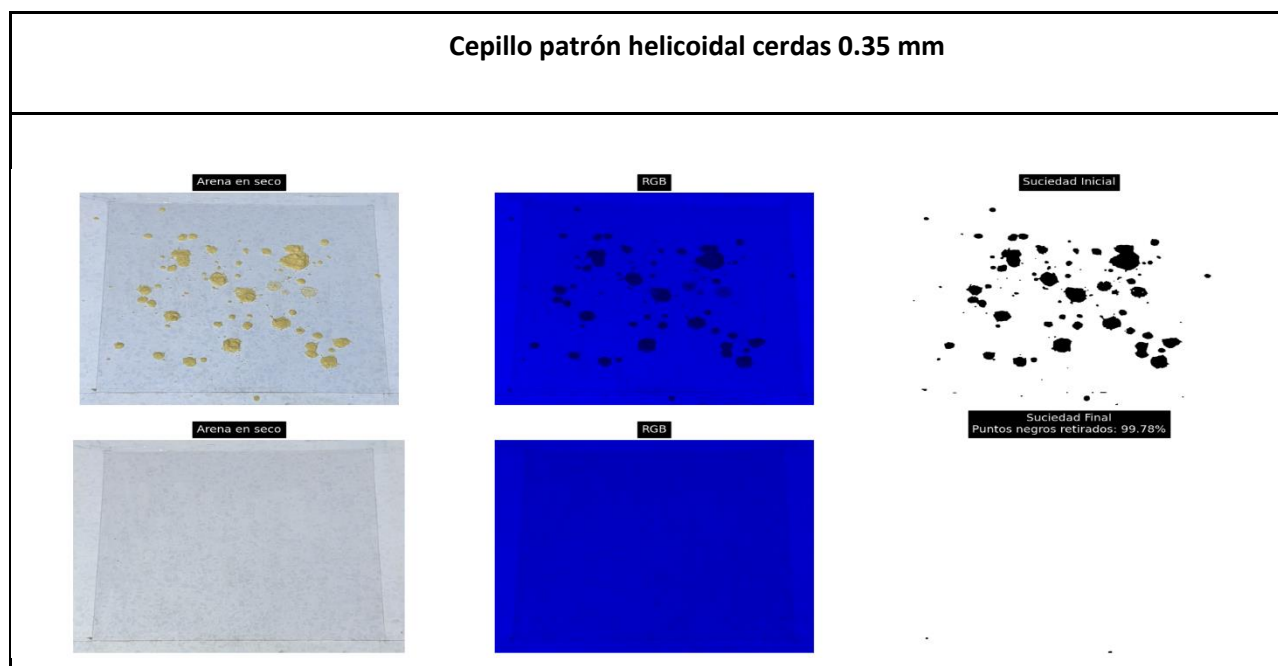


Fuente. Propia

5.3. ANÁLISIS DE PRUEBAS

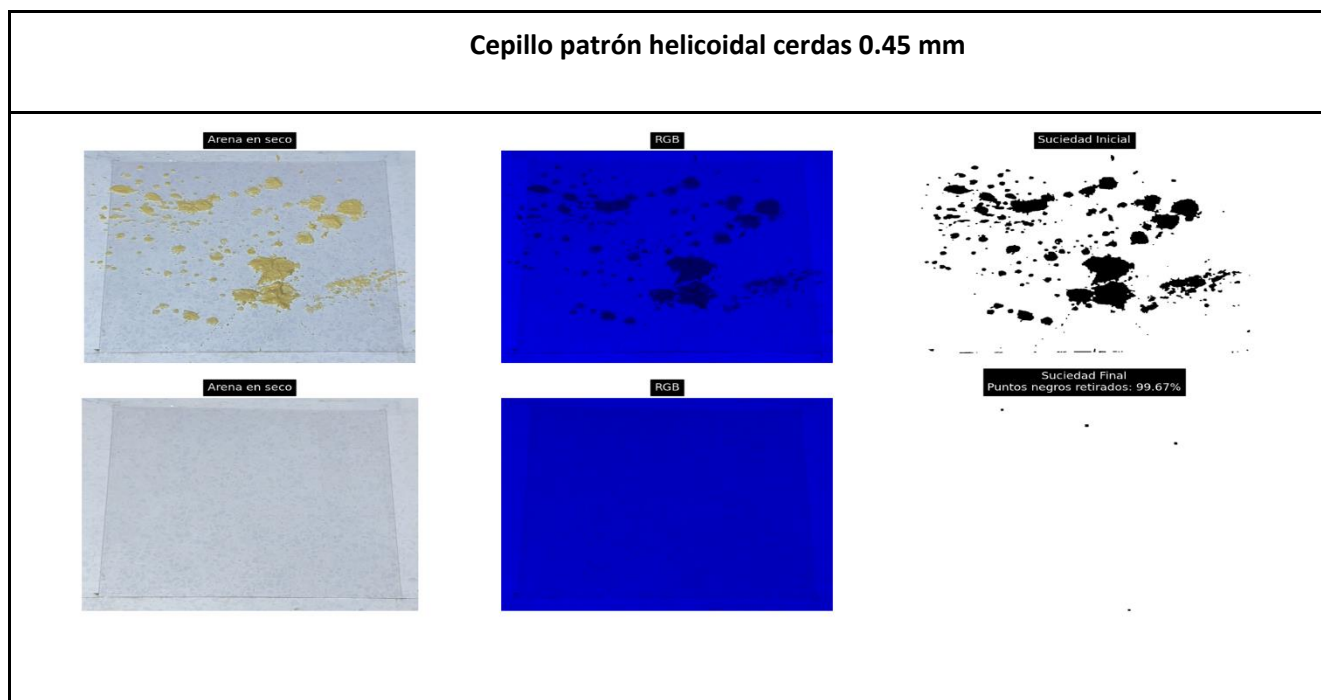
Las pruebas realizadas con los cepillos helicoidales serán sometidas a un análisis detallado mediante el procesamiento de imágenes, tal como se explicó anteriormente. Utilizando técnicas de procesamiento con la librería OpenCV en Python, se analizarán las imágenes tomadas antes y después de la limpieza para obtener porcentajes de suciedad, los cuales nos permitirán evaluar la efectividad de los cepillos en la eliminación de los materiales aplicados. Este análisis nos proporcionará una comparación precisa del desempeño de cada cepillo, ayudando a determinar cuál ofrece una mayor eficiencia en la limpieza de los paneles solares en las condiciones de prueba previamente mencionadas.

Ilustración 24



Fuente. *Propia*

Ilustración 25



Fuente. Propia

5.4.INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Tabla 12

Cepillo	Suciedad inicial (%)	Suciedad removida	Eficiencia
Cepillo Cerdas 0,35mm	100	99,78	99,78
Cepillo Cerdas 0,45mm	100	99,67	99,67

Fuente. Propia

Tabla 13

	Harina
Cepillo Cerdas 0,35mm	99,78
Cepillo Cerdas 0,45mm	99,67

Fuente. Propia

Al analizar los resultados de las pruebas de limpieza con cerdas de diámetros 0.35 mm y 0.45 mm, se observa que ambos tipos de fibra alcanzan una eficiencia de remoción de suciedad muy alta (99.78% para 0.35 mm y 99.67% para 0.45 mm). Esto indica que, en términos de efectividad, ambos diámetros cumplen bien con su propósito de limpieza sobre los paneles solares.

Sin embargo, al considerar la eficiencia de limpieza en escenarios de uso real, el diámetro de 0.45 mm muestra ciertas ventajas. Su mayor grosor permite un contacto más firme y estable con la superficie, lo que facilita la eliminación de partículas de suciedad más adheridas y de mayor tamaño sin afectar el desempeño del cepillo. Este calibre de fibra no solo elimina de forma efectiva las partículas visibles, sino que también reduce la necesidad de múltiples pasadas, optimizando así el tiempo y el esfuerzo necesario para completar la limpieza.

Además, el diámetro de 0.45 mm proporciona una mayor resistencia mecánica, permitiendo que las cerdas mantengan su forma y rigidez durante más tiempo, lo cual es crucial para mantener una limpieza consistente a lo largo de su uso. Esto significa que, en condiciones donde la suciedad es más resistente o donde se requiere una limpieza rápida y eficaz, el calibre de 0.45 mm logra una limpieza completa con menos esfuerzo y mayor rapidez, contribuyendo así a una eficiencia superior en el mantenimiento de los paneles solares.

En conclusión, aunque ambos calibres demuestran una alta efectividad en la remoción de suciedad, el diámetro de 0.45 mm resulta ser más eficiente al optimizar el proceso de limpieza, permitiendo un resultado consistente y eficaz en menos tiempo y con menos esfuerzo. Por lo tanto, la fibra de 0.45 mm es la más óptima para el diseño del cepillo final.

6. DISEÑO FINAL

El presente capítulo expone el diseño final del cepillo, fundamentado en los resultados de las pruebas de patrones y tipos de cerdas. Se describen las características estructurales, los materiales seleccionados y los ajustes técnicos que optimizan el rendimiento de limpieza, asegurando la compatibilidad con el sistema de control del robot Kwunphi. Además, se presentan los cálculos y simulaciones que garantizan la durabilidad y efectividad del cepillo bajo condiciones operativas reales.

6.1. CÁLCULOS Y CARACTERÍSTICAS

En esta sección se presentan los cálculos y especificaciones técnicas del diseño final del cepillo para el robot Kwunphi. Se detallan las características clave del eje, la base y las cerdas, considerando aspectos como el peso, los materiales seleccionados y las dimensiones optimizadas. Estos cálculos permiten garantizar un equilibrio entre eficiencia de limpieza, durabilidad y compatibilidad con el sistema robótico, asegurando un desempeño superior bajo condiciones operativas reales.

6.1.1. Materiales del Eje

Tabla 14

I	Resistencia a la corrosión	Dureza (Rockwell)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Densidad (g/cm ³)	Aplicaciones típicas
Acero Inoxidable 316	Alta	79	205	515	7.99	Entornos marinos, equipos médicos, industria química
Acero Inoxidable 304	Alta	70	215	505	8.00	Alimentación, equipos domésticos, intercambiadores de calor
Acero al Carbono	Baja	55-60	250	400	7.85	Piezas estructurales, ejes en maquinaria pesada
Acero 4140 (aleado)	Moderada	95	655	950	7.85	Ejes de alta resistencia, herramientas, componentes automotrices
Aluminio 6061	Baja	40	275	310	2.70	Ejes ligeros, estructuras aeronáuticas, marcos de bicicletas
Titanio (Ti-6Al-4V)	Muy alta	36-38	830	895	4.43	Ejes en aviación, implantes médicos, aplicaciones de alta resistencia y bajo peso

Fuente. Propia

El acero inoxidable 316 es superior para ejes debido a su alta resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes agresivos como el marino o químico. Contiene molibdeno, lo que le permite resistir mejor la oxidación y mantener su integridad estructural en temperaturas elevadas. Aunque más costoso, su durabilidad y baja necesidad de mantenimiento lo hacen ideal para aplicaciones exigentes, asegurando un rendimiento fiable a largo plazo.

6.1.2. Materiales de la Base

Tabla 15

Material	Resistencia a la temperatura	Resistencia a la abrasión	Resistencia química	Densidad (g/cm ³)	Aplicaciones típicas
Poliamida 6.6	Alta (hasta 150°C)	Muy buena	Buena	1.14	Componentes automotrices, bases de ejes, engranajes
Poliamida 6 (Nylon 6)	Media (hasta 120°C)	Buena	Buena	1.13	Piezas ligeras, componentes de bajo costo
Polietileno (PE)	Baja (hasta 80°C)	Buena	Muy buena	0.94	Contenedores, piezas de baja resistencia
Polipropileno (PP)	Baja (hasta 100°C)	Buena	Excelente	0.90	Componentes de uso general, piezas económicas
Acetal (POM)	Alta (hasta 120°C)	Muy buena	Buena	1.41	Engranajes, rodamientos, piezas mecánicas de precisión

Fuente. Propia

La Poliamida 6.6 es la elección ideal para la base de un eje debido a su excelente resistencia a la temperatura y la abrasión. Su capacidad para soportar temperaturas más altas que otros plásticos, como el Nylon 6, junto con su durabilidad frente al desgaste y su buena resistencia química, la convierte en una opción confiable para aplicaciones exigentes. Esto asegura una vida útil prolongada y un rendimiento constante en condiciones de trabajo severas.

6.1.3. Cálculos

En esta sección se desarrollan los cálculos necesarios para el diseño y la evaluación del cepillo optimizado. Se abordan aspectos como la resistencia de los materiales, la distribución de cerdas, el peso total del cepillo y su impacto en el desempeño del robot Kwunphi. Estos cálculos son fundamentales para validar las decisiones de diseño, asegurando que el cepillo cumpla con los requisitos de limpieza eficiente, protección de los paneles solares y compatibilidad con el sistema existente.

6.1.3.1. Cálculos Mecánicos

En el presente análisis, se realizarán tanto los cálculos teóricos como las simulaciones exclusivamente en relación con el eje núcleo del cepillo helicoidal. Esta decisión responde a la función estructural que desempeña el eje núcleo, ya que es el componente responsable de soportar la totalidad de las cargas aplicadas durante la operación del cepillo.

El recubrimiento externo, aunque forma parte de la estructura completa del cepillo, no contribuye significativamente a la capacidad de soporte de carga. Su función principal es la de proporcionar un soporte para las cerdas y proteger el núcleo de factores externos, pero no está diseñado para absorber las tensiones generadas por las fuerzas de flexión, torsión o cargas axiales que ocurren en la operación.

De este modo, centrar el análisis en el eje núcleo permite evaluar con mayor precisión la resistencia y seguridad del componente que soporta las condiciones de carga. Los cálculos teóricos y las simulaciones aplicados al eje núcleo brindarán una visión clara y específica de cómo responderá el diseño en su conjunto frente a las fuerzas que actúan sobre él, asegurando que el cepillo cumple con los requisitos estructurales para una operación confiable y eficiente.

6.1.3.2. Cálculos de Peso

Materiales:

- Acero AISI 316
- Nylon 6.6
- Cerdas Nylon 6 de 0.45mm

Eje hueco de Acero AISI 316

- Longitud del eje, $L = 800\text{mm} = 0.8\text{m}$
- Diámetro externo, $d_{\text{externo}} = 15.5\text{mm} = 0.0155\text{m}$
- Diámetro interno, $d_{\text{interno}} = 10.3\text{mm} = 0.0103\text{m}$
- Densidad del Acero AISI 316, $\rho_{\text{acero}} = 8000\text{ kg/m}^3$

Fórmula para el volumen de un cilindro hueco:

$$V_{\text{eje}} = \left(\pi \left(\frac{d_{\text{externo}}}{2} \right)^2 \right) (L) - \left(\pi \left(\frac{d_{\text{interno}}}{2} \right)^2 \right) (L)$$

$$V_{\text{eje}} = \left(\pi \left(\frac{0.0155\text{m}}{2} \right)^2 \right) (0.8\text{m}) - \left(\pi \left(\frac{0.0103\text{m}}{2} \right)^2 \right) (0.8\text{m})$$

$$V_{\text{eje}} = 8.43 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

(56)

Engineering Mechanics: Dynamics, de J.L. Meriam y L.G. Kraige, en el Capítulo 2: Kinematics of Particles, página 55.

- **Peso del eje hueco:**

$$P_{\text{eje}} = (V_{\text{eje}})(\rho_{\text{acero}})$$

$$P_{\text{eje}} = (8.43 \times 10^{-5} \text{m}^3) \left(8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_{eje} = 0.67kg$$

(57)

Fundamentals of Engineering Thermodynamics, escrito por Richard E. Sonntag y Claus Borgnakke, en el Capítulo 1: Introduction and Basic Concepts, página 24.

- **Recubrimiento de Poliamida 6.6**

- Longitud del eje, $L_{recubrimiento} = 763mm = 0.763m$
- Diámetro externo con recubrimiento, $d_{total} = 45mm = 0.045m$
- Diámetro del núcleo de acero, $d_{eje} = 15.5mm = 0.0155m$
- Densidad de la poliamida 6.6, $\rho_{poliamida\ 6.6} = 1140\ kg/m^3$

Fórmula para el volumen del recubrimiento:

$$V_{recubrimiento} = \left(\pi \left(\frac{d_{total}}{2}\right)^2\right)(L_{recubrimiento} - \pi \left(\frac{d_{eje}}{2}\right)^2)(L_{recubrimiento})$$

$$V_{recubrimiento} = \left(\pi \left(\frac{0.045m}{2}\right)^2\right)(0.763m - \pi \left(\frac{0.0155m}{2}\right)^2)(0.763m)$$

$$V_{recubrimiento} = 1.07 \times 10^{-3} m^3$$

(58)

Engineering Mechanics: Dynamics, de J.L. Meriam y L.G. Kraige, en el Capítulo 2: Kinematics of Particles, página 55

$$P_{recubrimiento} = (V_{recubrimiento})(\rho_{poliamida\ 6.6})$$

$$P_{recubrimiento} = (1.07 \times 10^{-3} m^3)(1140 \frac{kg}{m^3})$$

$$P_{recubrimiento} = 1.22kg$$

(59)

Fundamentals of Engineering Thermodynamics, escrito por Richard E. Sonntag y Claus Borgnakke, en el Capítulo 1: Introduction and Basic Concepts, página 24.

- **Cerdas de Poliamida 6**

- Longitud de cada fibra, $L_{fibra} = 100mm = 0.1m$
- Diámetro de cada fibra, $d_{fibra} = 0.45mm = 0.00045m$
- Densidad de la poliamida 6, $\rho_{poliamida\ 6} = 1140\ kg/m^3$
- Número total de fibras, $= 60 \times 127 \times 8 = 60960$

Fórmula para el volumen de una fibra:

$$V_{fibra} = \left(\pi \left(\frac{d_{fibra}}{2}\right)^2\right)(L_{fibra})$$

$$V_{fibra} = \left(\pi \left(\frac{0.00045m}{2}\right)^2\right)(0.1m)$$

$$V_{fibra} = 1.6 \times 10^{-8} m^3$$

(60)

Engineering Mechanics: Dynamics, de J.L. Meriam y L.G. Kraige, en el Capítulo 2: Kinematics of Particles, página 55

$$P_{fibra} = (V_{fibra})(\rho_{poliamida\ 6})$$

$$P_{fibra} = (1.6 \times 10^{-8} m^3) \left(1140 \frac{kg}{m^3}\right)$$

$$P_{fibra} = 1.6 \times 10^{-8} kg$$

$$P_{total\ cerdas} = (P_{fibra})(60960)$$

$$P_{total\ cerdas} = 1.10kg$$

(61)

Fundamentals of Engineering Thermodynamics, de Richard E. Sonntag y Claus Borgnakke, en el Capítulo 1: Introduction and Basic Concepts, página 24.

- **Peso Total del Cepillo**

Sumamos los pesos de cada componente:

$$P_{total\ cepillo} = P_{eje} + P_{recubrimiento} + P_{total\ cerdas}$$

$$P_{total\ cepillo} = 0.67kg + 1.22kg + 1.10kg$$

$$P_{total\ cepillo} \approx 2.99$$

$$P_{total\ cepillo} = 3kg$$

(62)

- **Factor de tolerancia**

Ahora se aplica un factor de tolerancia al peso, el cual será el 10% para asegurar que cualquier variación inesperada está cubierta.

Para calcular el peso con este margen sería:

$$(0.1)(3kg) = 0.3kg$$

$$3kg + 0.3kg = 3.3kg$$

(63)

El peso con un 10% adicional es de 3.3kg

6.1.3.3. Cálculos Mecánicos

- **Carga sobre área**

$$F_{axial} = (m)(g)$$

Con esta fórmula, estamos multiplicando la masa de la carga por la aceleración gravitacional para obtener la carga sobre área.

Donde:

- $m = 3.3kg$ (masa de la carga)
- $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ (aceleración debida a la gravedad)

$$F_{axial} = (3.30Kg)(9.81 \frac{m}{s^2}) = 32.4N$$

(64)

Ahora que tenemos el resultado de la Ec.64, podemos utilizar este valor en el siguiente paso para calcular el momento flexionante.

Budynas, Richard G., y Nisbett, J. Keith. Shigley's Mechanical Engineering Design, 10.^a edición, McGraw-Hill, 2015, página 152, capítulo 3 (Esfuerzo, deformación y deformación de sólidos).

- **Momento flexionante**

$$M = (P)(L)$$

- P es la carga axial (32.4N)
- L es la longitud de la barra (800mm = 0.8m)

En este caso, el momento flexionante es:

$$M = (32.4N)(0.8m)$$

$$M = 26Nm$$

(65)

Con el resultado de la Ec.65, podemos proceder a calcular la fuerza sobre área en el siguiente paso.

- **Fuerza sobre área**

$$\sigma_{axial} = \frac{F_{axial}}{A}$$

Donde A es el área de la sección transversal de la barra. Para una barra cilíndrica hueca, el área A se calcula como:

$$A = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)$$

Donde:

- $r_{ext} = \frac{d_{ext}}{2} = \frac{15.5mm}{2} = 7.75mm = 0.00775m$
- $r_{int} = \frac{d_{int}}{2} = \frac{10.3mm}{2} = 5.15mm = 0.00515m$

El área será:

$$A = \pi((0.00775)^2 - (0.00515)^2)$$

$$A = 1.052 \times 10^{-4} m^2$$

(66)

$$\sigma_{axial} = \frac{32.4N}{1.052 \times 10^{-4} m^2} = 307984.79Pa = 0.308MPa$$

(67)

Con el resultado de la Ec.67, es útil para calcular las tensiones combinadas mediante el criterio de Von Mises, que veremos más adelante.

Gere, J.M., & Timoshenko, S.P., Mechanics of Materials, 5th Edition, Brooks/Cole Engineering, 1999, página 24, capítulo 1 (Carga Axial y Tensión Normal).

- **Esfuerzo de flexión**

$$\sigma_{flexión} = \frac{(M)(Y)}{I}$$

- M es el momento flector (26Nm)
- Y es la distancia desde el eje neutro al punto más alejado (en este caso, el radio externo de la barra $Y = r_{ext} = 0.00775m$).
- I es el momento de inercia de la sección transversal para una barra hueca, que se calcula:

$$I = \frac{\pi}{64} (d_{ext}^4 - d_{int}^4)$$

Sustituyendo los valores:

$$I = \frac{\pi}{64} ((15.5mm)^4 - (10.3mm)^4)$$

$$I = 2.51 \times 10^{-8} m^4$$

(68)

Ahora si tensión de flexión:

$$\sigma_{flexión} = \frac{(26Nm)(0.00775m)}{2.51 \times 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_{flexión} = 8.03 MPa$$

(69)

Con el resultado de la Ec.69, ahora podemos calcular la tensión de Von Mises para analizar la resistencia combinada de la estructura.

Beer, F.P., & Johnston, E.R., Mechanics of Materials, 4th Edition, McGraw-Hill, 2001, página 265, capítulo 5 (Tensión de Flexión en Vigas).

- **Esfuerzo cortante por torsión**

El esfuerzo cortante por torsión máxima en una barra redonda hueca está dada por:

$$\tau_{torsión} = \frac{(T)(r_{ext})}{J}$$

Donde:

- T es el momento torsor (4.3Nm)
- $r_{ext} = 0.00775m$
- J es el momento polar de inercia para una barra hueca, que se calcula como:

$$J = \frac{\pi}{2}(r_{ext}^4 - r_{int}^4)$$

$$J = \frac{\pi}{2}((0.00775)^4 - (0.00515)^4)$$

$$J = 1.4 \times 10^{-8} m^4$$

(70)

- **Esfuerzo cortante por torsión**

$$\tau_{torsión} = \frac{(4.3Nm)(0.00775m)}{1.4 \times 10^{-8} m^4}$$

$$\tau_{torsión} = 2.38 MPa$$

(71)

Con el resultado de la Ec.71, el cual será utilizado en el siguiente paso para determinar la tensión de Von Mises, que evalúa la resistencia total del material bajo cargas combinadas.

Hibbeler, R.C., Mechanics of Materials, 9th Edition, Pearson, 2014, página 314, capítulo 6 (Torsión en Ejes Circulares).

- **Tensión De Von Mises:**

- $\sigma_x = \sigma_{axial} = 0.308 \text{ MPa}$
- $\sigma_y = \sigma_{flexión} = 8.03 \text{ MPa}$
- $\tau_{xy} = \tau_{torsión} = 2.38 \text{ MPa}$

La tensión de Von Mises es:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{axial}^2 + \sigma_{flexión}^2 + 3 \cdot \tau_{torsión}^2}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(0.308)^2 + (8.03)^2 + 3 \cdot (2.38)^2}$$

$$\sigma_{VM} = 9.03 \text{ MPa}$$

(72)

Con el resultado de la Ec.72, podemos analizar si el material es seguro para operar bajo las condiciones de carga establecidas usando el Factor de Seguridad, que calcularemos en el siguiente paso.

Budynas, Richard G., y Nisbett, J. Keith. Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 193, capítulo 4 (Failure Theories).

- **Factor De Seguridad**

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}}$$

Donde:

- σ_y es el límite de elasticidad o a la tensión máxima admisible del material, (más conocido como tensión de fluencia).
- $\sigma_{VM} = 6.67 \text{ MPa}$

El valor para el acero inoxidable AISI 316, es de 215MPa

$$FoS = \frac{215 \text{ MPa}}{9.03 \text{ MPa}} = 23.81$$

(73)

El resultado de la Ec.73 indica que el diseño es seguro y puede soportar las cargas aplicadas sin exceder el límite elástico del material. Sin embargo, para situaciones donde haya cargas cíclicas, es importante analizar también el factor de seguridad por fatiga.

- **Factor De Seguridad Por Fatiga**

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{fatiga}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ult}}}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{fatiga}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ult}}$$

Antes debemos resolver la tensión alternante:

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{flexión}^2 + \tau_{torsión}^2}$$

Sustituyendo valores:

$$\sigma_a = \sqrt{(8.03 \text{ MPa})^2 + (2.38 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_a = 8.37 \text{ MPa}$$

(74)

Shigley, J.E., & Mischke, C.R., *Mechanical Engineering Design, 6th Edition, McGraw-Hill, 2001*,
página 410, capítulo 6 (Fallos por Fatiga bajo Cargas Variables).

Ahora si continuamos con el factor de seguridad por Goodman Modificado:

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{\sigma_{fatiga}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ult}}}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{fatiga}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ult}}$$

- Tensión alternante (σ_a) = 8.37MPa
- Fuerza sobre área (σ_m) = 0.308MPa
- Límite de fatiga (σ_{fatiga}) = 310MPa Para el Acero AISI 316
- Resistencia ultima (σ_{ult}) = 515MPa Para el Acero AISI 316

$$\frac{1}{n_f} = \frac{8.37}{310} + \frac{0.308}{515}$$

$$\frac{1}{n_f} = 0.027 + 0.000598 = 0.0276$$

$$n_f = \frac{1}{0.0276} = 36.23$$

(75)

El resultado de la Ec.75 indica que el diseño también es seguro frente a fallas por fatiga. Esto asegura que el material puede resistir cargas cíclicas sin fracturarse.

Shigley, J.E., & Mischke, C.R., *Mechanical Engineering Design, 6th Edition, McGraw-Hill, 2001*,
página 470, capítulo 7 (Teorías de Fallo por Fatiga – Criterio de Goodman Modificado).

6.1.3.4. Cálculos de Construcción

Datos a tener en cuenta:

- Longitud de uso del eje = 763mm
- Longitud total del eje = 800mm
- Longitud de cerdas = 100mm
- Diámetro del eje = 45mm
- Peso eje y cerdas = 3kg

- **Número de Agujeros**

Longitud total del eje (palo de escoba): L= 763 mm

Para calcular el número de agujeros (N) a lo largo del eje, podemos usar la fórmula:

$$N \approx \frac{L}{\text{distancia deseada entre agujeros}}$$

$$N \approx \frac{763\text{mm}}{6\text{mm}} \approx 127 \text{ agujeros}$$

(76)

Aproximadamente 127 agujeros a lo largo del eje.

Plantenberg, K. Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución de Elementos Lineales).

- **Distancia entre Agujeros**

Longitud total del eje L= 763mm

Número de agujeros deseado N= 127

$$d = \frac{L}{N} = \frac{763 \text{ mm}}{127} \approx 6\text{mm}$$

(77)

La distancia entre agujeros sería aproximadamente 6mm.

Plantenberg, K., Engineering Graphics Essentials with AutoCAD, 5th Edition, SDC Publications, 2016, página 190, capítulo 4 (Distribución Lineal en Geometría Mecánica).

- **Paso de Hélice (P)**

Con 2 pasos de hélice en una longitud de 763 mm, podemos calcular el paso de la hélice (P) como la distancia total dividida entre el número de pasos:

$$P = \frac{L}{\text{numero de pasos}} = \frac{763mm}{2} = 381.5mm$$

(78)

El paso de la hélice es 381.5 mm.

Budynas, R.G., y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Resortes Helicoidales y Hélices).

- **Ángulo de Inclinación de la Hélice (θ):**

Para determinar el ángulo de inclinación (θ), utilizamos la fórmula:

$$\theta = \arctan \left(\frac{P}{\pi d} \right)$$

donde P =381.5 mm y d =45 mm

Sustituyendo:

$$\theta = \arctan \left(\frac{381.5mm}{(\pi)(45mm)} \right)$$

$$\theta \approx \arctan \left(\frac{381.5}{141.37} \right) \rightarrow \arctan (2.69) \approx 69^\circ$$

(79)

El ángulo de inclinación de la hélice es aproximadamente 69 grados.

Budynas, R.G. y Nisbett, J.K., Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition, McGraw-Hill, 2015, página 246, capítulo 8 (Geometría de Hélices y Ángulos de Inclinación).

- **Ángulo De Separación**

El ángulo de separación entre cada hélice alrededor de la circunferencia. Este ángulo de separación se calcula como:

$$\text{Ángulo de Separación} = \frac{360^\circ}{\text{Numero de helices}} \rightarrow \frac{360^\circ}{8} = 45^\circ$$

(80)

Las 8 hélices estarán separadas por un ángulo de 45 grados alrededor del eje, lo que permite una distribución uniforme de las cerdas.

Mott, Robert L., Machine Elements in Mechanical Design, 6th Edition, Pearson, 2017, página 259, capítulo 7 (Técnicas de fijación, unión y conexión).

- **Distancia entre hélices**

$$D_v = \frac{d}{N}$$

$$D_v = \frac{45mm}{8}$$

$$D_v = 5.625mm$$

(81)

Esta es la distancia entre cada hélice en el sentido vertical, o radial sobre el diámetro del eje.

Muvdi, B.B., y McNabb, J.W., Engineering Mechanics of Materials, 3rd Edition, Springer, 2012, página 312, capítulo 7 (Distribución en Hélices y Elementos Helicoidales).

- **Protuberancia de las cerdas**

Longitud total de cada filamento de cerda: $L = 100 \text{ mm}$

Diámetro del eje: $d = 45 \text{ mm}$

La protuberancia efectiva de las cerdas se calcula como la longitud que sobresale del eje:

$$L_c = L - \frac{D}{2}$$

Sustituyendo:

$$L_c = 100\text{mm} - \frac{45\text{mm}}{2} \rightarrow 100\text{mm} - 22.5\text{mm} = 77.5\text{mm}$$

(82)

La protuberancia de las cerdas es aproximadamente 77.5mm.

Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 9th Edition, McGraw-Hill, 2011, página 320, capítulo 5 (Componentes Sobresalientes en Ejes).

6.1.4. Características del Cepillo

Tabla 16

Elemento		Parámetro	Valor	Peso (kg)
Núcleo		Material	Acero inoxidable 316	0.67
		Diámetro	Exterior: 15.5 mm	
			Interior: 10.3 mm	
		Longitud	800 mm	
Base		Material	Nylon 6.6	1.22
		Diámetro	45 mm	
		Longitud	763 mm	
Cerdas	Fibras	Material	Nylon 6	1.1
		Calibre	0.45 mm	
		Protuberancia	100 mm	
	Patrón en hélice	Número	8	
		Paso	381.5	
Peso				3.0

Fuente. Propia

6.2. MODELADO

En esta sección se presenta el modelado en 3D del componente, utilizando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) para obtener una representación visual y precisa de su geometría. Este modelado permite analizar aspectos clave del diseño, como dimensiones, estructura y posibles interacciones con otros componentes del sistema.

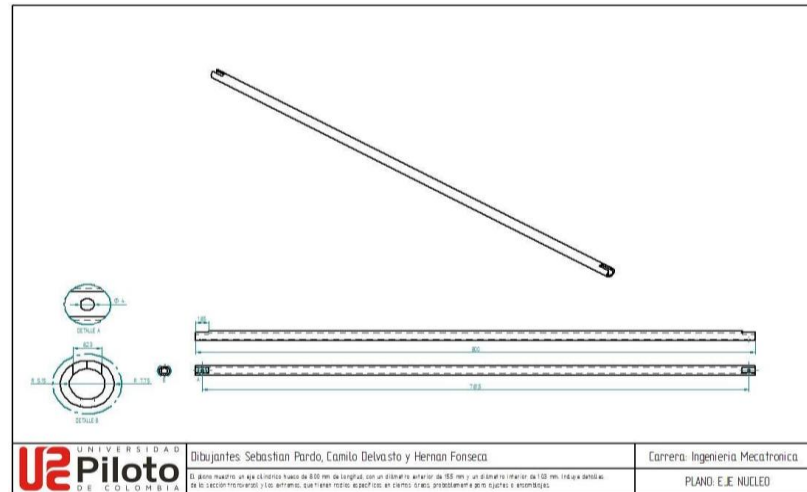
6.2.1. Núcleo de Eje

A continuación, se presentan el plano técnico y el renderizado en 3D del núcleo del eje. El plano detalla las dimensiones para su fabricación, mientras que el renderizado permite visualizar el diseño final

y sus proporciones en contexto. Estos elementos facilitan la validación del diseño y aseguran su adecuada integración en el sistema.

6.2.1.1. Plano

Ilustración 26



Fuente. CAD

6.2.1.2. Renderizado

Ilustración 27



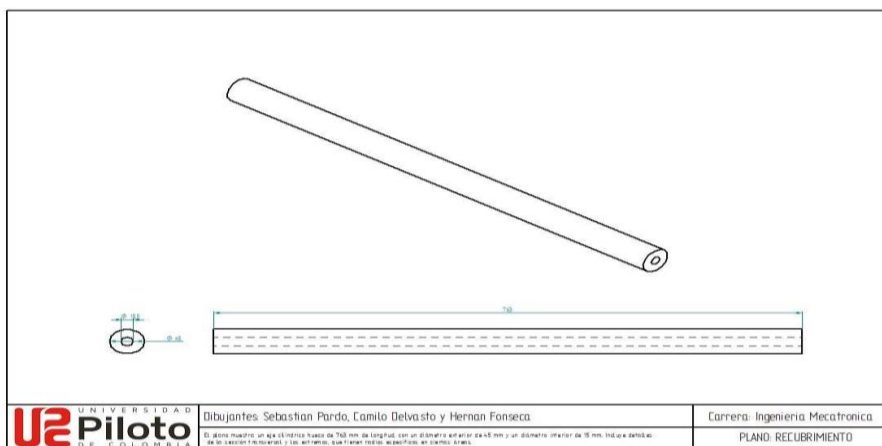
Fuente. CAD

6.2.2. Base del Eje

A continuación, se presentan el plano técnico y el renderizado en 3D de la base del eje. El plano muestra las dimensiones para su fabricación, mientras que el renderizado permite visualizar el diseño final en su contexto. Estos elementos facilitan la validación del diseño y aseguran su correcta integración en el sistema.

6.2.2.1. Plano

Ilustración 28



Fuente. CAD

6.2.2.2. Renderizado Base del Eje

Ilustración 29

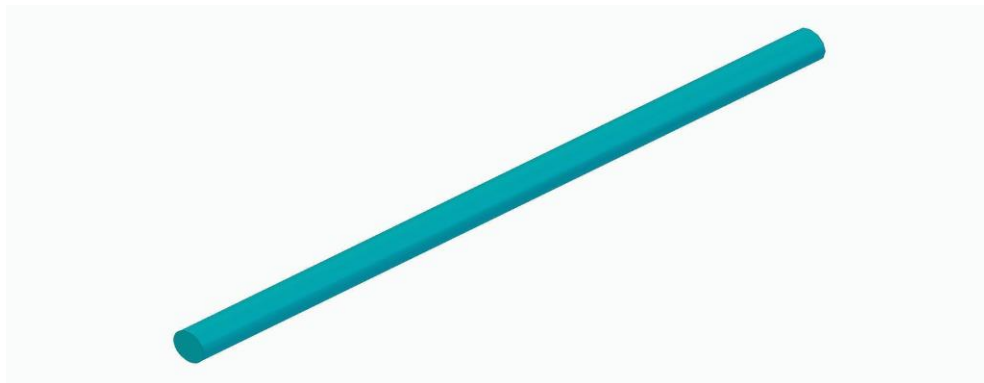


Fuente. CAD

6.2.2.3. Renderizada Cerda

A continuación, se presenta el renderizado en 3D de la cerda. Este modelo permite visualizar su diseño y dimensiones, proporcionando una referencia visual clave para evaluar su funcionalidad e integración en el sistema.

Ilustración 30



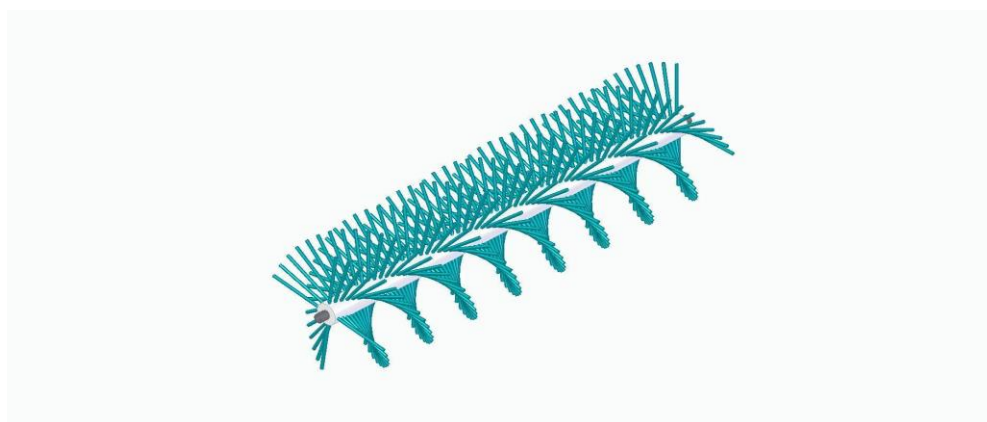
Fuente. CAD

6.2.3. Cepillo

Se presenta el renderizado en 3D del cepillo completo, una representación visual de cómo podría verse el diseño final. Este modelo proporciona una referencia preliminar del cepillo en su totalidad, facilitando la evaluación de su estructura, proporciones y posible apariencia en condiciones operativas.

6.2.3.1. Renderizado Cepillo Completo

Ilustración 31



Fuente. CAD

6.3. SIMULACIÓN

En este capítulo se detallarán las pruebas mecánicas realizadas para evaluar el comportamiento del material y la estructura bajo diversas condiciones de carga. El objetivo es obtener una comprensión más profunda sobre la capacidad del sistema para soportar las fuerzas a las que estará sometido durante su operación. Para ello, se utilizarán simulaciones de elementos finitos que permitirán analizar variables clave como el desplazamiento, la tensión de Von Mises y el factor de seguridad, lo cual es esencial para asegurar la integridad del diseño y su rendimiento a largo plazo.

A continuación, se presenta una tabla con las especificaciones detalladas del material, las fuerzas aplicadas, los resultados de desplazamiento, la tensión de Von Mises y el factor de seguridad calculado para cada escenario. Estos parámetros serán fundamentales para validar la efectividad y seguridad del diseño propuesto en condiciones de trabajo reales.

● PROPIEDADES DEL MATERIAL

Tabla 17

Propiedades	Valor
Densidad	8027.000 kg/m ³
Coeficiente de expansión térmica	0.0000 /C
Conductividad térmica	0.017 kW/m-C
Calor específico	502.000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	193053.196 MPa
Coeficiente de Poisson	0.290
Límite elástico	248.211 MPa
Tensión de rotura	530.896 MPa
% de elongación	0.000

Fuente. CAD

● CARGAS

Tabla 18

Nombre de carga	Tipo de carga	Valor de carga	Dirección de carga
Fuerza 1	Fuerza	3.24e+04 mN	(0.00, 0.00, -1.00)
Fuerza 2	Fuerza	3.08e+05 mN	(0.00, -1.00, 0.00)
Par 1	Par	4.3 N-m	Posición = (0.00, 0.38, 0.00), Eje = (0.00, 1.00, 0.00)

Fuente. Propia

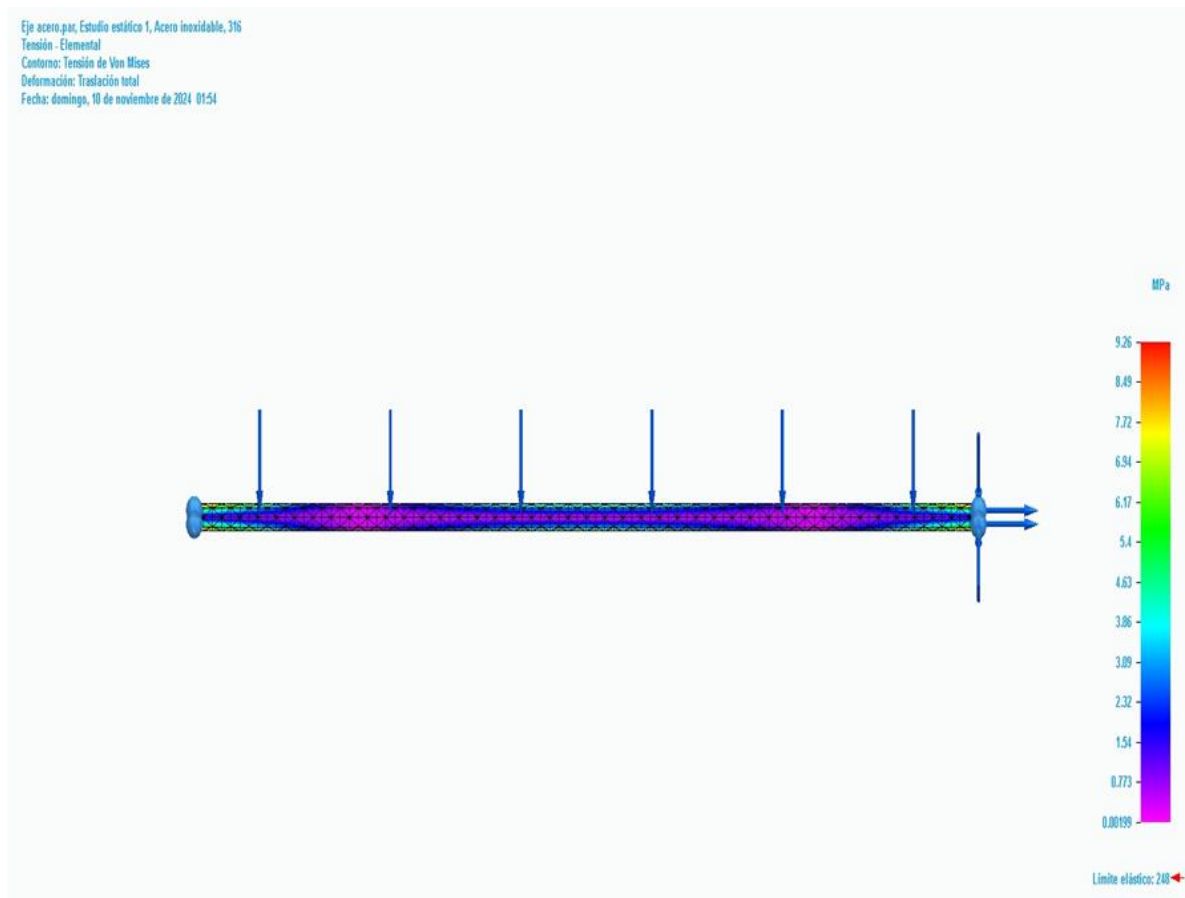
● **RESULTADO DE TENSIÓN VON MISES**

Tabla 20

Extensión	Valor	X	Y	Z
Mínima	0.00199 MPa	-5.150 mm	381.500 mm	0.000 mm
Máxima	9.26 MPa	0.000 mm	772.198 mm	-7.750 mm

Fuente. CAD

Ilustración 33



Fuente. CAD

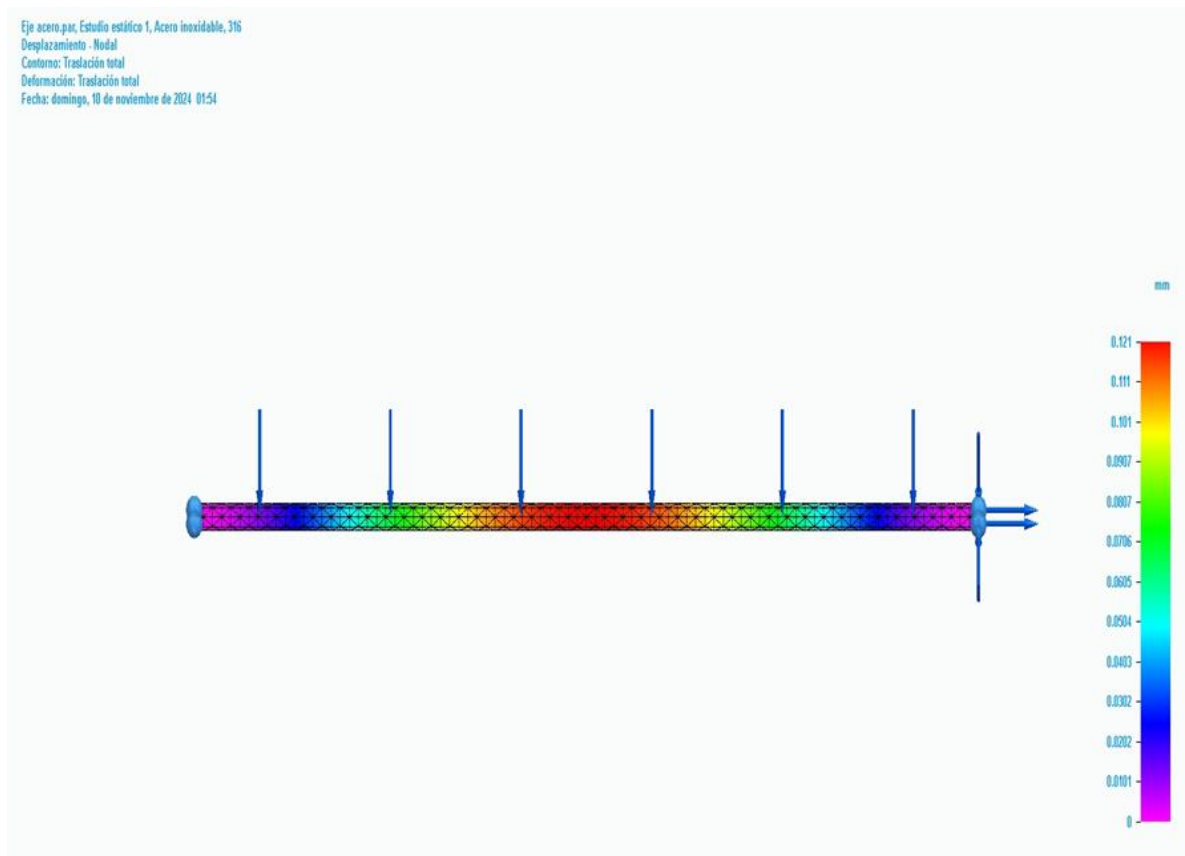
● **RESULTADO DE DESPLAZAMIENTO**

Tabla 19

Extensión	Valor	X	Y	Z
Mínima	0 mm	-5.480 mm	781.500 mm	5.480 mm
Máxima	0.121 mm	-7.750 mm	381.500 mm	0.000 mm

Fuente. CAD

Ilustración 32



Fuente. CAD

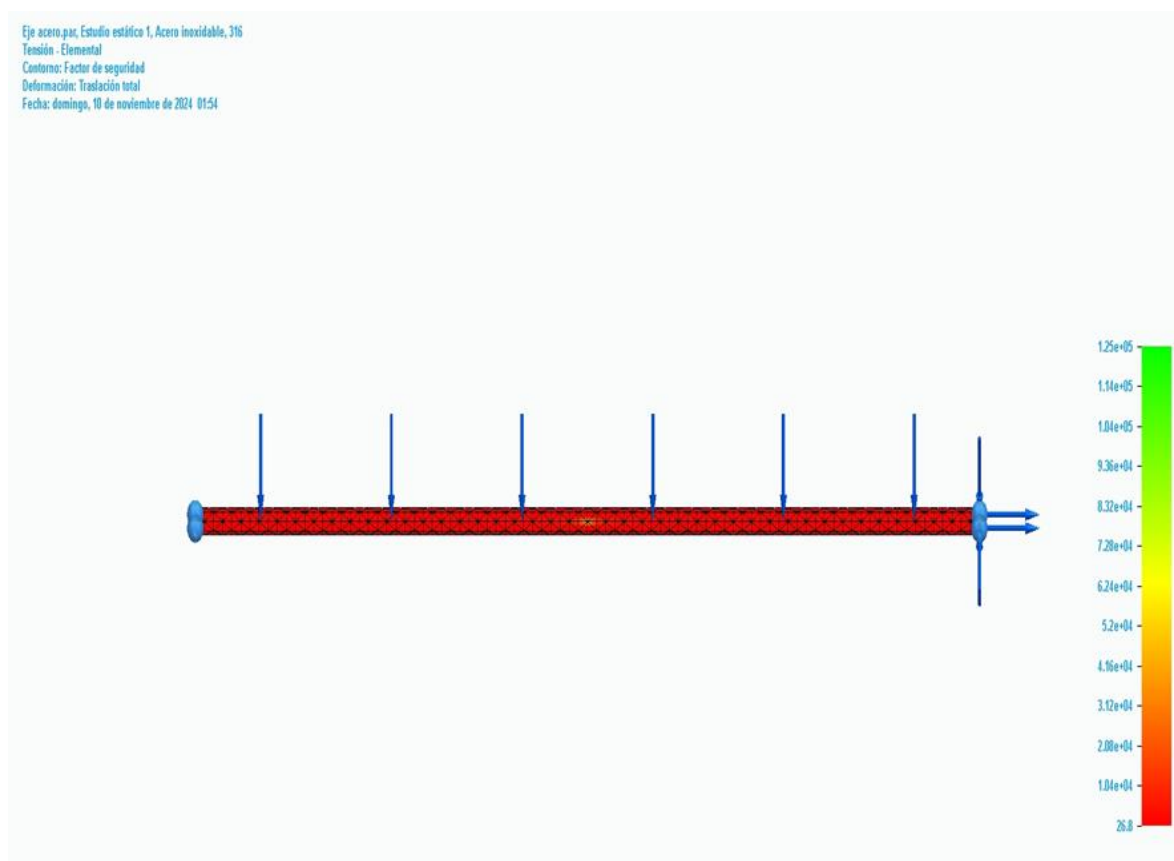
● **RESULTADO DE FACTOR DE SEGURIDAD**

Tabla 21

Extensión	Valor	X	Y	Z
Mínima	26.8	0.000 mm	772.198 mm	-7.750 mm
Máxima	1.25e+05	-5.150 mm	381.500 mm	0.000 mm

Fuente. CAD

Ilustración 34



Fuente. CAD

6.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el análisis teórico y de simulación para el diseño del cepillo helicoidal, considerando aspectos de seguridad y confiabilidad según las recomendaciones de autores destacados en ingeniería mecánica.

6.4.3. Comparación de la Tensión de Von Mises

- **Teórico:** 9.03 MPa
- **Simulación:** 9.26 MPa
- **Diferencia:** 2.55% más en la simulación

La tensión de Von Mises es un parámetro clave que permite entender cómo responde el material del cepillo cuando se combinan distintos tipos de carga. La diferencia entre los resultados teóricos y de simulación es apenas de 2.55%, lo cual muestra que ambos métodos ofrecen resultados muy similares y confiables. Budynas y Nisbett en *Shigley's Mechanical Engineering Design* explican que, si la tensión está por debajo del límite de resistencia del material (como en este caso), el diseño es seguro. Así que, basándonos en estos valores, podemos afirmar que el cepillo está diseñado para soportar bien las cargas y no presenta riesgo de daño.

6.4.4. Factor de Seguridad

- **Teórico:** 23.81
- **Simulación:** 26.8
- **Diferencia:** 12.56% más en la simulación

El factor de seguridad mide cuánta carga extra podría soportar el cepillo antes de dañarse, y tener un valor alto aquí es positivo. La simulación arrojó un factor de seguridad un poco mayor (12.56%) que el cálculo teórico, lo que se traduce en un margen de seguridad adicional. Según Shigley y Mischke, un factor de seguridad alto es esencial para garantizar la durabilidad, especialmente cuando el cepillo está sometido a repetidas rotaciones. Esto nos indica que el diseño no solo es seguro, sino que también ofrece un buen margen para operar con confianza.

6.4.5. Fuerza sobre área y Esfuerzo de flexión

- **Fuerza sobre área:** 0.308 MPa
- **Esfuerzo de flexión:** 8.03 MPa

La fuerza sobre área es bastante baja, lo cual no representa un problema para la estructura. Por otro lado, la tensión de flexión es más importante porque es el tipo de esfuerzo que realmente afecta al cepillo debido a las cargas que enfrenta al girar y limpiar. Norton menciona que, en componentes como estos, el esfuerzo de flexión suele ser la más crítica, pero en este caso el valor es bastante bajo en comparación con el límite del material, lo que confirma que el cepillo puede manejar estas cargas sin problema.

6.4.6. Esfuerzo cortante por torsión

- **Esfuerzo cortante por torsión:** 2.38 MPa

La torsión (o el esfuerzo debido a giros) es baja en comparación con la flexión, lo cual es beneficioso para el diseño. Norton indica que, cuando la torsión es baja, la pieza suele ser más durable porque no está sometida a un desgaste extremo. Este resultado es positivo para la vida útil del cepillo, ya que la baja torsión disminuye la posibilidad de deformación o desgaste por el esfuerzo de torsión.

6.4.7. Factor de Seguridad por Fatiga y Tensión Alternante

- **Factor de Seguridad por Fatiga:** 36.23
- **Tensión Alternante:** 8.37 MPa

El factor de seguridad por fatiga de 36.23 es bastante alto, lo cual es una excelente señal de que el cepillo resistirá bien las cargas repetitivas. Shigley y Mischke explican que un factor de seguridad elevado en aplicaciones cíclicas (donde las cargas se aplican muchas veces) es clave para que el diseño sea seguro y duradero. La tensión alternante, que representa la variación en la carga, se encuentra en un nivel manejable según el criterio de Goodman, lo que también sugiere que el cepillo puede resistir estas variaciones sin problemas.

La comparación entre los resultados teóricos y de simulación muestra una gran coherencia, con diferencias mínimas que refuerzan la confianza en el diseño. Los valores de tensión de von Mises y los altos factores de seguridad indican que el cepillo es seguro y puede cumplir su función eficientemente en la limpieza de paneles solares. Según los autores consultados, como Gere, Timoshenko, Norton, Shigley y Budynas, los resultados sugieren que el diseño es confiable y robusto.

En resumen, este análisis muestra que el cepillo no solo es adecuado para su propósito, sino que tiene la resistencia y seguridad necesarias para operar de forma eficiente durante mucho tiempo, incluso en condiciones demandantes.

7. CONCLUSIONES

1. Caracterización de los cepillos originales:

Se logró identificar las principales deficiencias del cepillo original de Kwunphi (excesiva suavidad) y del cepillo alternativo de la empresa (rigidez y peso elevado). Estas características limitan su eficacia en la remoción de suciedad adherida y afectan la calidad de la limpieza, generando saltos en la superficie y potencialmente dañando los paneles. Esta fase permitió establecer una base de comparación sólida para el desarrollo del nuevo diseño, con características optimizadas en cuanto a flexibilidad y peso.

2. Evaluación de cepillos disponibles en el mercado:

El análisis de los cepillos disponibles permitió obtener referencias de materiales y patrones de cerdas. Esto fue crucial para la selección de los patrones helicoidales, recto y espiral, que se ajustaron a las necesidades de limpieza de superficies delicadas, como los paneles solares. Además, se evidencia que los materiales flexibles y ligeros, como la poliamida, son preferibles para reducir el peso sin comprometer la durabilidad.

3. Diseño y optimización del cepillo para el robot Kwunphi:

Se desarrolló un cepillo helicoidal como prototipo final, que, basado en pruebas de rendimiento, mostró una mayor efectividad en la remoción de distintos tipos de suciedad sin dañar la superficie del panel. La selección de un eje más liviano y el uso de materiales resistentes pero flexibles permitieron optimizar la limpieza sin sobrecargar el sistema robótico.

4. Pruebas prácticas y comparación de rendimiento:

Las pruebas con diferentes materiales (harina, arena y gravilla) en condiciones de limpieza en seco y húmedo demostraron que el diseño helicoidal mejora la eficacia de limpieza y estabilidad en comparación con los cepillos anteriores. Este diseño permitió una limpieza más uniforme y adaptativa, cumpliendo con los requisitos de rendimiento y seguridad de la superficie de los paneles.

El rediseño del cepillo para el robot Kwunphi responde de manera adecuada a las necesidades de la empresa Ideagro, logrando un equilibrio entre eficiencia de limpieza y cuidado de la superficie del panel solar.

8. RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas de limpieza en campo real:

Se recomienda que el cepillo construido sea probado en paneles solares bajo condiciones reales de operación. Esto permitirá observar su efectividad en la remoción de diferentes tipos de suciedad (polvo, arena y residuos orgánicos) en entornos de exterior. Documentar la cantidad de suciedad removida y la facilidad de operación proporcionará información clave para determinar la efectividad del diseño en condiciones de uso diario.

2. Evaluar el rendimiento en condiciones climáticas diferentes:

Para obtener una visión completa del rendimiento del cepillo, es recomendable realizar pruebas en diferentes condiciones climáticas, como días secos, húmedos y después de lluvias ligeras, cuando la suciedad puede estar más adherida. Esta evaluación permitirá concluir si el diseño del cepillo mantiene su efectividad en distintos escenarios climáticos y si es necesario realizar ajustes para mejorar la adaptabilidad de las cerdas.

3. Analizar el desgaste y durabilidad del cepillo tras el uso:

Para evaluar la durabilidad, se sugiere someter el cepillo a ciclos continuos de limpieza durante varias horas y registrar cualquier desgaste en las cerdas y el eje. Esto ayudará a definir su vida útil y permitirá determinar la frecuencia de mantenimiento o reemplazo necesario. Las conclusiones sobre el desgaste serán importantes para futuras optimizaciones en el diseño de las cerdas o del material del eje.

4. Comparar la eficiencia de limpieza frente a cepillos comerciales:

Es recomendable realizar una serie de pruebas comparativas con cepillos comerciales ya existentes y el cepillo diseñado en este proyecto, utilizando las mismas superficies y tipos de suciedad. Esta comparación permitirá obtener conclusiones sobre el nivel de mejora que el nuevo diseño aporta en términos de limpieza, eficiencia y estabilidad sobre los paneles, y también puede ayudar a validar el valor agregado del diseño en términos comerciales.

5. Evaluar el impacto en la operación del robot y en el consumo de energía:

Además de su eficacia en la limpieza, el cepillo construido debe ser probado para ver cómo afecta el consumo de energía del robot y su maniobrabilidad. Al reducir el peso del cepillo, el diseño debería facilitar un uso más eficiente del robot; Sin embargo, es importante confirmar este beneficio a través de pruebas. Las conclusiones de esta evaluación podrían guiar futuras mejoras en el equilibrio entre peso y eficiencia.

6. Documentar cada prueba con métricas y observaciones para conclusiones detalladas:

Se recomienda documentar detalladamente cada prueba, estableciendo métricas claras como tiempo de limpieza, porcentaje de suciedad removida y estabilidad del cepillo en movimiento. Esta documentación será esencial para extraer conclusiones precisas sobre la efectividad del cepillo y proponer ajustes si se observa alguna área de mejora.

7. Pruebas y Evaluación del Desempeño del Cepillo en Superficies Inclınadas

Se recomienda realizar pruebas adicionales en una superficie inclinada de 30 grados para evaluar cómo estos factores impactan el desempeño del cepillo y el comportamiento del robot. Esto permitirá

ajustar la presión de contacto, la estabilidad del cepillo y la dinámica del movimiento para asegurar que el sistema de limpieza sea igualmente eficiente y seguro en condiciones reales de operación.

8. Trabajos futuros (Desarrollo de cepillos inteligentes)

Explorar la integración de tecnologías de sensores en los cepillos, como sensores de presión o de suciedad, que permitan ajustar automáticamente la fuerza de limpieza o identificar áreas con mayor acumulación de suciedad.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Solmic. (2023). Panorama de los proyectos de energía solar en Colombia. SOLMICO.
<https://www.solmic.co/panorama-de-los-proyectos-de-energia-solar-en-colombia>
2. Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). (2020). El polen desafía a la lluvia en la limpieza de paneles solares. Revisión de Energía. <https://www.review-energy.com/solar/el-polen-desafia-a-la-lluvia-en-la-limpieza-de-paneles-solares>
3. Jones, A., Smith, B., & Chen, C. (2021). El impacto de la limpieza regular de paneles solares en la producción energética. Direnergía. <https://www.direnergy.net/index.php/blog/el-impacto-de-la-limpieza-regular-de-paneles-solares-en-la-produccion-energetica/>
4. Smith, D., & Chen, L. (2019). El impacto de la limpieza de los paneles solares en la eficiencia. Mundo Renovable. <https://mundorenovable.org/el-impacto-de-la-limpieza-de-los-paneles-solares-en-la-eficiencia/>
5. Sociedad de Ingenieros Plásticos. (2018). Sin polvo ni suciedad: solución nanotecnológica para sistemas fotovoltaicos. Cordis. <https://cordis.europa.eu/article/id/124363-no-more-dirt-and-dust-nanotechnology-solution-for-photovoltaic-systems/es>
6. Brown, T., & Lewis, M. (2020). Limpieza y revisión periódica optimizan el rendimiento de paneles solares. Diario Informativo. <https://infodiarario.es/notas-de-prensa/limpieza-y-revision-periodica-optimizan-el-rendimiento-de-paneles-solares/>

7. García, R., et al. (2021). Optimización de limpieza de paneles solares en plantas fotovoltaicas. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/193421/Optimizacion-de-limpieza-de-paneles-solares-en-plantas-fotovoltaicas.pdf?sequence=1>
8. Revista de simulación de ingeniería. (2019). Guía de introducción a SAM. https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-getting-started-for-translation-2020-12-16-spanish.pdf
9. Revista de Tecnologías de Energías Renovables. (2022). Energía fotovoltaica en Colombia. SOLMICO. <https://www.solmic.co/energia-fotovoltaica-en-colombia>ento actual.
10. Budynas, RG y Nisbett, JK (2011). Diseño de ingeniería mecánica de Shigley (novena edición). McGraw-Hill Education.
11. Shigley, JE, y Mischke, CR (2002). Diseño de ingeniería mecánica (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
12. Norton, RL (2014). Diseño de máquinas: un enfoque integrado (5.ª ed.). Pearson.
13. Gere, JM, y Timoshenko, SP (1997). Mecánica de materiales (4ª ed.). PWS Publishing.
14. Shigley, JE, Budynas, RG y Nisbett, JK (2008). Diseño de ingeniería mecánica (8.ª ed.). McGraw-Hill Education.
15. Norton, RL (2011). Diseño de maquinaria (5.ª ed.). McGraw-Hill Education.
16. Gere, JM (2004). Mecánica de materiales (6ª ed.). Thomson Engineering.
17. Plantenberg, K. (2016). Fundamentos de gráficos de ingeniería con AutoCAD (5ta ed.). Publicaciones COSUDE, página 190, capítulo 4.
18. Gere, JM (2013). Mecánica de Materiales (8va ed.). Cengage Learning, página 251, capítulo 6.
19. Shigley, JE (2011). Diseño de Ingeniería Mecánica (9ª ed.). McGraw-Hill, página 246, capítulo 5.
20. Budynas, RG, & Nisbett, JK (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design (10.ª ed.). McGraw-Hill, página 267, capítulo 6.

21. Gere, JM (2013). Mecánica de Materiales (8va ed.). Cengage Learning, página 231, capítulo 5.
22. Plantenberg, K. (2016). Fundamentos de gráficos de ingeniería con AutoCAD (5ta ed.). SDC Publications, página 190, capítulo 4.
23. Budynas, RG, & Nisbett, JK (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design (10.^a ed.). McGraw-Hill, página 246, capítulo 8.
24. Muvdi, BB y McNabb, JW (2012). Ingeniería Mecánica de Materiales (3ra ed.). Springer, página 312, capítulo 7.
25. Shigley, JE (2011). Diseño de ingeniería mecánica (9^a ed.). McGraw-Hill, página 320, capítulo 5.
26. Budynas, RG, & Nisbett, JK (2015). Shigley's Mechanical Engineering Design (10.^a ed.). McGraw-Hill, página 246, capítulo 8.
27. Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1999). Mechanics of materials (5th ed.). Brooks/Cole Engineering.
28. Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2001). Mechanics of materials (4th ed.). McGraw-Hill.
29. Hibbeler, R. C. (2014). Mechanics of materials (9th ed.). Pearson.
30. Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2001). Mechanical engineering design (6th ed.). McGraw-Hill.

ANEXO 1.

IMÁGENES DEL PROCEDIMIENTO

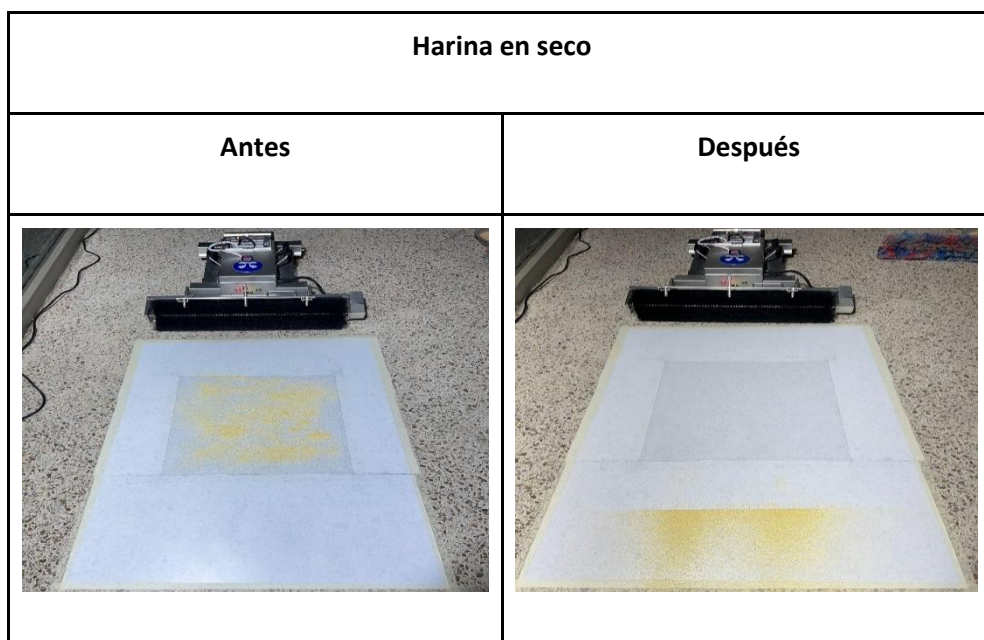
DISEÑO E IMPLEMETACION DE CEPILLOS DE LIMPIEZA DE PANELES SOLARES

ANEXO A. PANELES ANTES Y DESPUES

En este anexo se presentan imágenes que documentan los resultados de las pruebas realizadas, mostrando el estado de las superficies antes y después de la limpieza. Estas imágenes permiten observar visualmente la efectividad de los distintos tipos de cepillos y condiciones de limpieza, proporcionando una referencia clara del impacto de cada prueba en la remoción de suciedad.

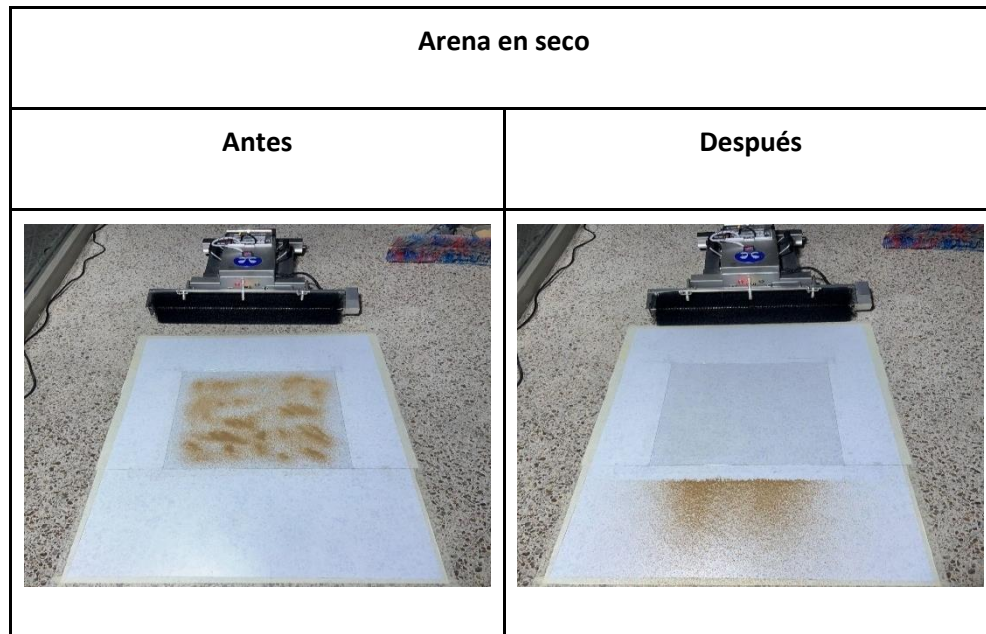
- **CEPILLO ORIGINAL**

Ilustración 1



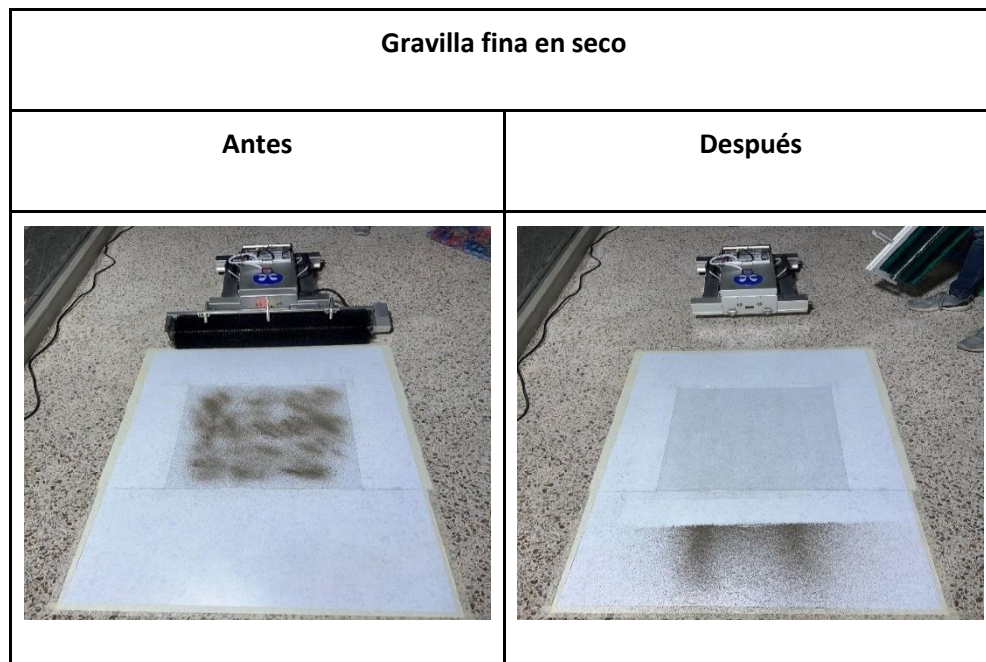
Fuente. Propia

Ilustración 2



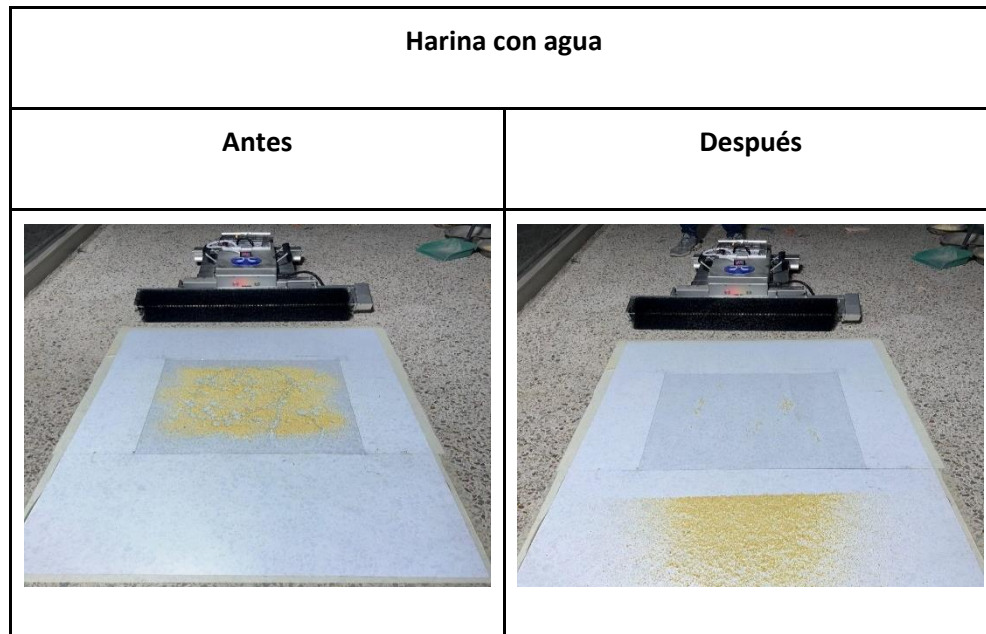
Fuente. Propia

Ilustración 3



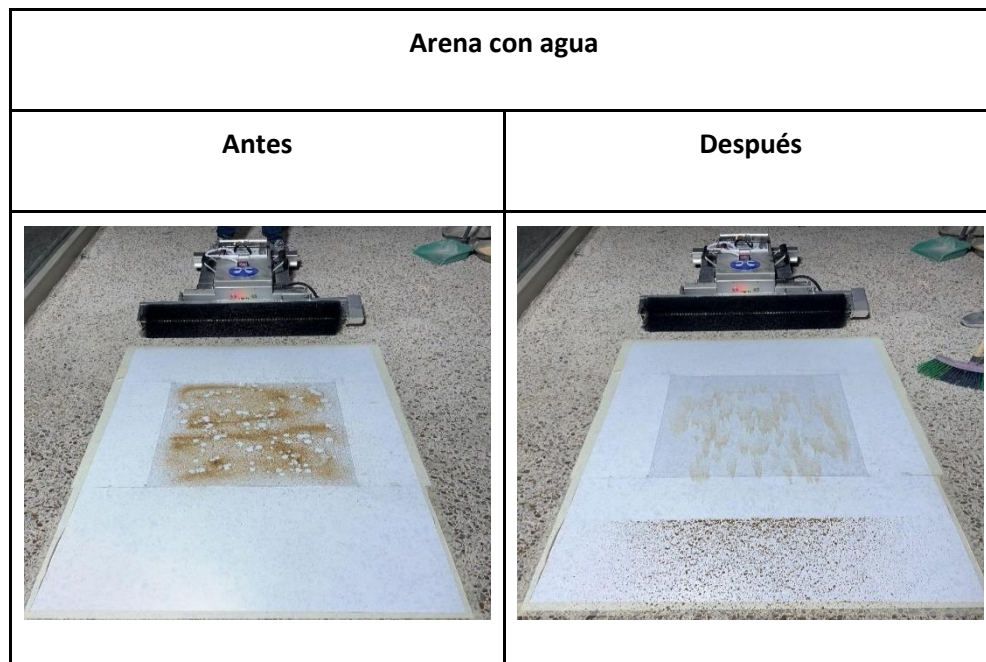
Fuente. Propia

Ilustración 4



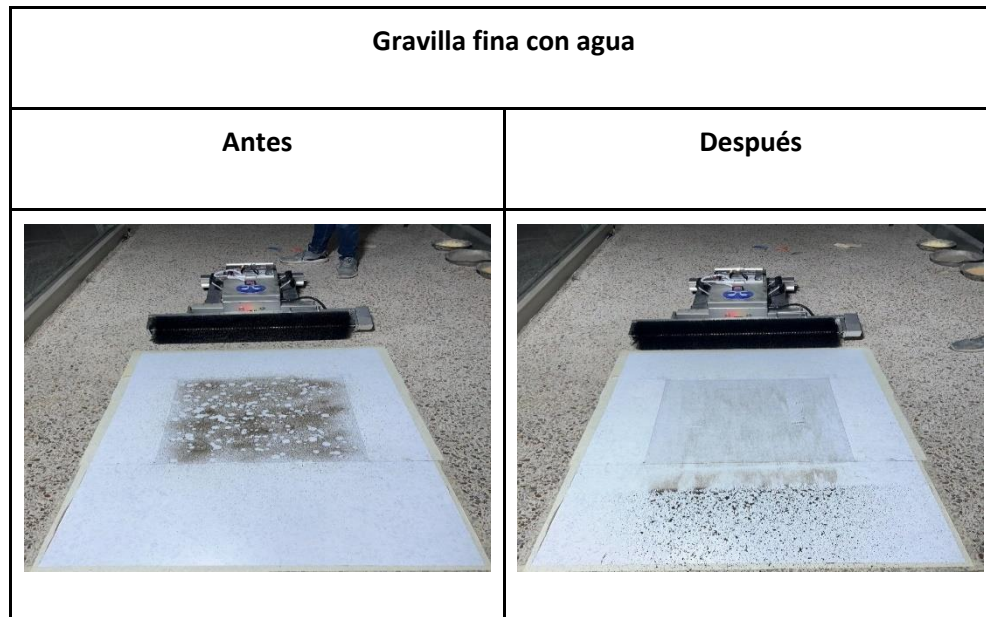
Fuente. Propia

Ilustración 4



Fuente. Propia

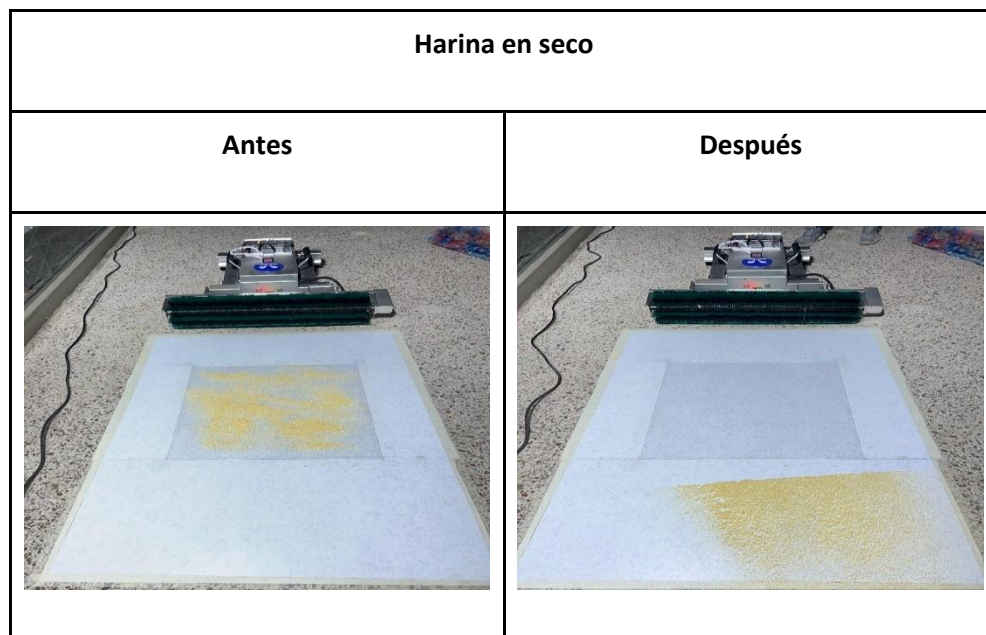
Ilustración 5



• Fuente. Propia

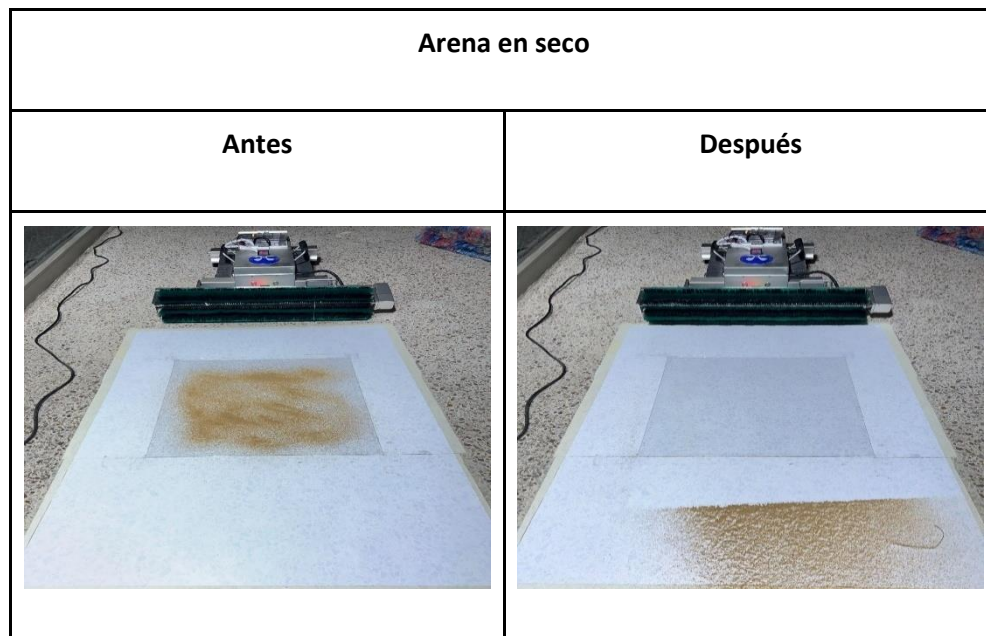
• CEPILLO FABRICADO POR LA EMPRESA

Ilustración 6



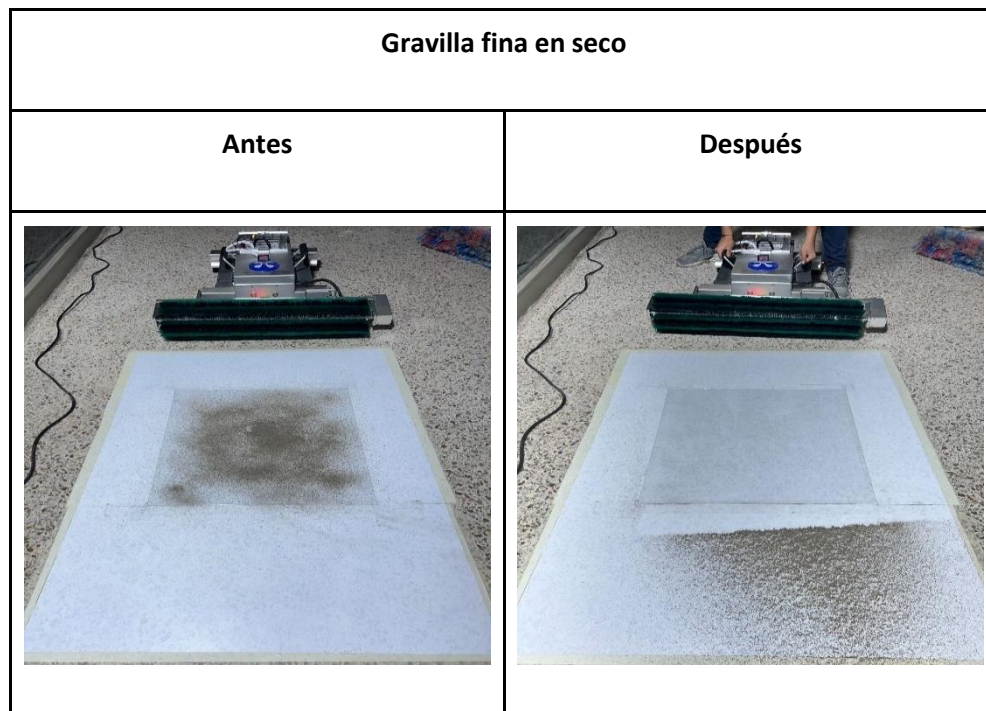
Fuente. Propia

Ilustración 7



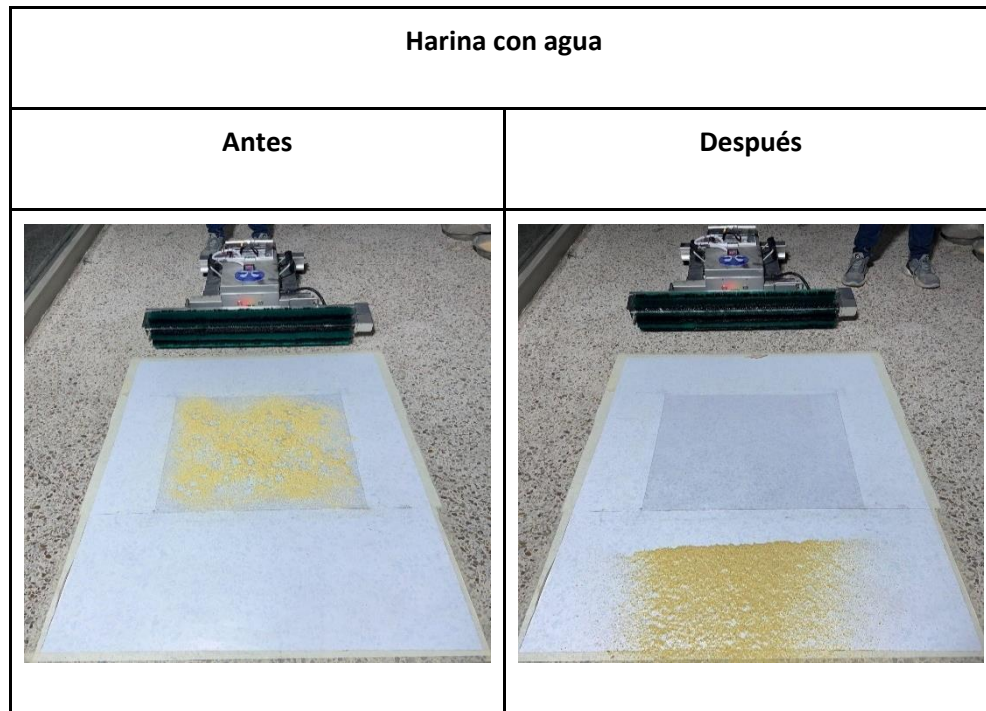
Fuente. Propia

Ilustración 8



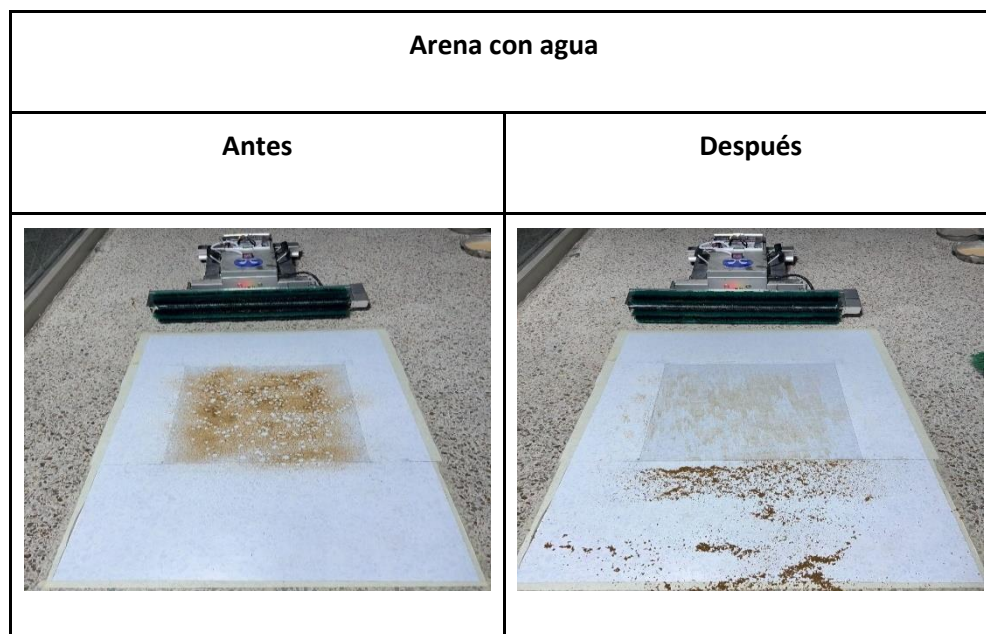
Fuente. Propia

Ilustración 9



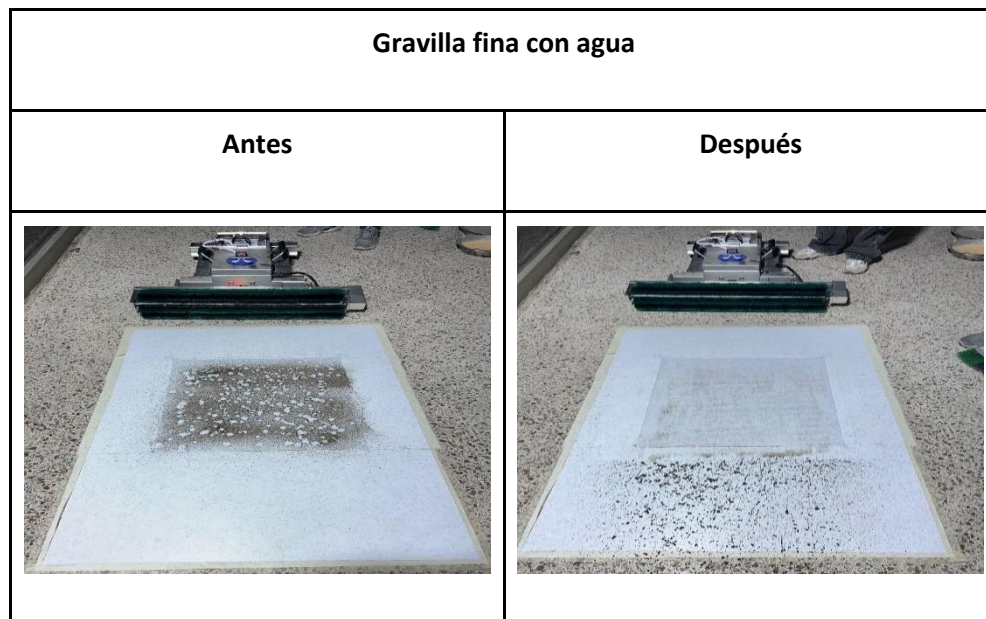
Fuente. Propia

Ilustración 10



Fuente. Propia

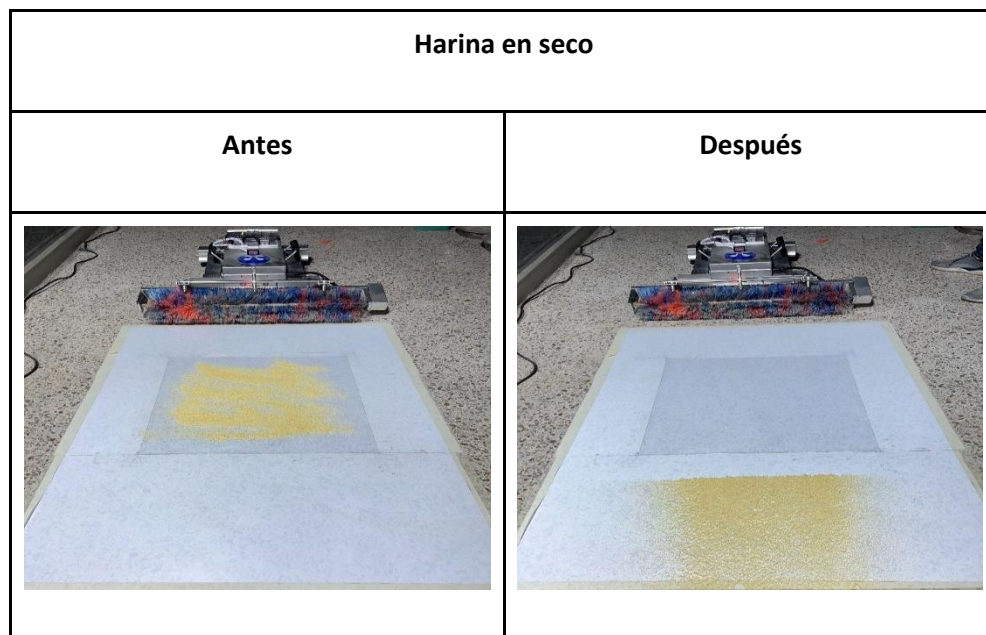
Ilustración 11



• Fuente. Propia

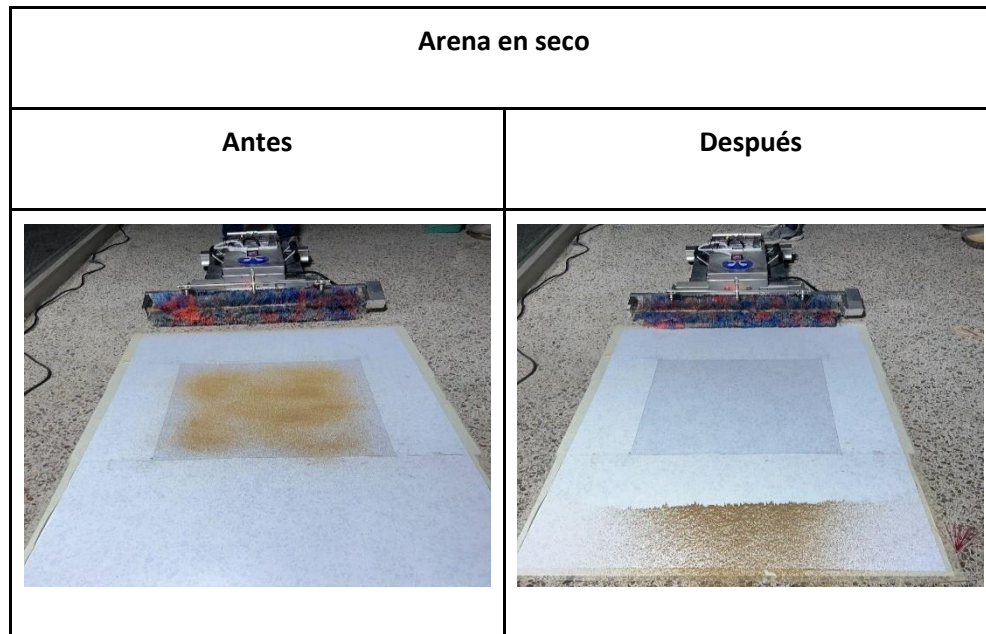
• **CEPILLO PATRÓN LINEAL**

Ilustración 12



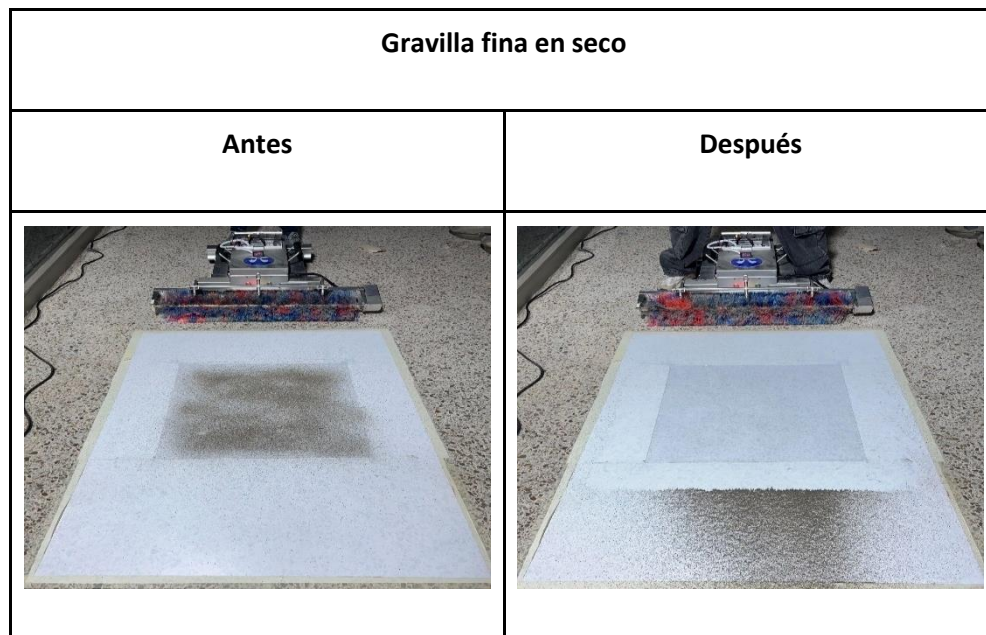
Fuente. Propia

Ilustración 13



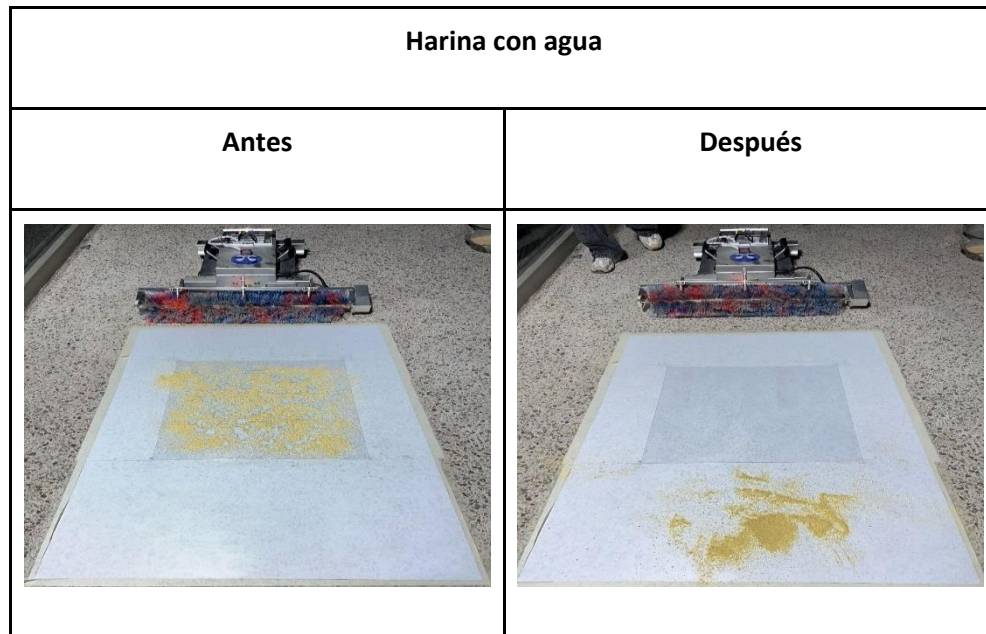
Fuente. Propia

Ilustración 14



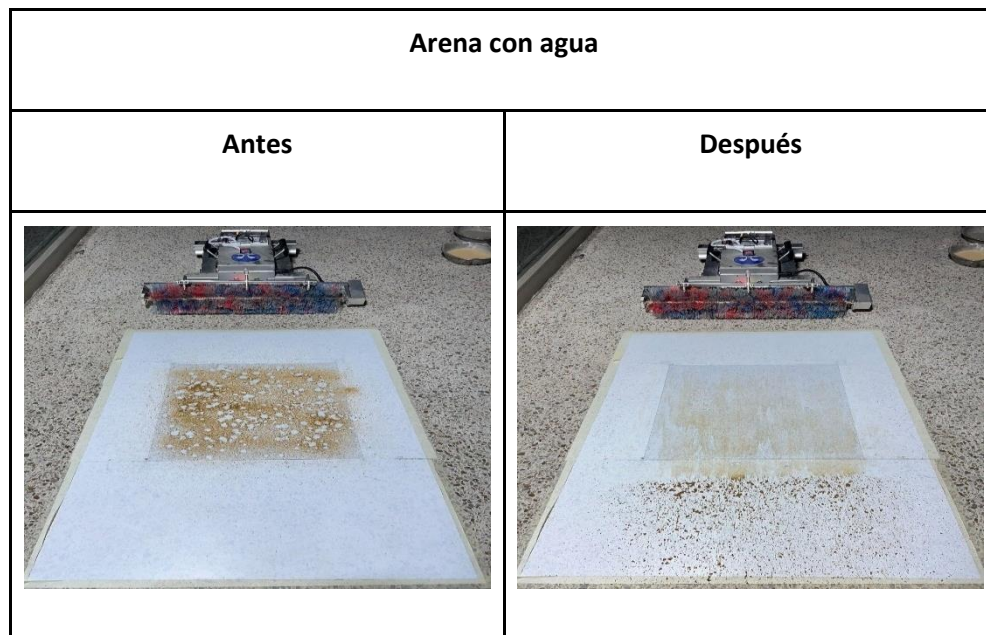
Fuente. Propia

Ilustración 15



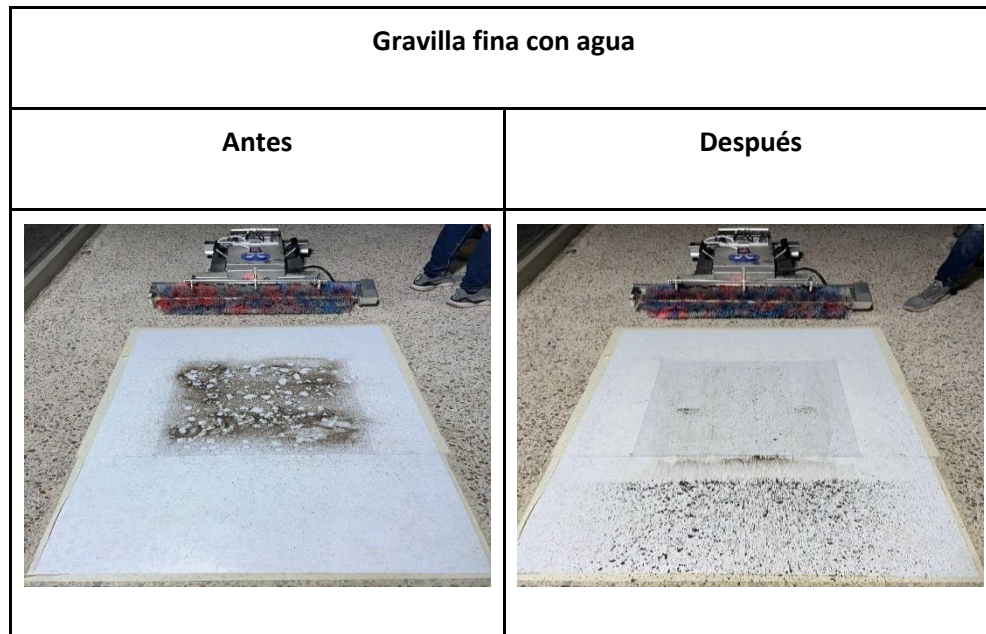
Fuente. Propia

Ilustración 16



Fuente. Propia

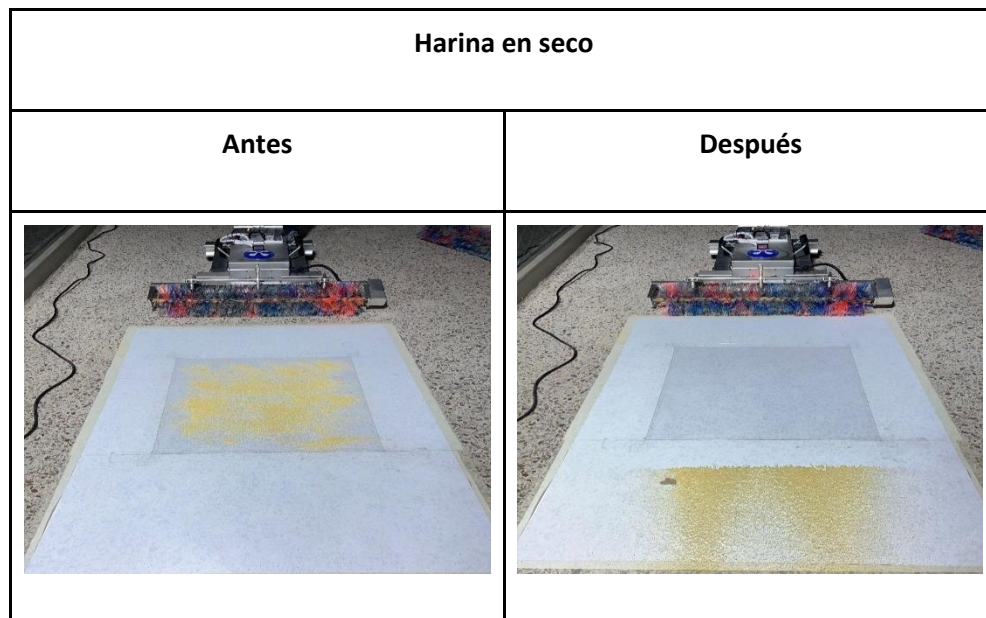
Ilustración 11



• Fuente. Propia

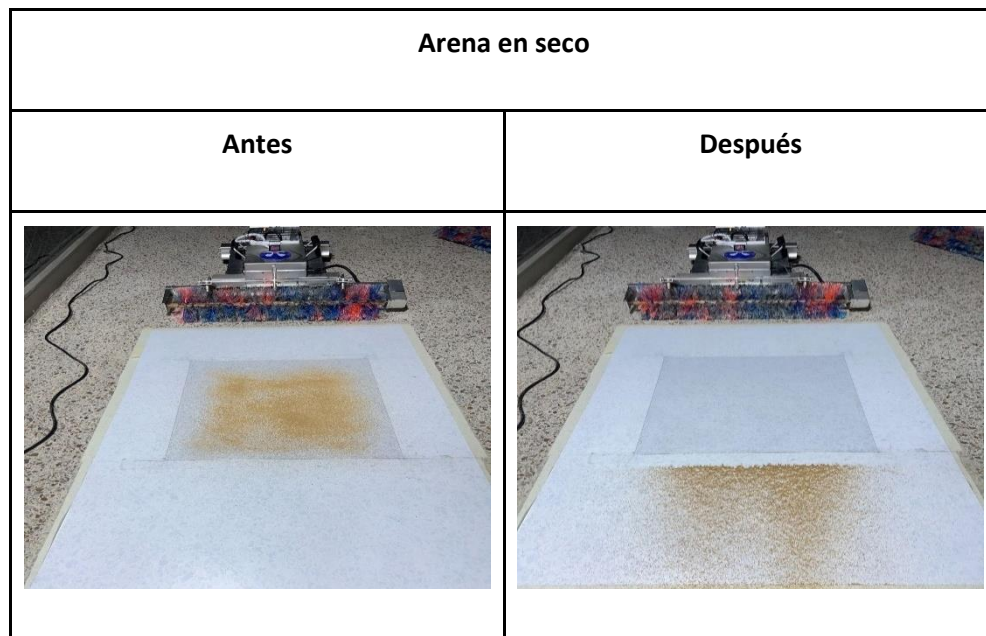
• **CEPILLO PATRÓN ESPIRAL**

Ilustración 18



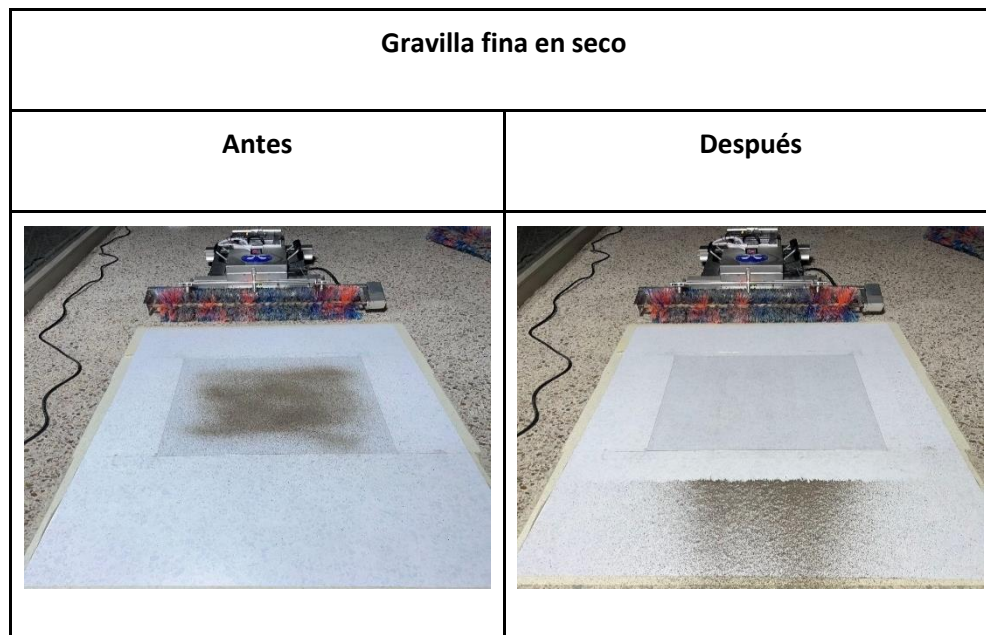
Fuente. Propia

Ilustración 19



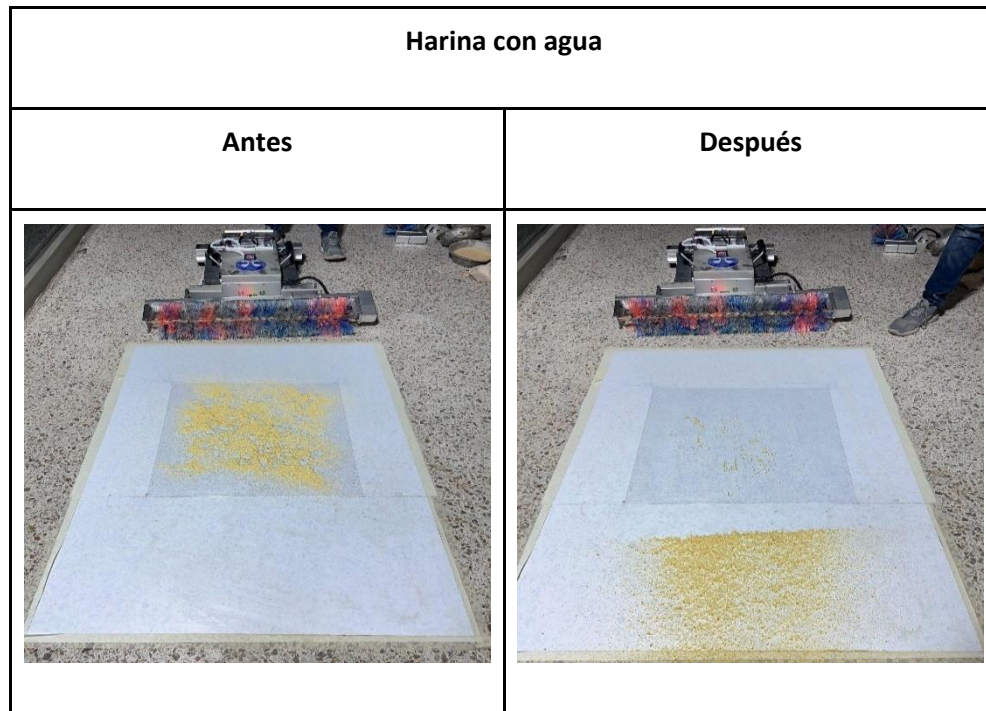
Fuente. Propia

Ilustración 20



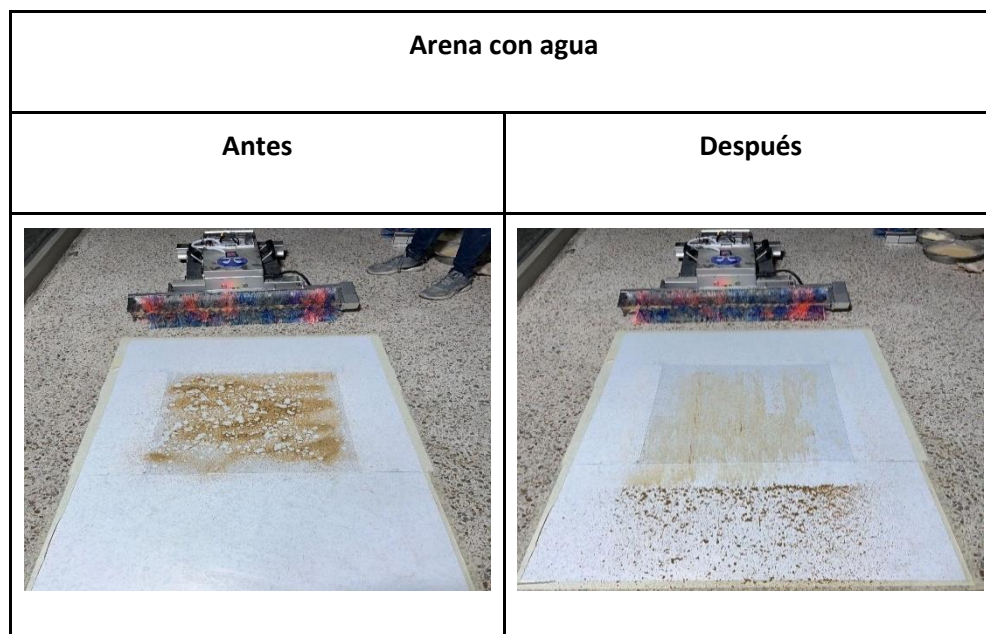
Fuente. Propia

Ilustración 21



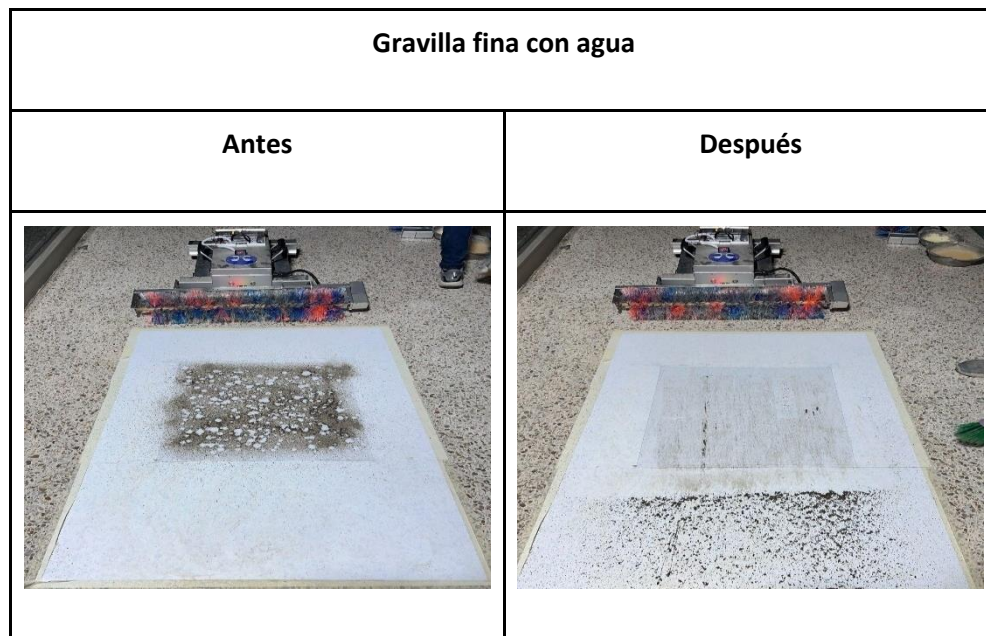
Fuente. Propia

Ilustración 22



Fuente. Propia

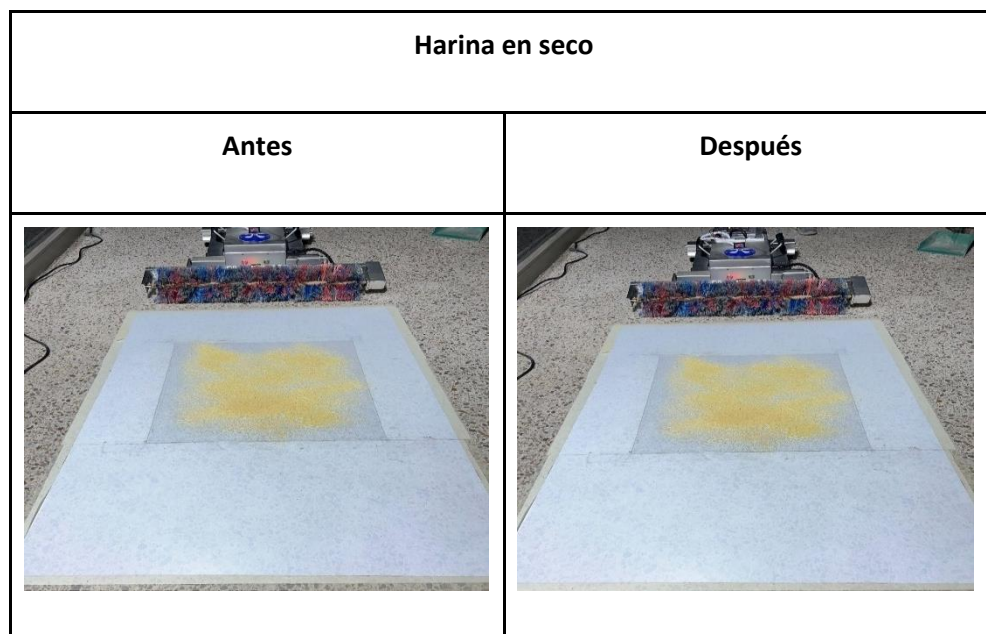
Ilustración 23



• Fuente. *Propia*

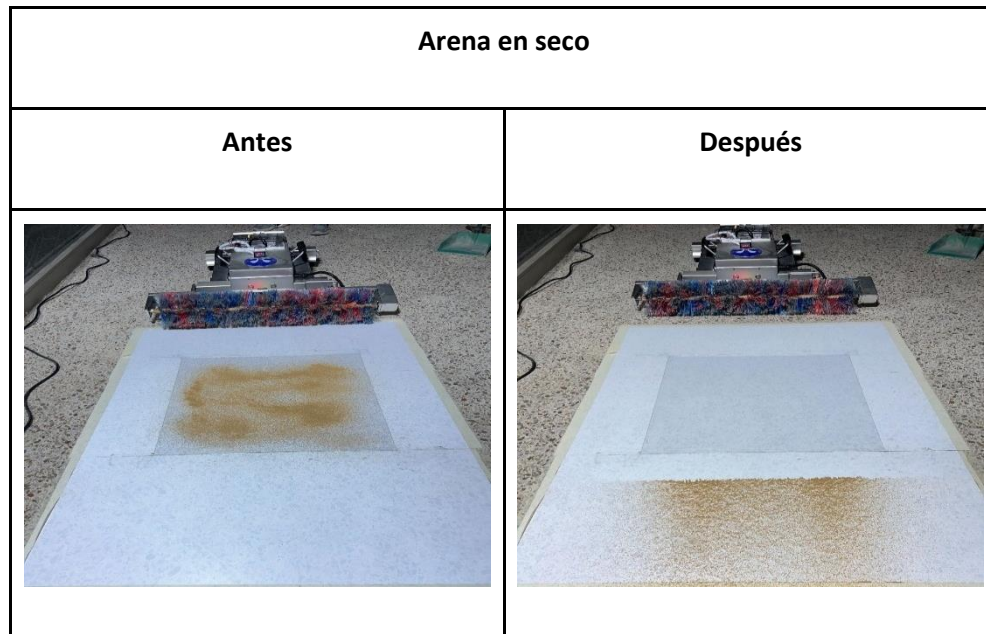
• **CEPILLO PATRÓN HELICOIDAL**

Ilustración 24



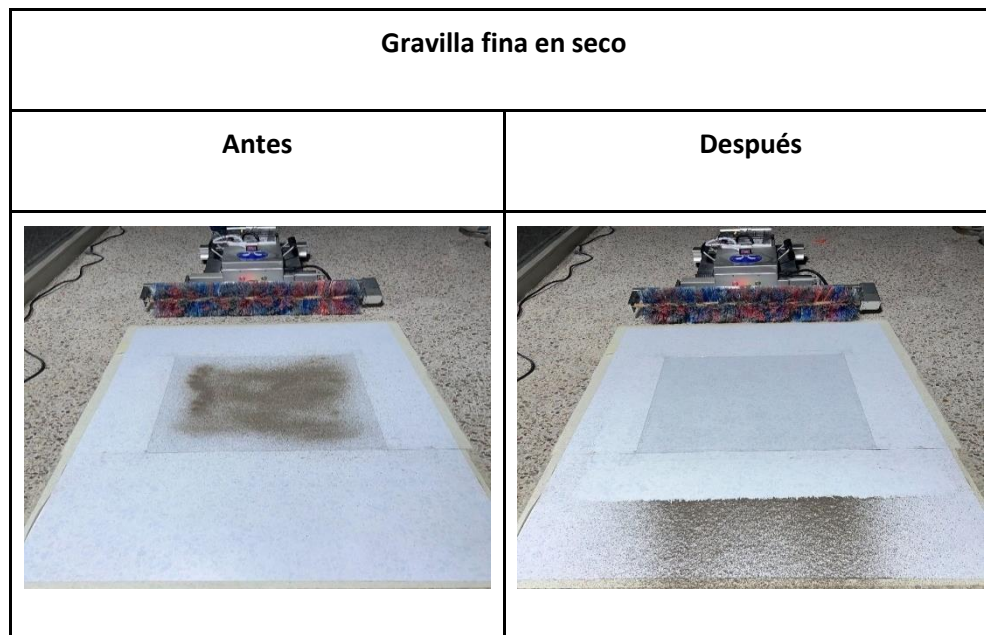
Fuente. *Propia*

Ilustración 24



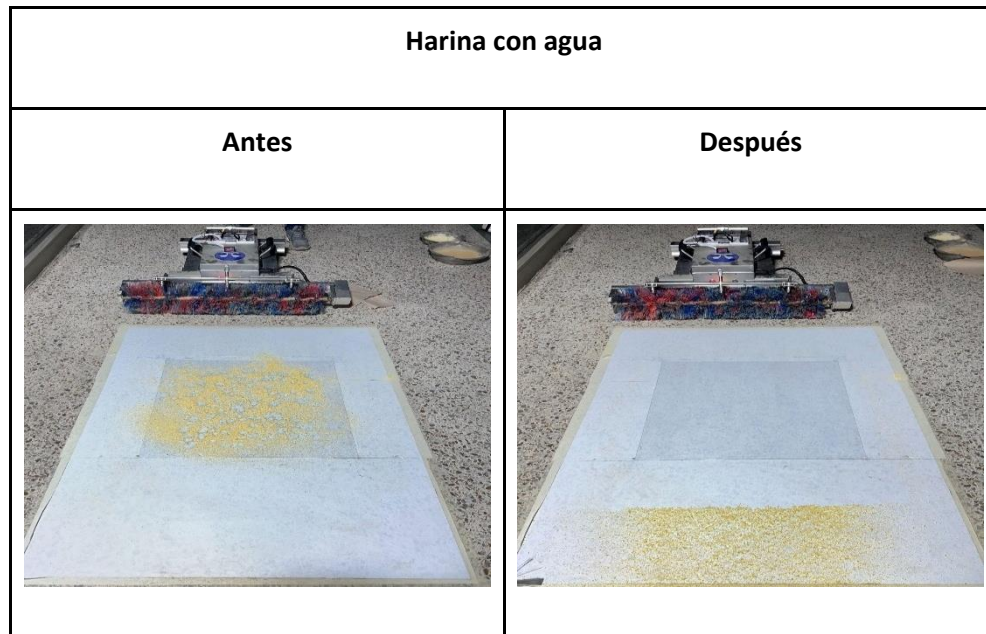
Fuente. Propia

Ilustración 25



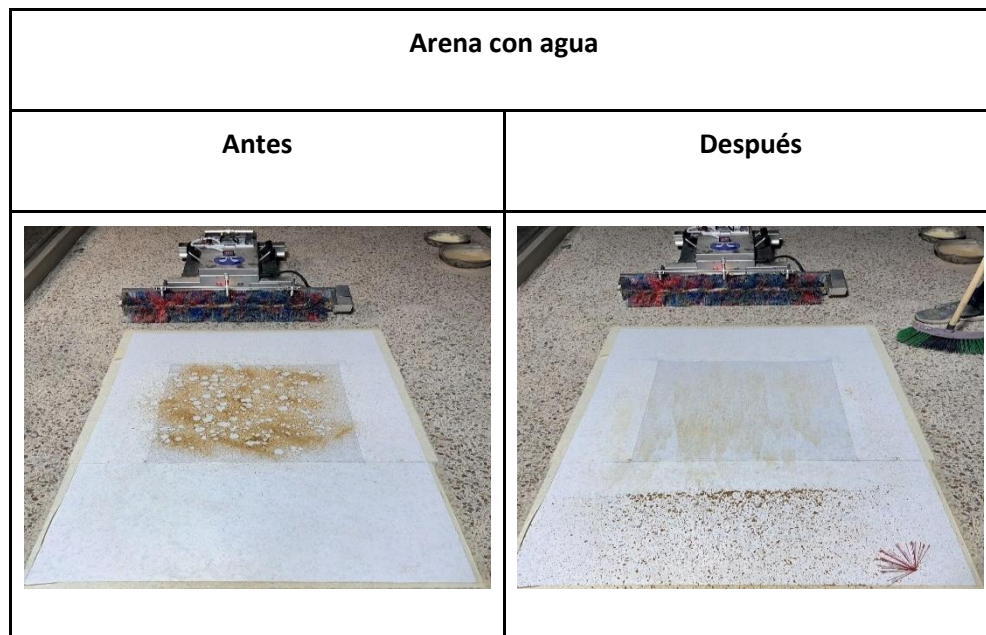
Fuente. Propia

Ilustración 26



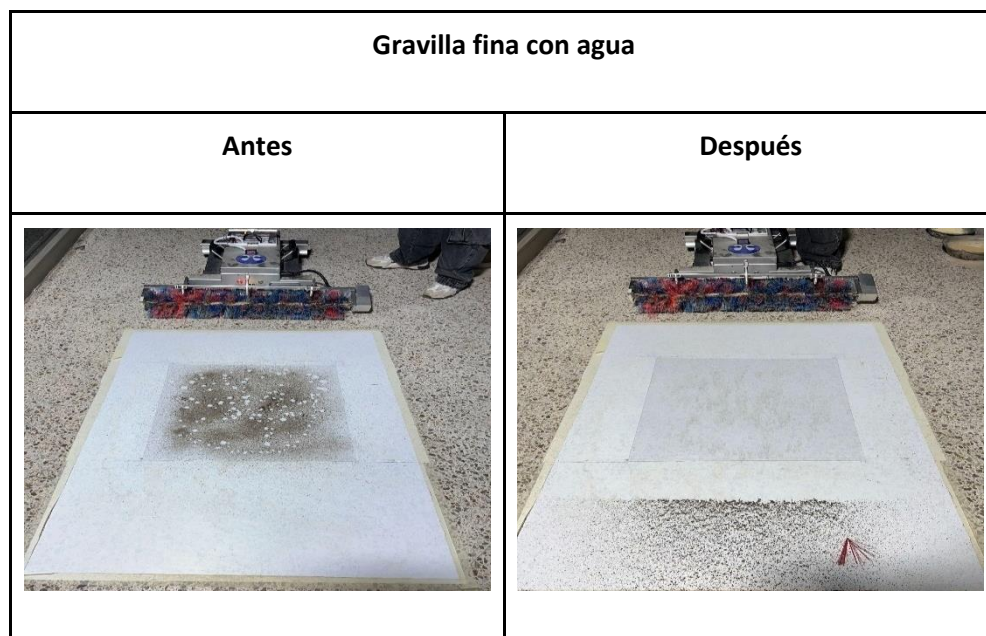
Fuente. Propia

Ilustración 27



Fuente. Propia

Ilustración 28



Fuente. *Propia*

ANEXO B. PROCESAMIENTO DE IMAGEN

En este anexo se presentan los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas, documentados a través del código utilizado y respaldados con imágenes ilustrativas. Cada fragmento de código y cada imagen muestran los procesos de cálculo, simulación y análisis que sustentan los hallazgos del proyecto, proporcionando claridad en los métodos aplicados y facilitando la comprensión y replicación de los resultados obtenidos.

Ilustración 1

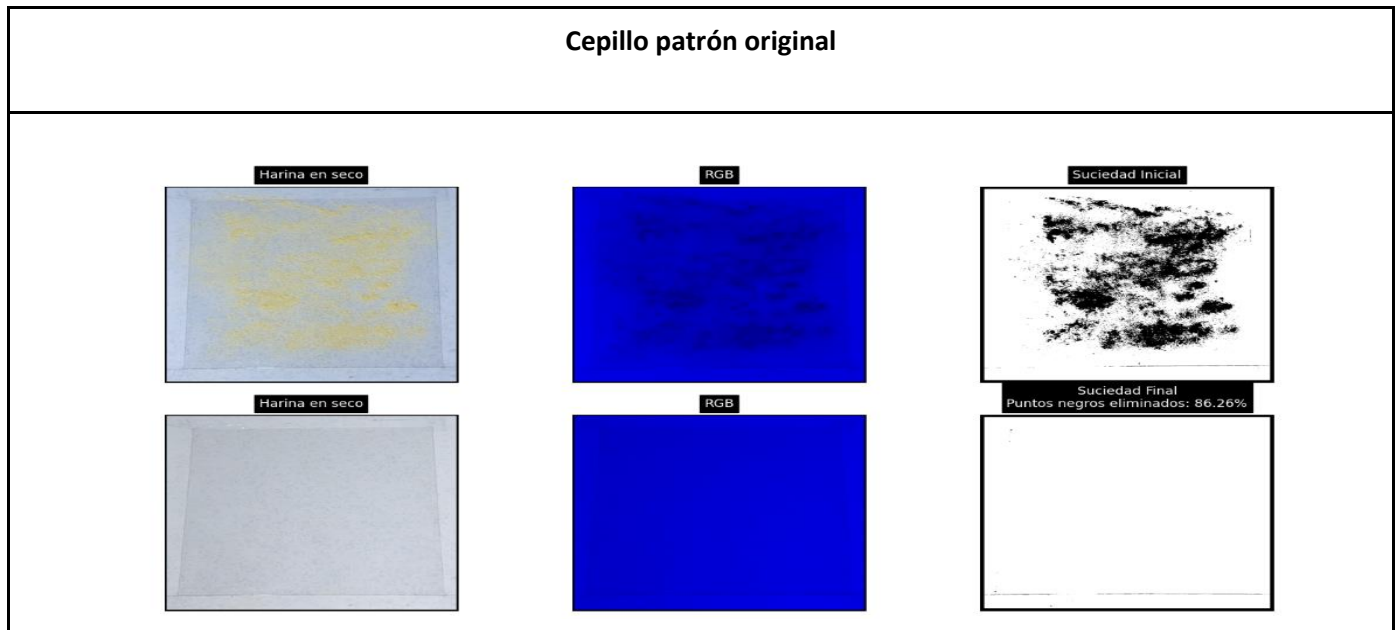


Ilustración 2

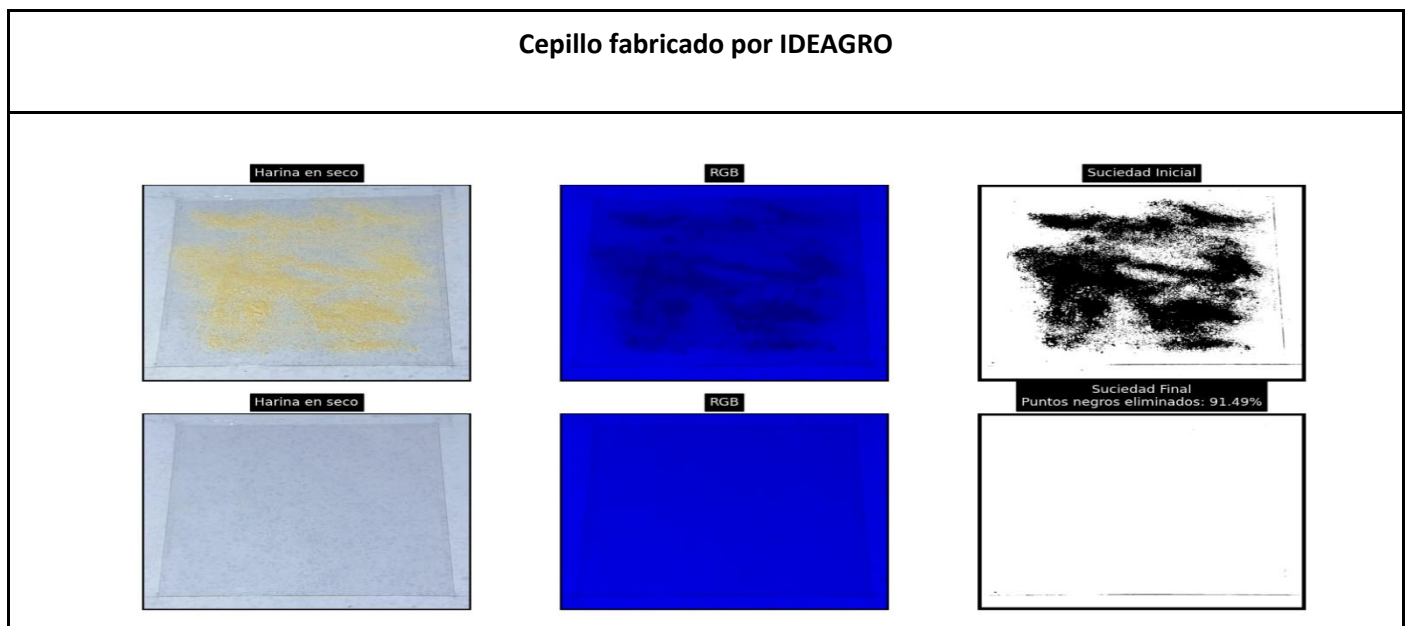
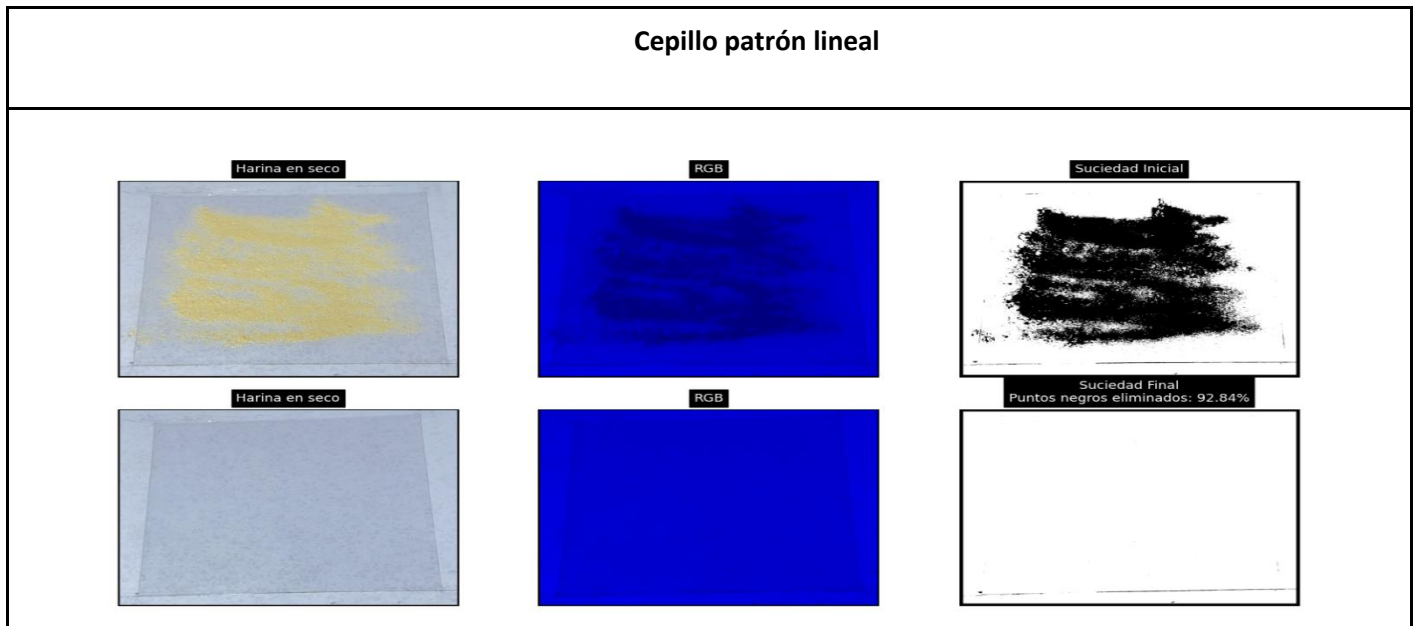
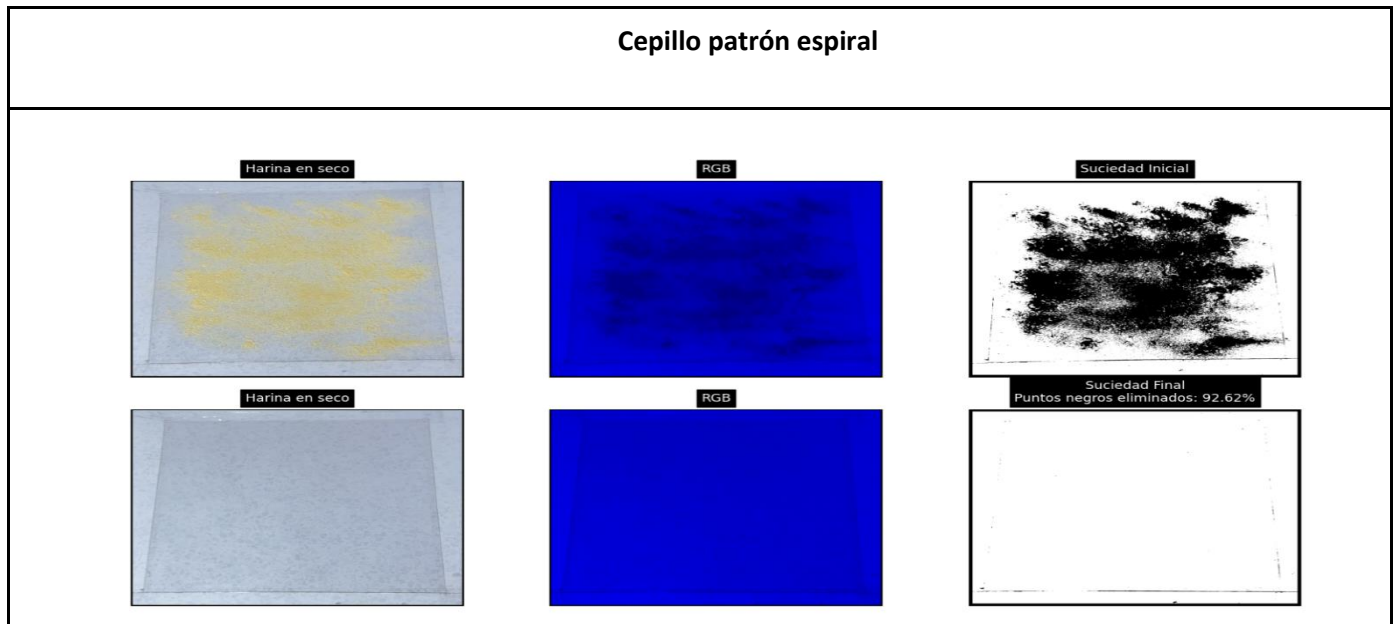


Ilustración 3



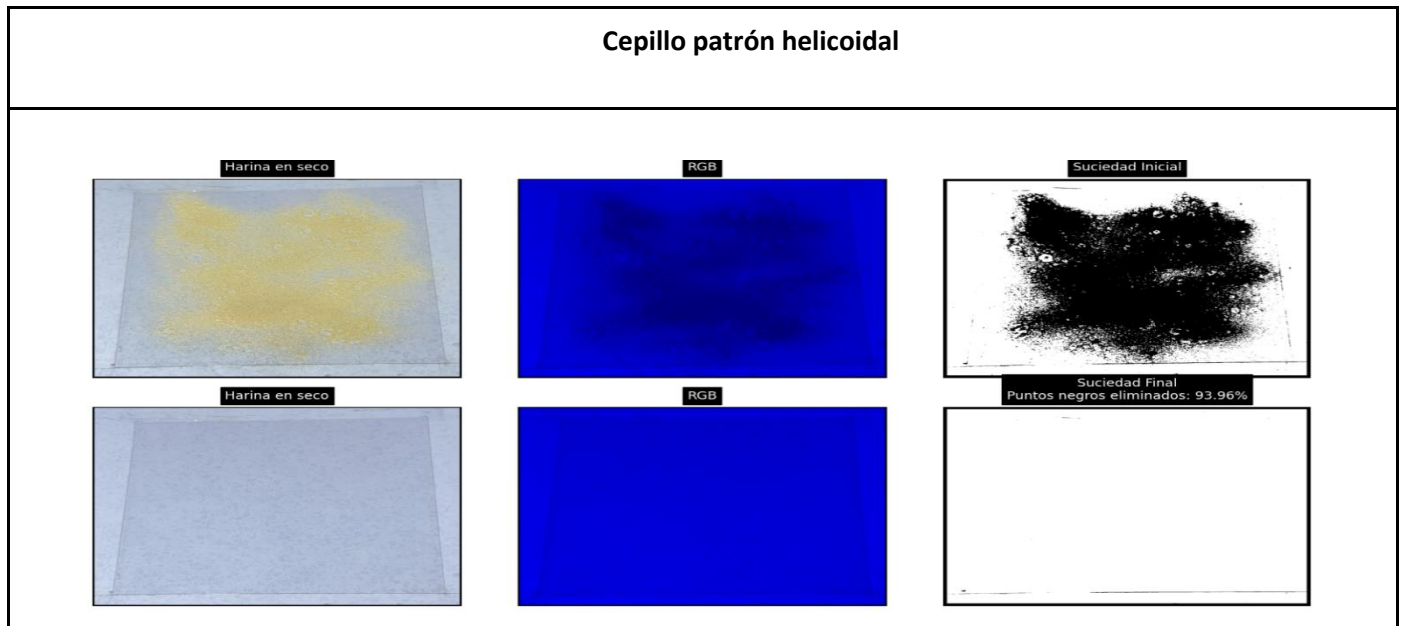
Fuente. *Propia*

Ilustración 4



Fuente. *Propia*

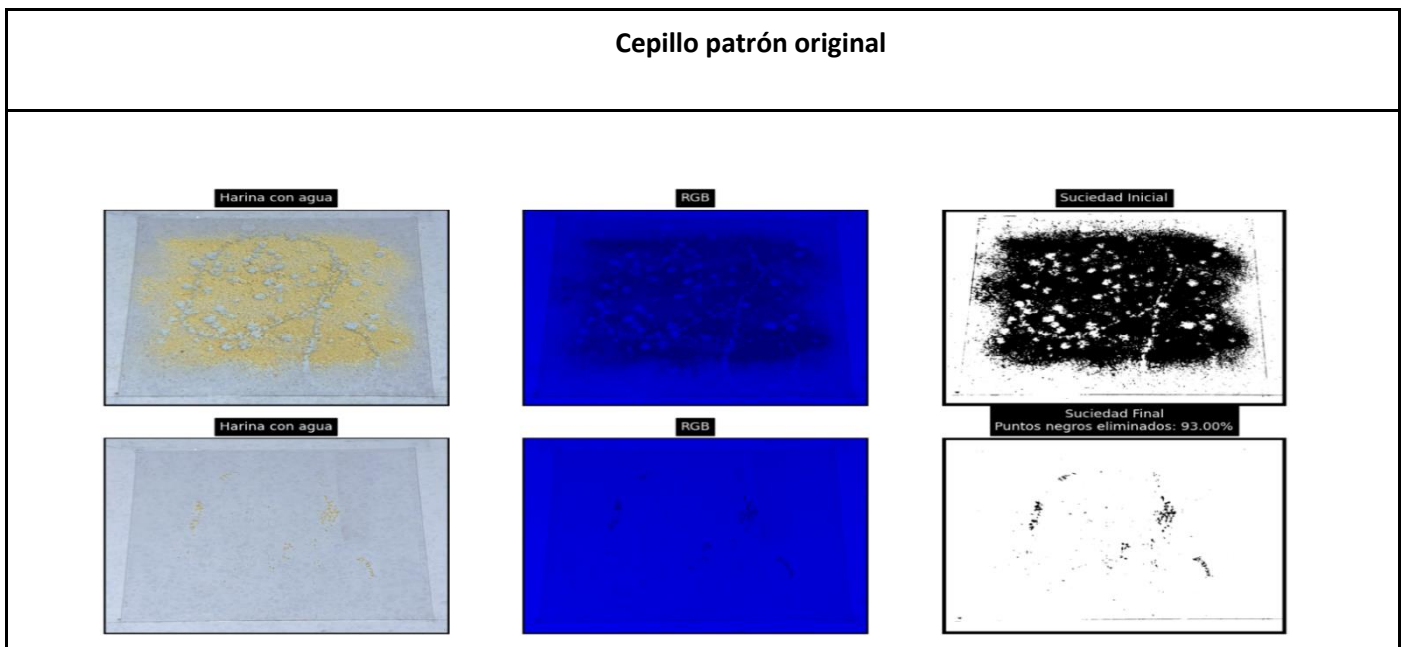
Ilustración 5



- Fuente. *Propia*

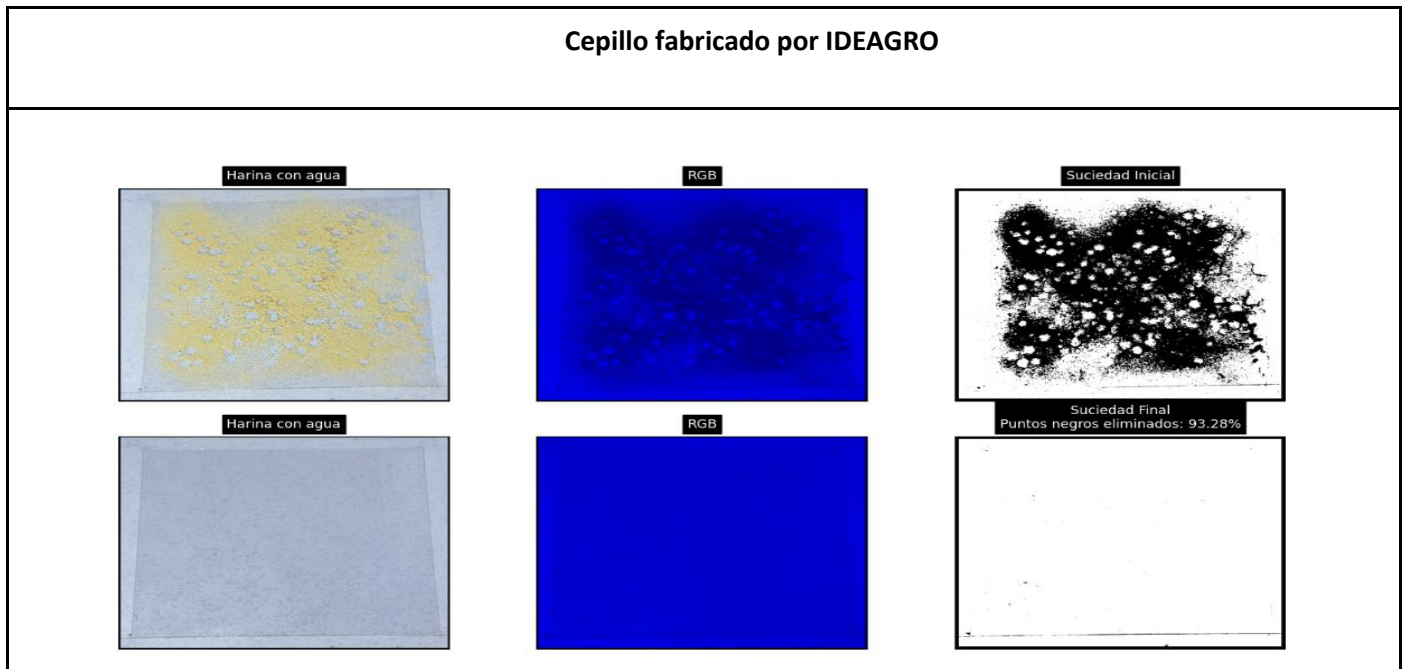
• PRUEBAS HARINA CON AGUA

Ilustración 6



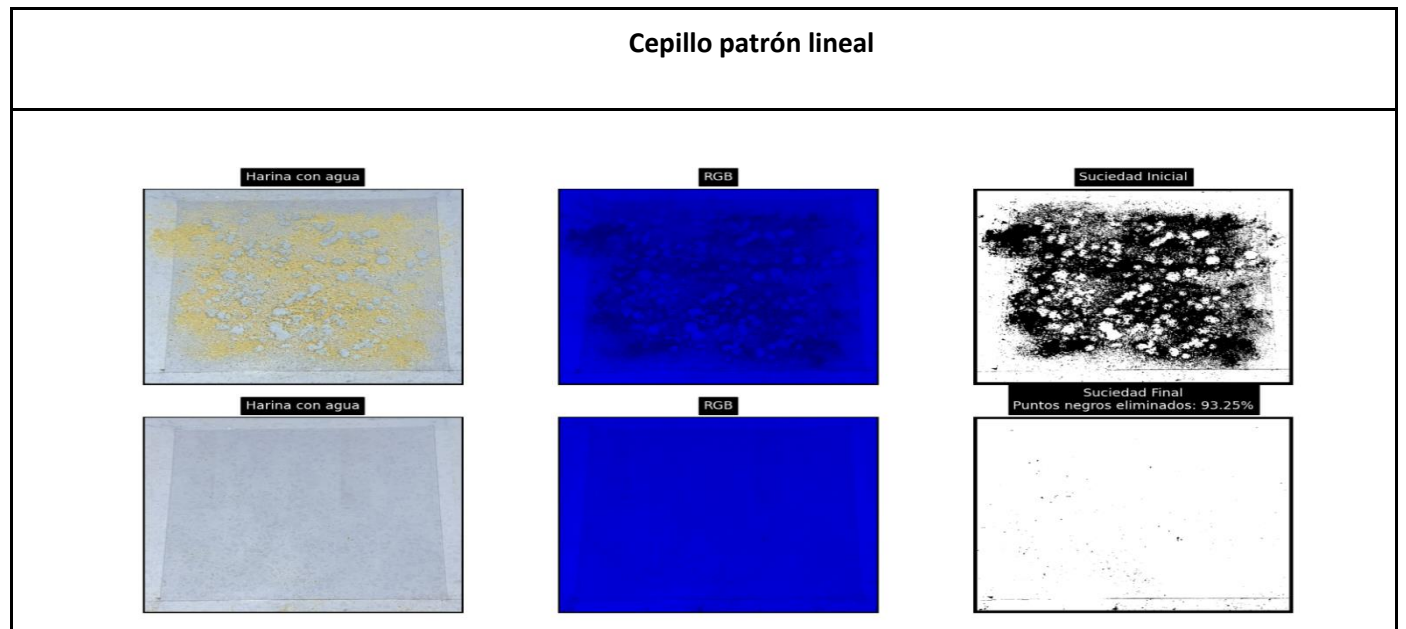
- Fuente. *Propia*

Ilustración 7



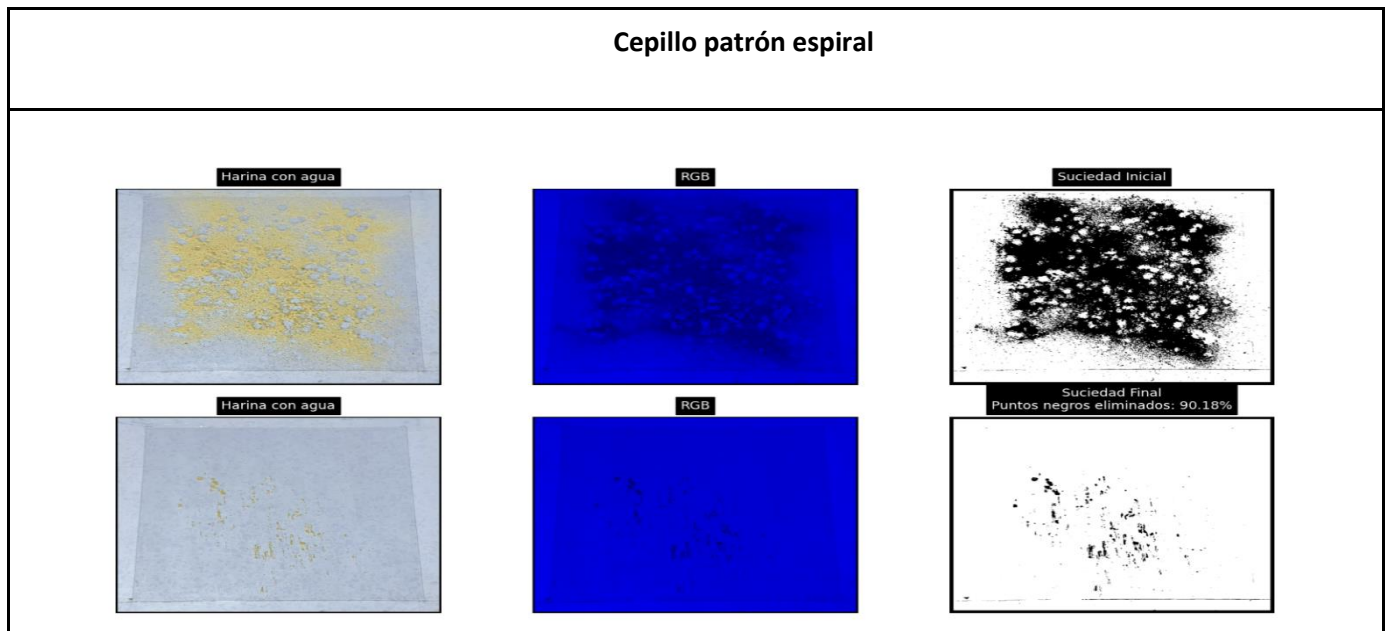
Fuente. *Propia*

Ilustración 8



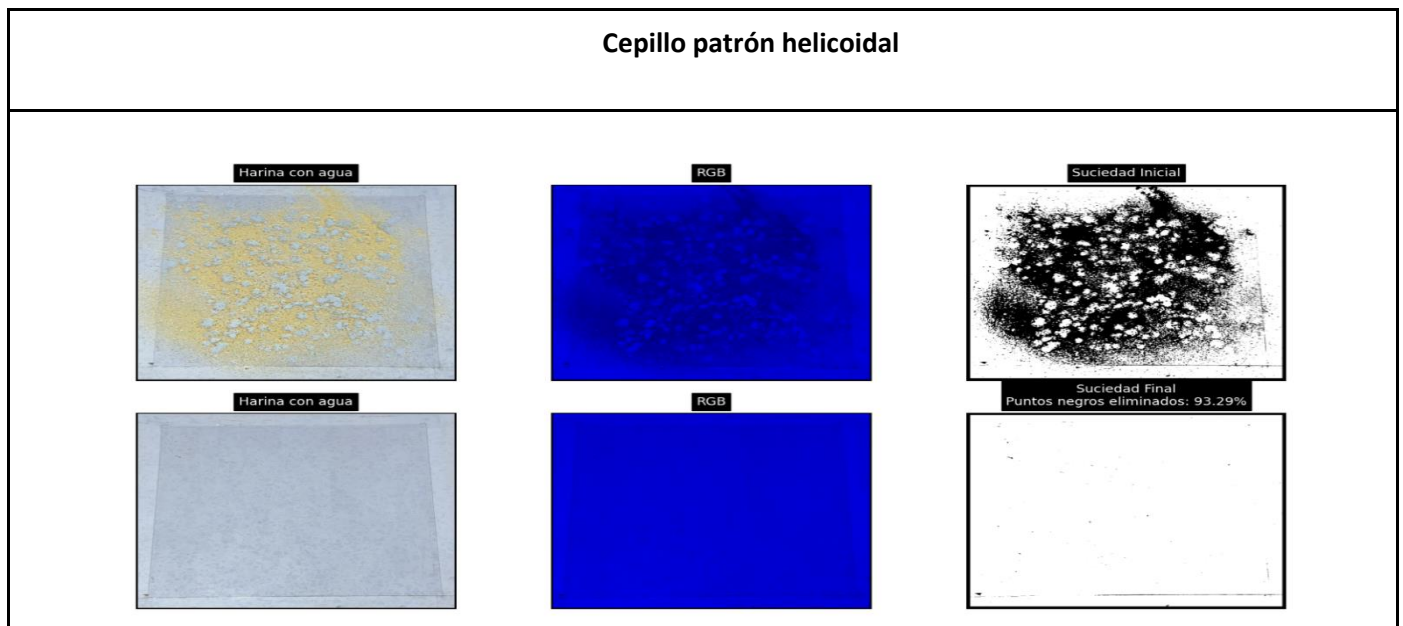
Fuente. *Propia*

Ilustración 9



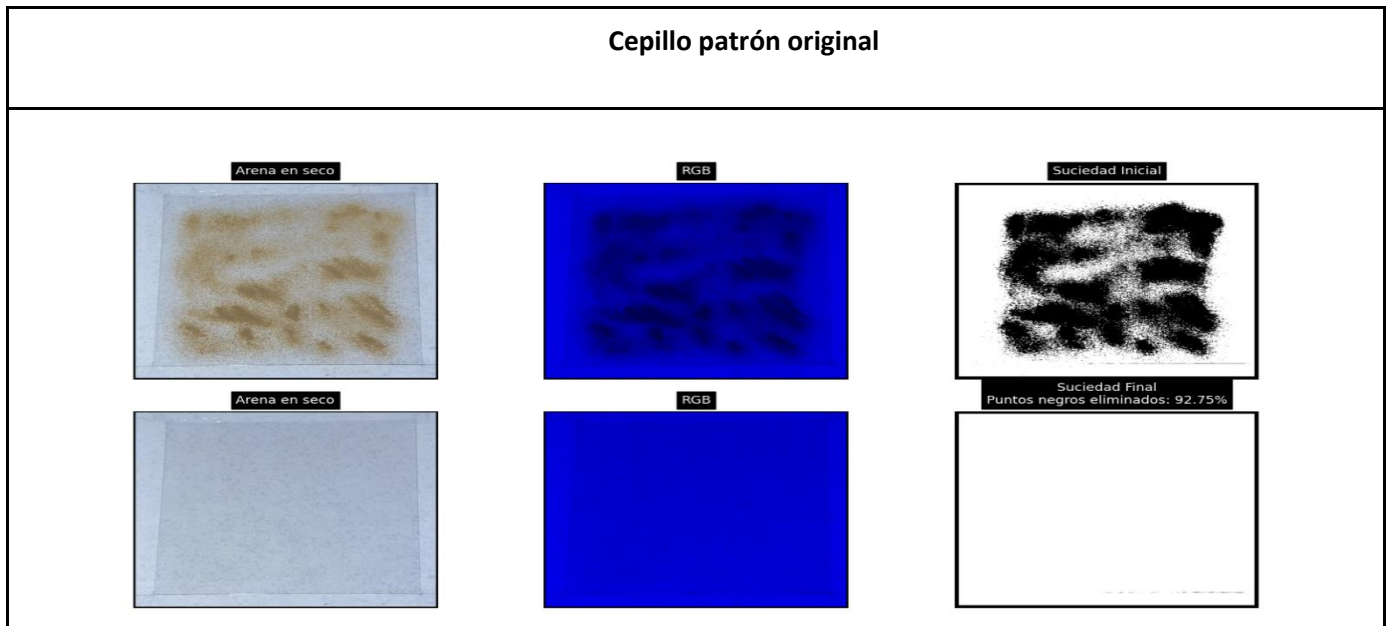
Fuente. Propia

Ilustración 10



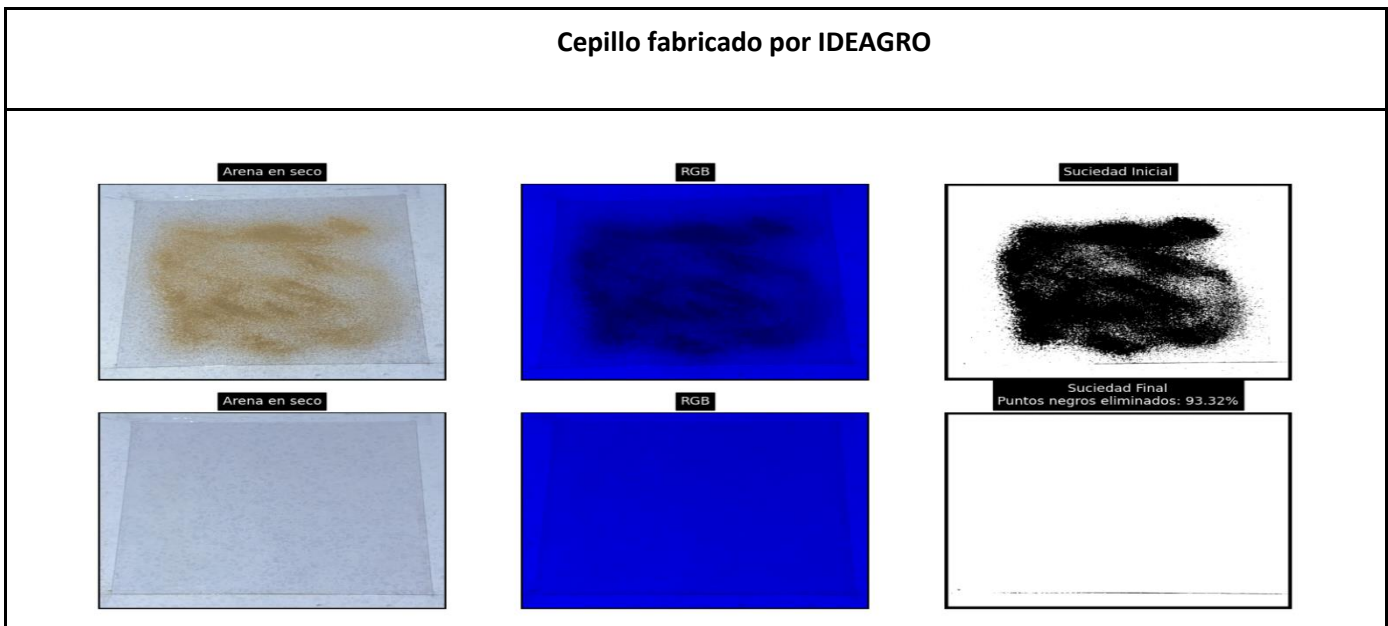
Fuente. Propia

Ilustración 11



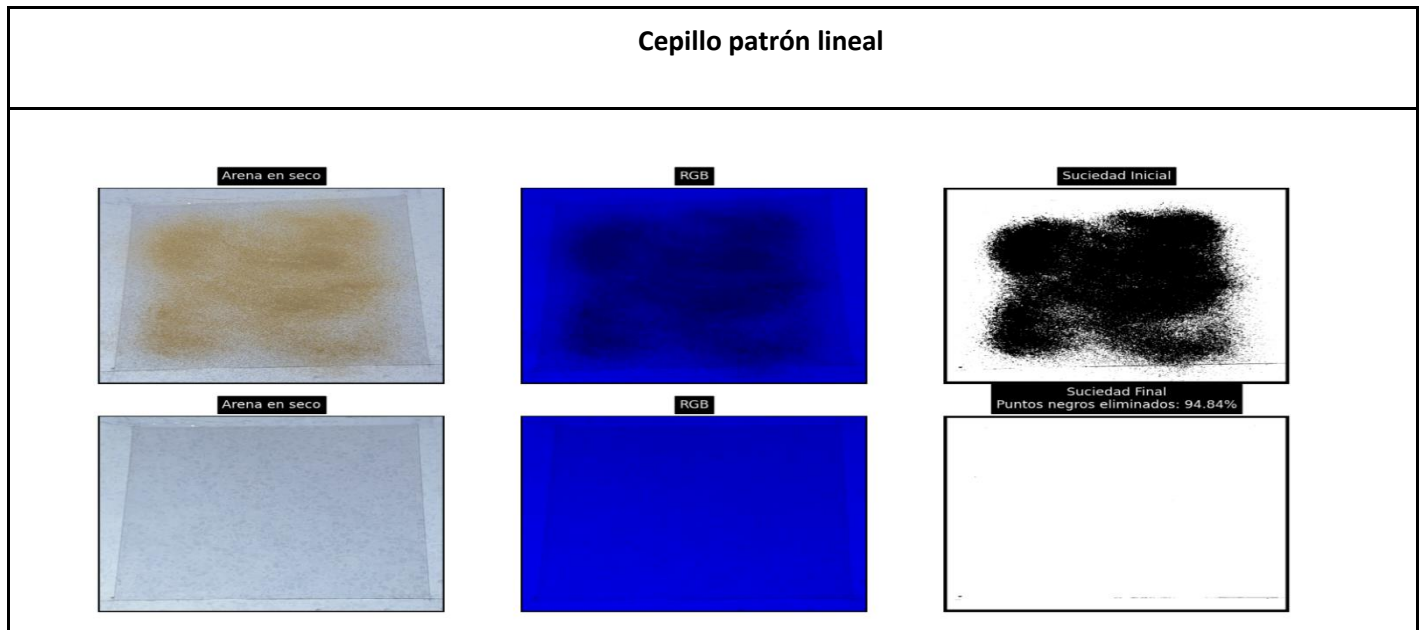
Fuente. Propia

Ilustración 12



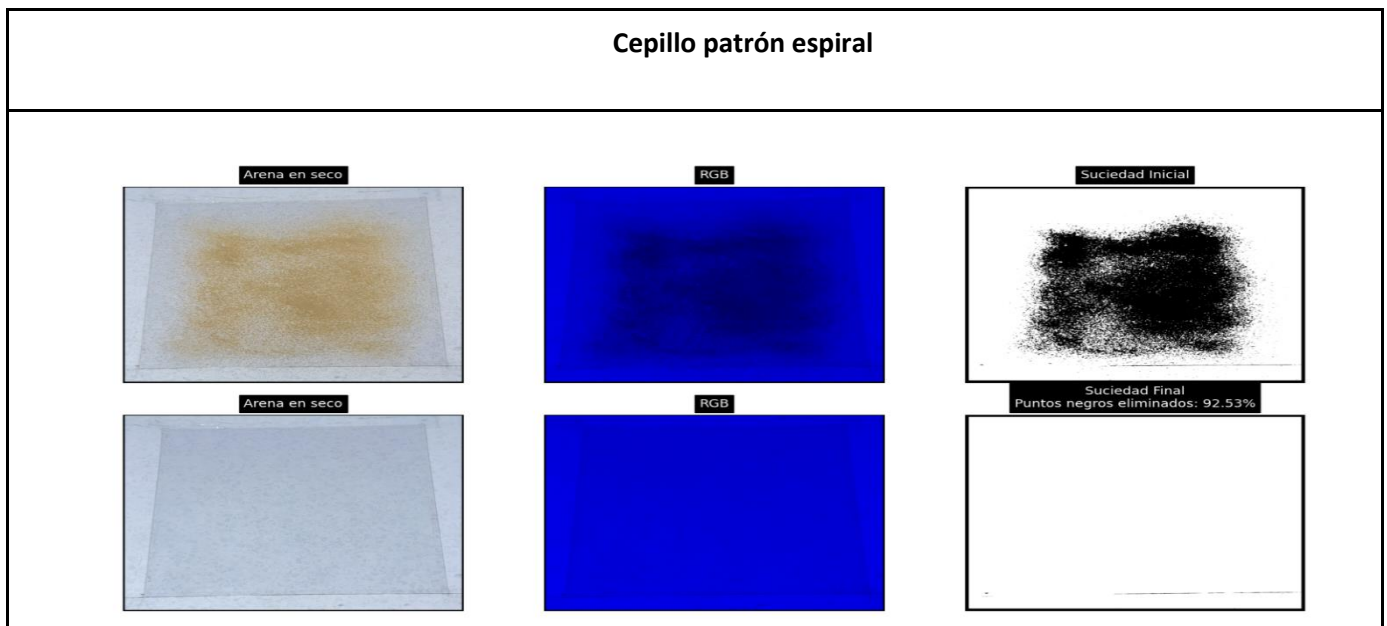
Fuente. Propia

Ilustración 13



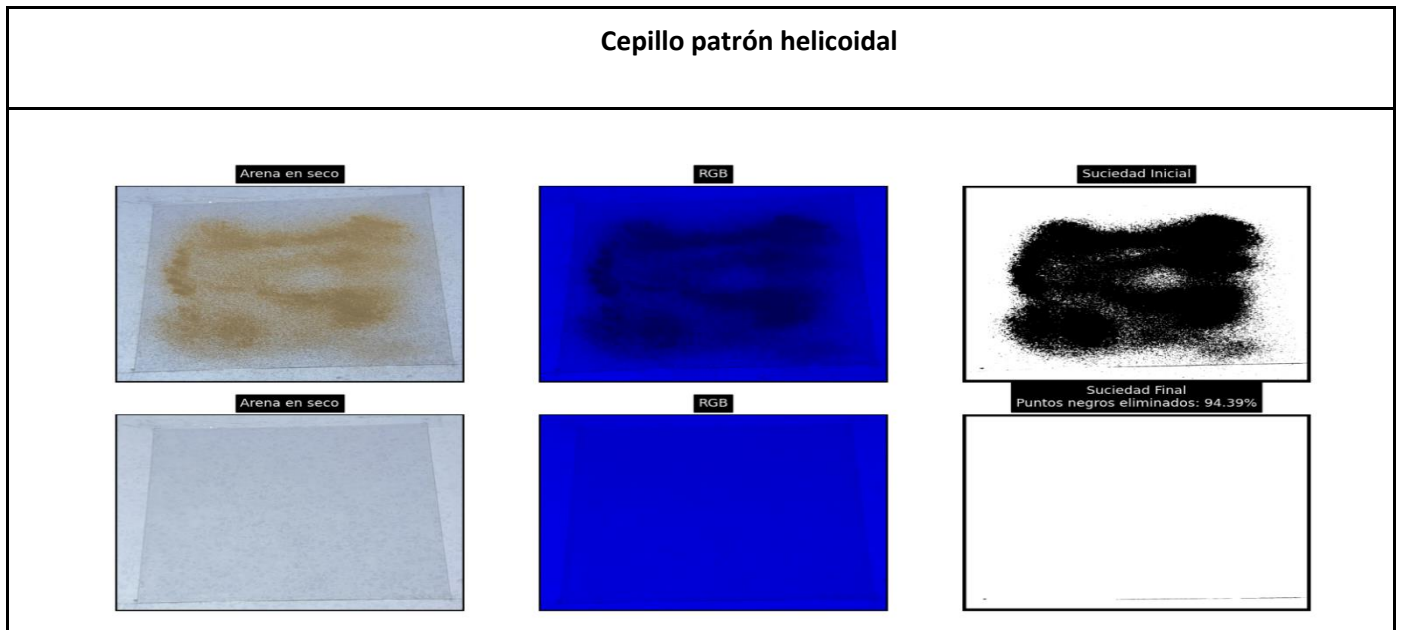
Fuente. Propia

Ilustración 14



Fuente. Propia

Ilustración 15



• **PRUEBAS ARENA CON AGUA**

Ilustración 16

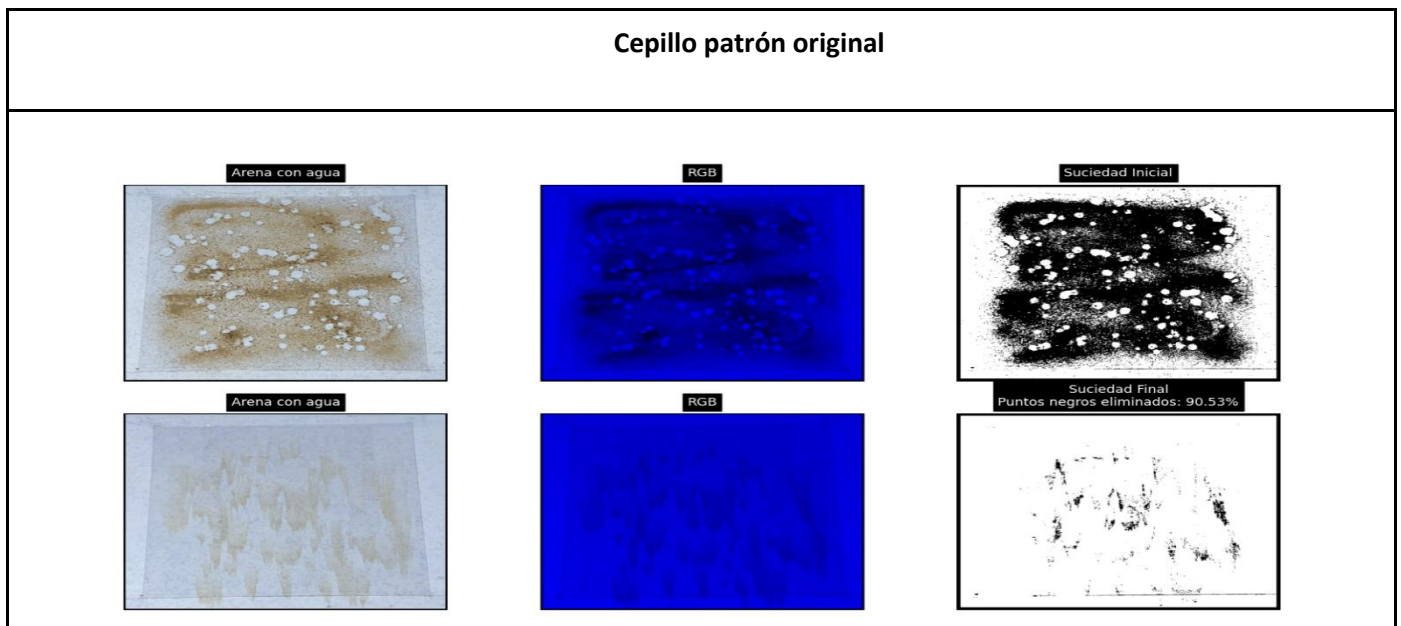


Ilustración 16

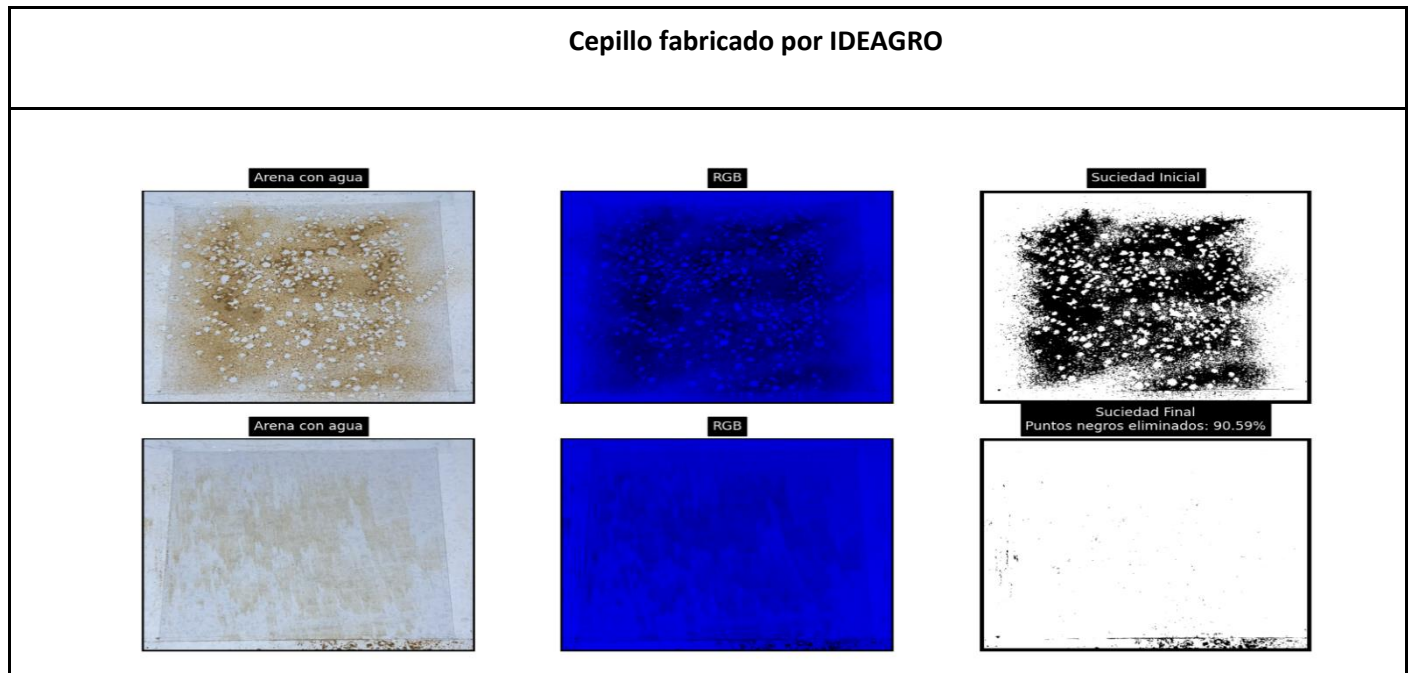


Ilustración 12

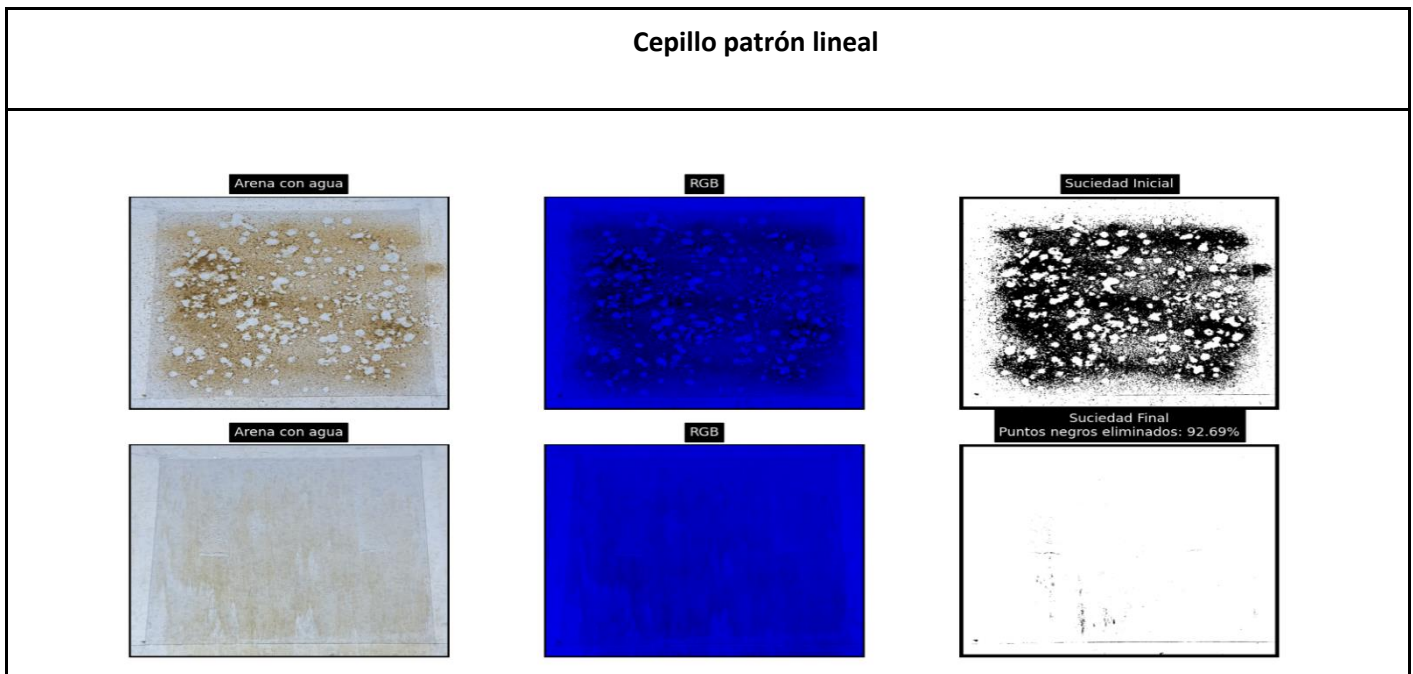
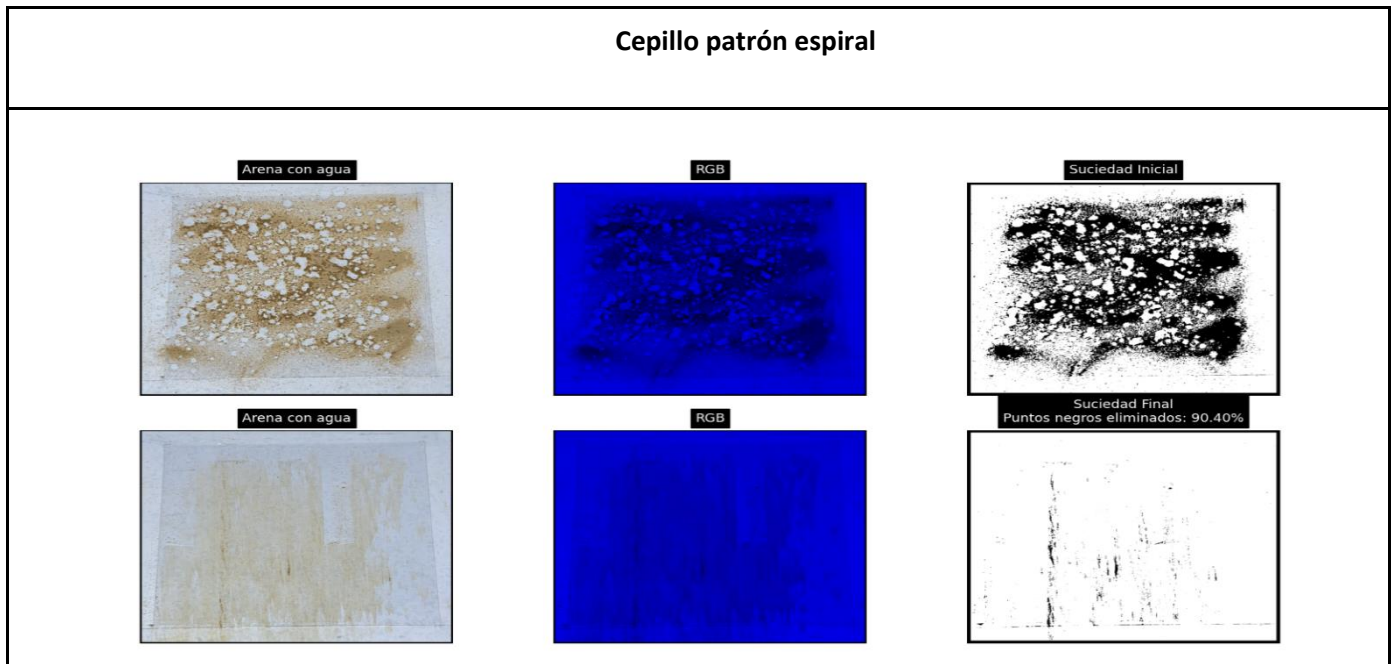
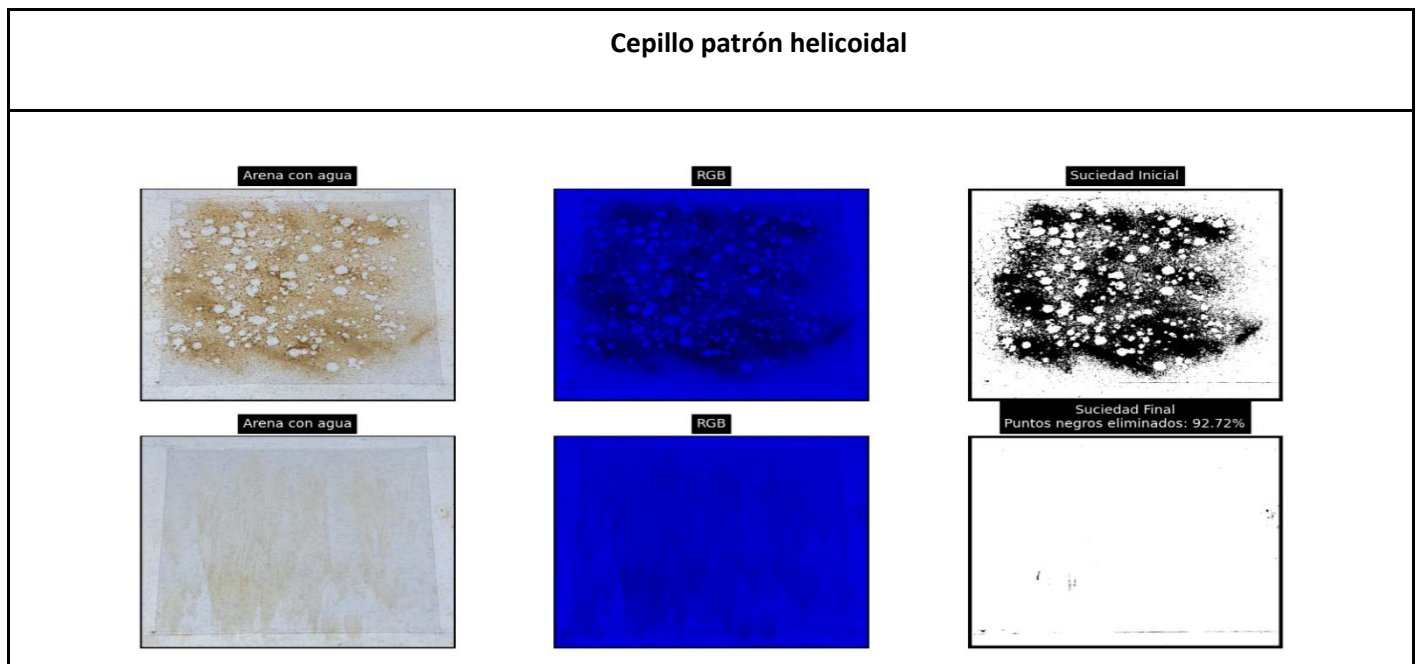


Ilustración 18



Fuente. Propia

Ilustración 19



• Fuente. Propia

- **PRUEBAS GRAVILLA EN SECO**

Ilustración 20

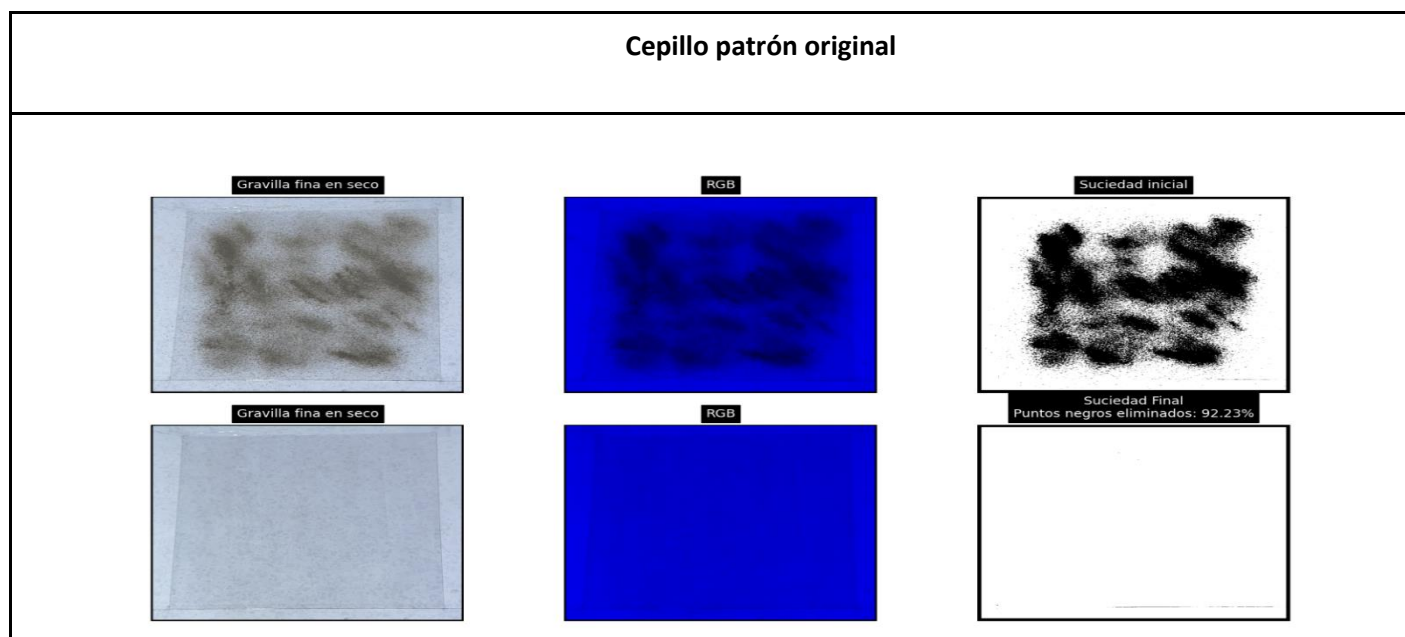


Ilustración 21

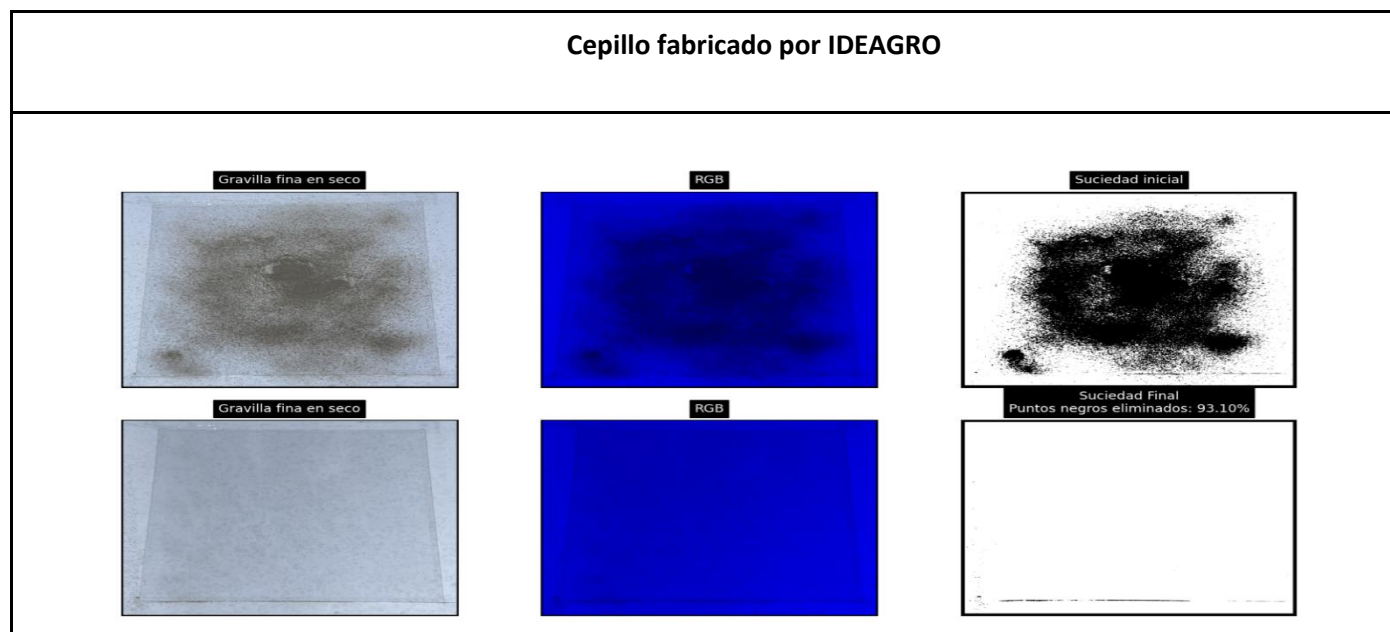
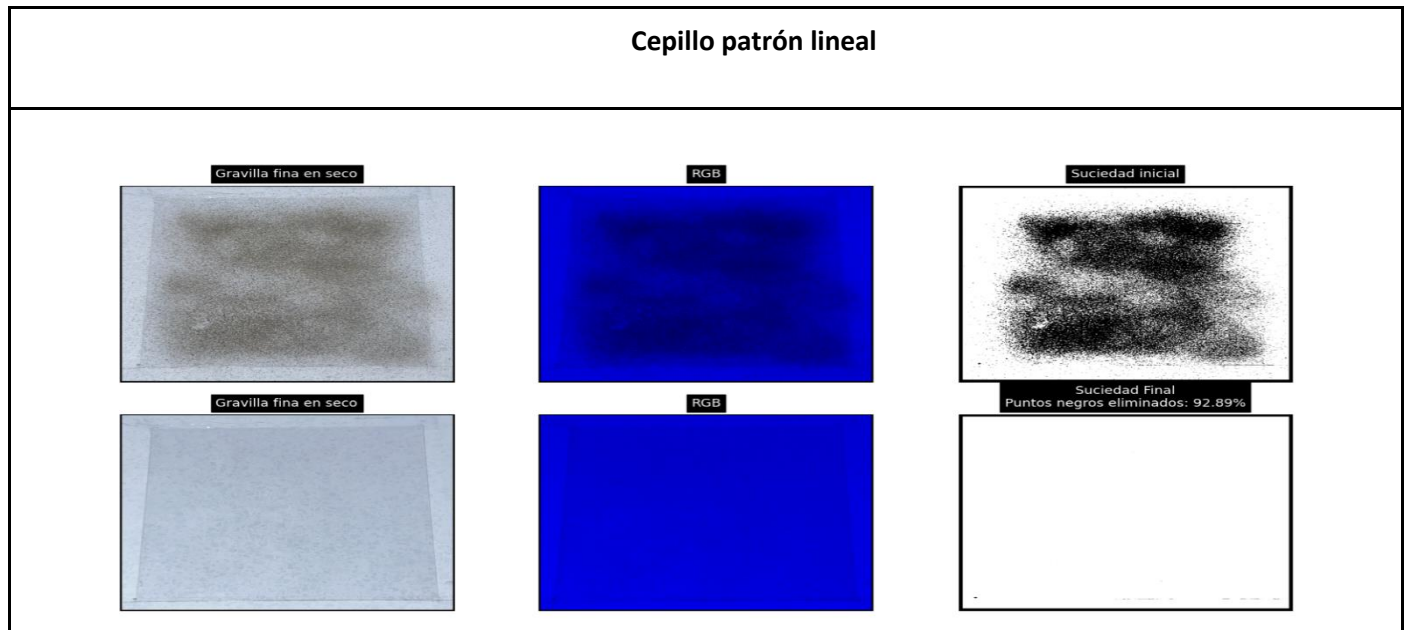
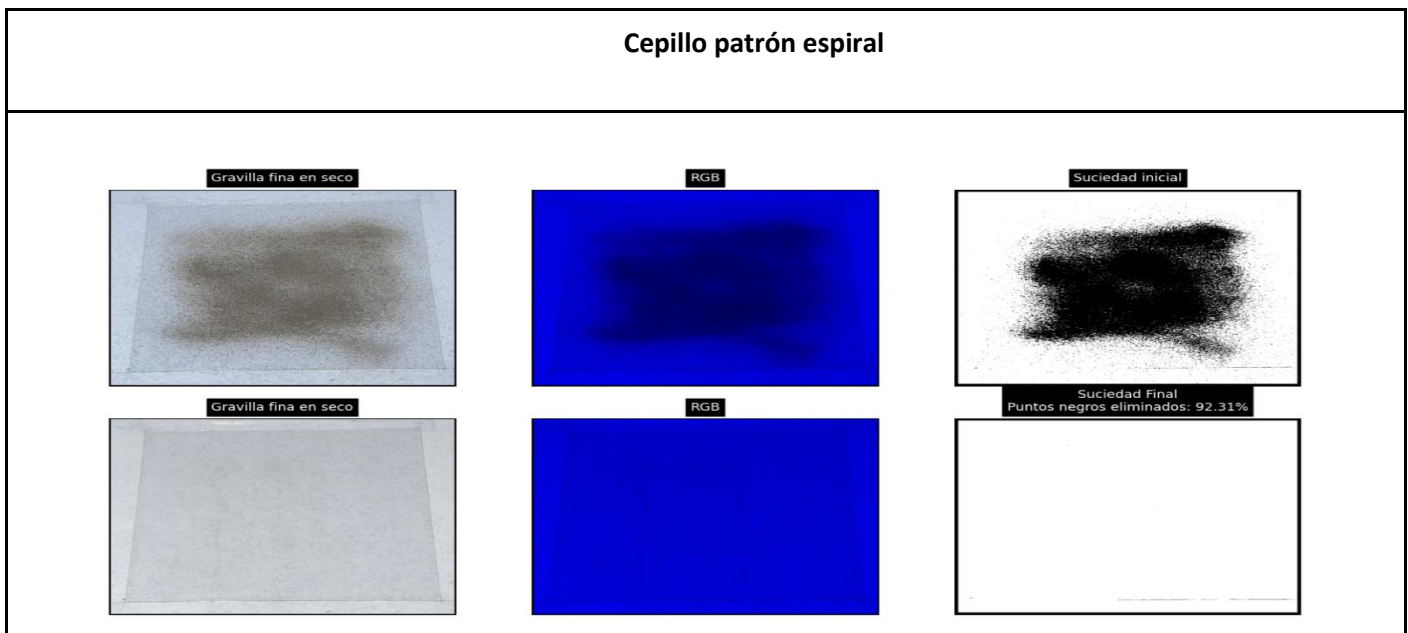


Ilustración 22



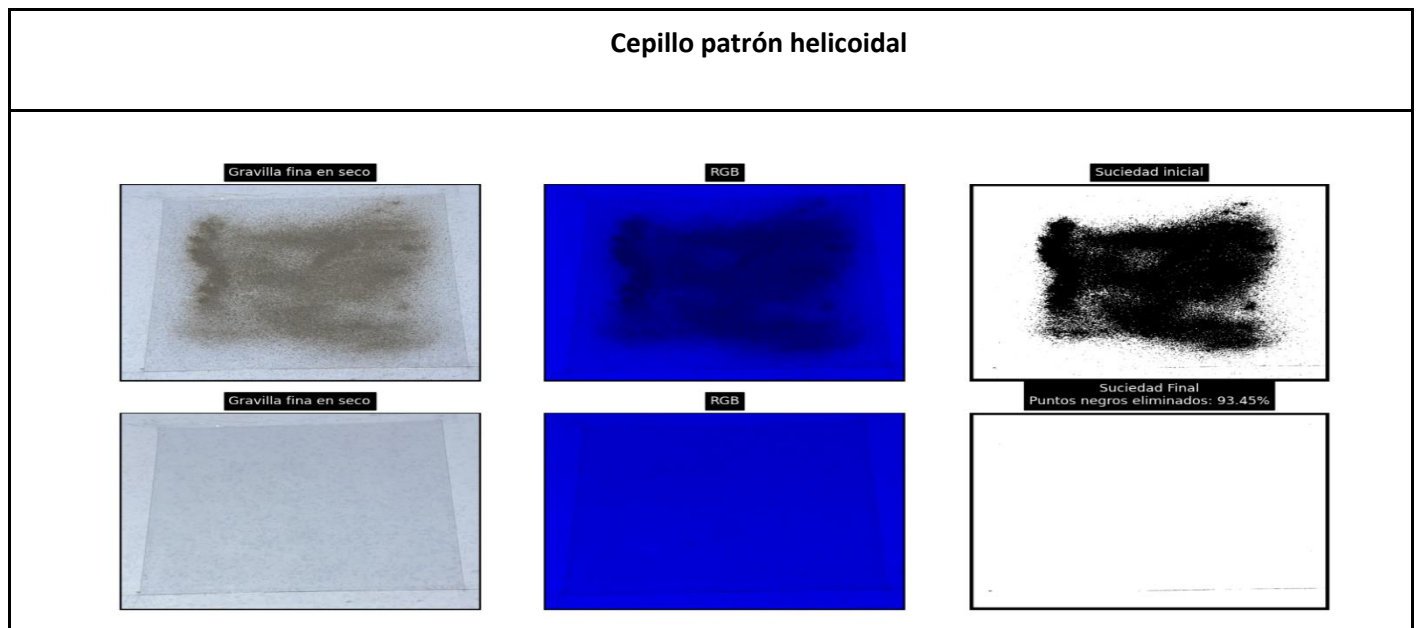
Fuente. Propia

Ilustración 23



Fuente. Propia

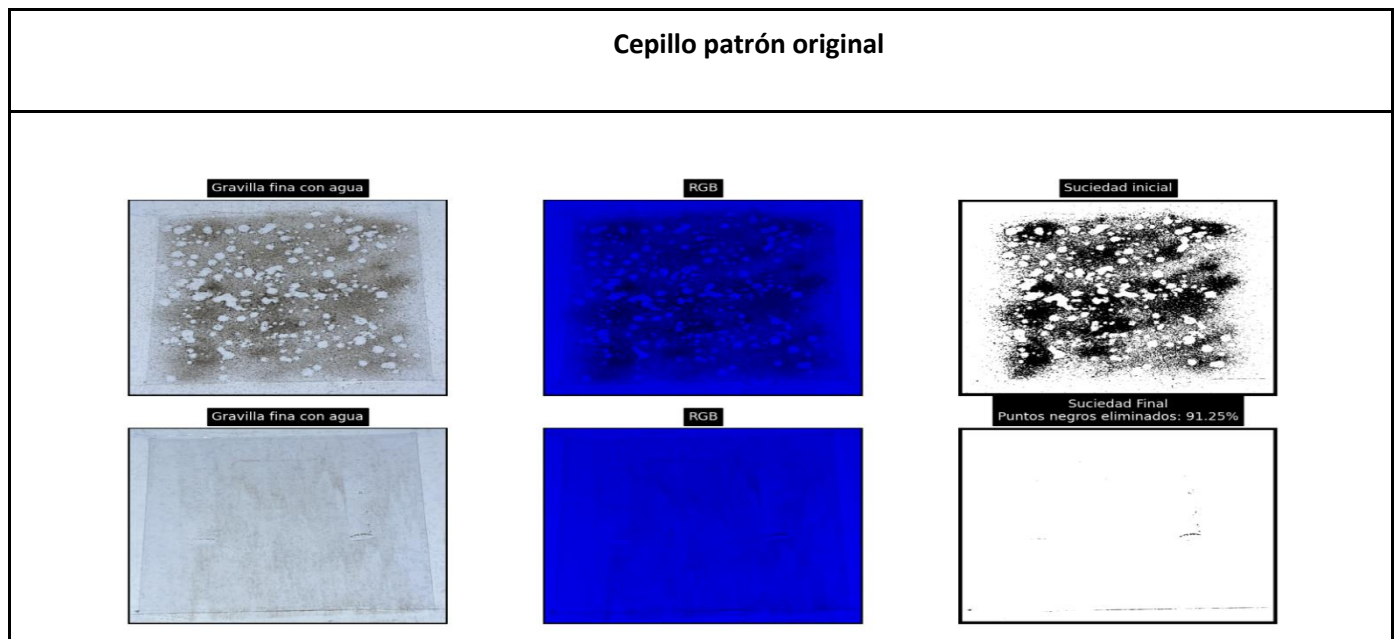
Ilustración 24



Fuente. *Propia*

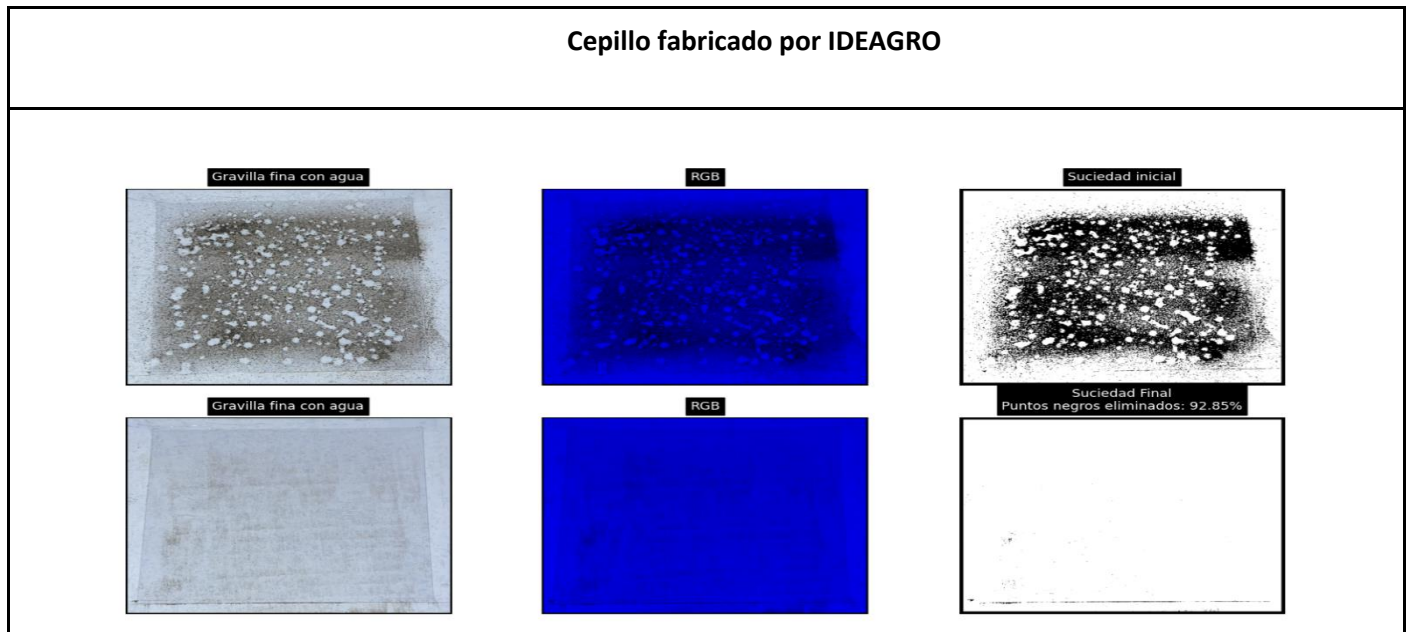
- **PRUEBAS GRAVILLA CON AGUA**

Ilustración 25



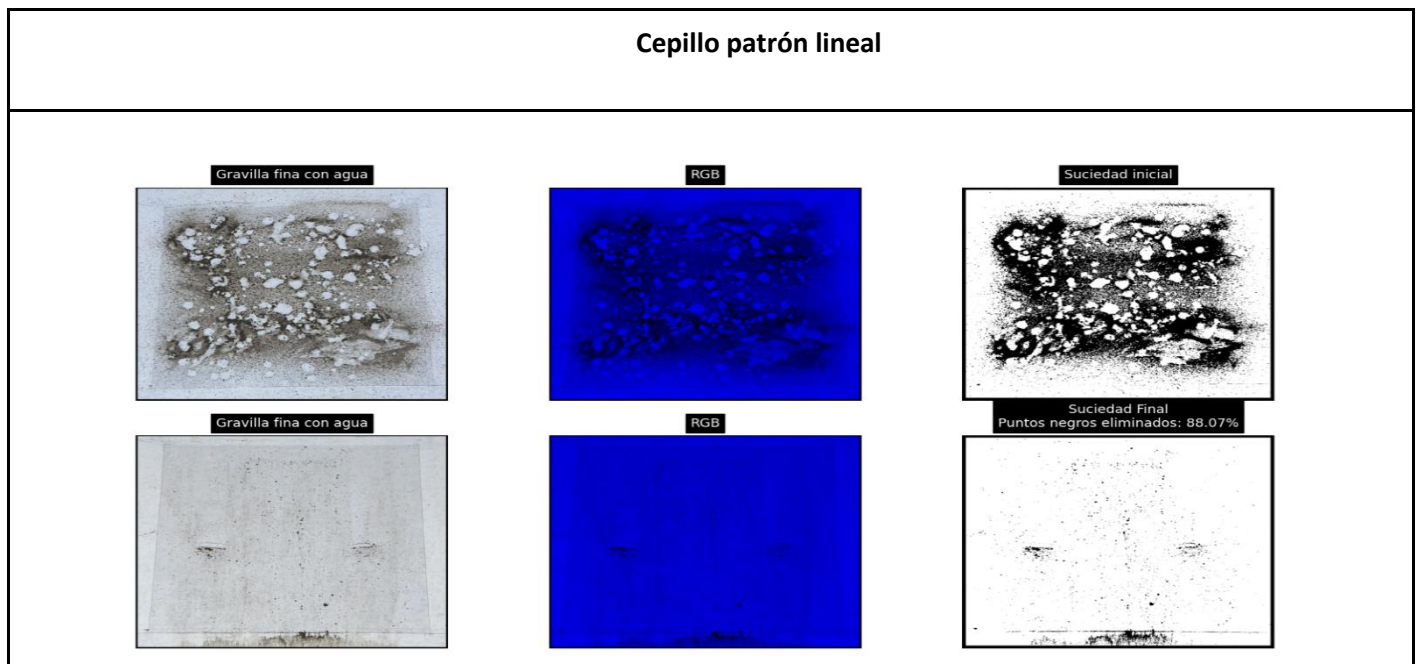
Fuente. *Propia*

Ilustración 26



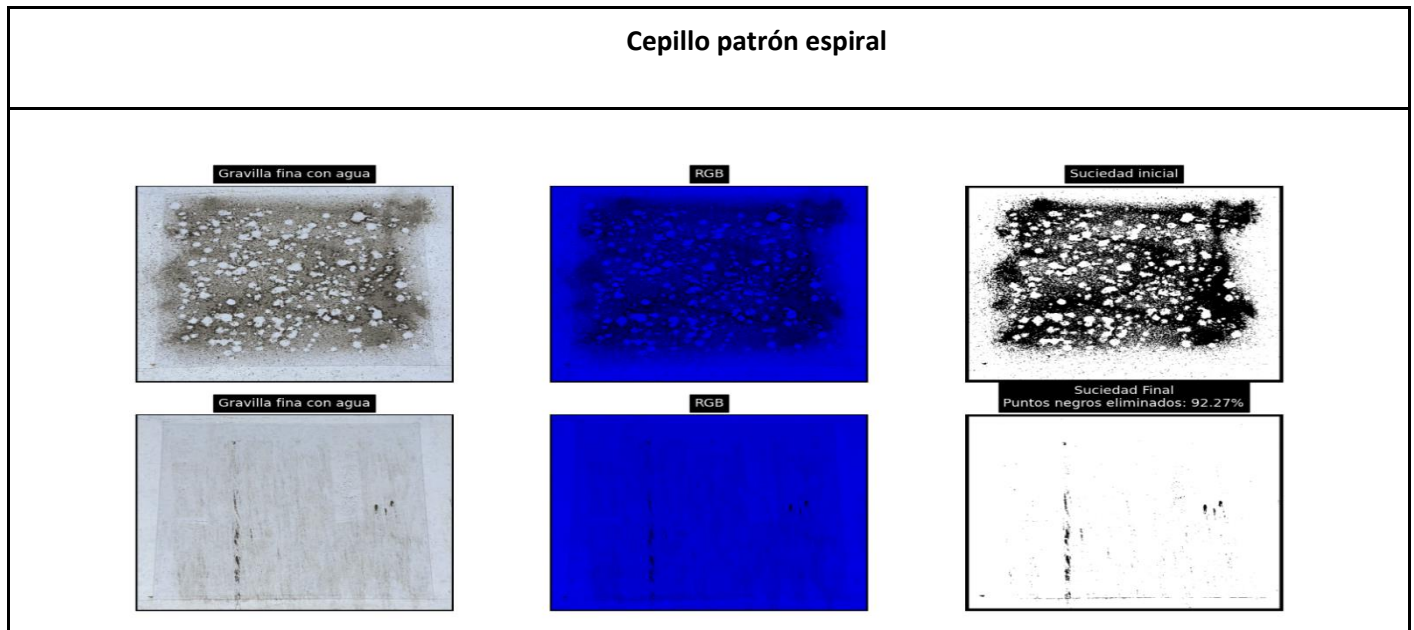
Fuente. Propia

Ilustración 27



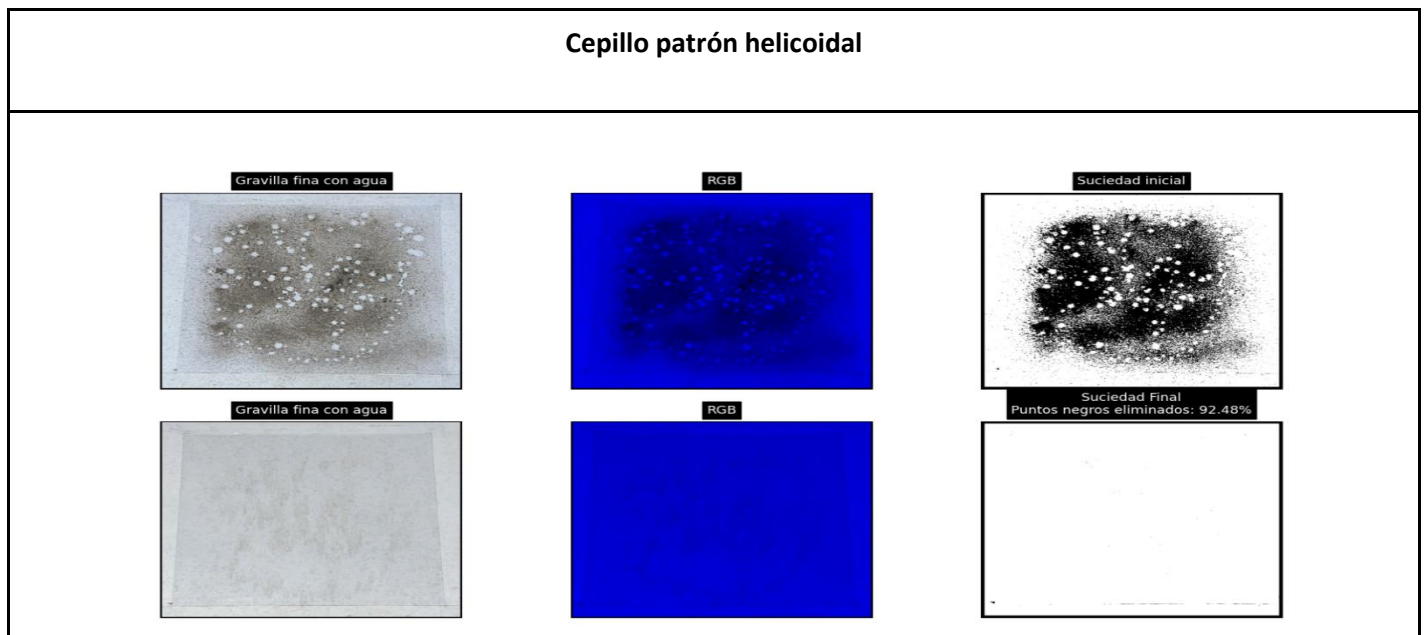
Fuente. Propia

Ilustración 28



Fuente. Propia

Ilustración 29



Fuente. Propia