

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE  
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ANÁLISIS DE DEFICIENCIAS DE LA  
CABEZA ROBÓTICA EZ-INMOOV Y  
DESARROLLO DE COMPONENTES  
ALTERNATIVOS: DISEÑO, FABRICACIÓN,  
INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN  
FUNCIONAL"

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre –2025

AUTOR: Álvaro Costa Arnau

DIRECTOR/ES: César Fernández Peris



# AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros de clase, que con el tiempo se han convertido en más que amigos, y que me alegra que haya sido así, pues este camino no hubiese sido tan divertido y ameno de lo contrario.

A mi tutor por su dedicación y su comprensión.

Gracias.





# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
ABREVIATURAS .....	11
RESUMEN.....	12
1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 MOTIVACIÓN .....	13
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....	15
2. LIMITACIONES DE LA CABEZA EZ-INMOOV Y PROPUESTAS DE MEJORA .....	17
2. ANÁLISIS DE DEFICIENCIAS DE LA CABEZA EZ-INMOOV .....	17
2.2 ALTAVOZ .....	17
2.3 GRADOS DE LIBERTAD.....	18
2.4 UNIONES ATORNILLADAS .....	18
2.5 CALIDAD DE IMPRESIÓN.....	19
2.6 GESTIÓN DEL CABLEADO .....	19
2.7 PROPUESTA ELEGIDA .....	19
3. ANTECEDENTES.....	21
3.1. FUNDAMENTOS PSICOLÓGICOS DE LA EXPRESIVIDAD FACIAL.....	21
3.2. EVOLUCIÓN DE LA EXPRESIVIDAD ROBÓTICA.....	21
3.2.1 KISMET .....	22
3.2.2 WE-4RII .....	23
3.2.3 ICUB .....	26
3.2.4 FURHAT Y SOPHIA.....	27
3.2.5 SEER .....	29
3.3. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN .....	30
3.4. COMPARATIVA ENTRE EXPRESIVIDAD HUMANA Y ROBÓTICA.....	31
3.5. APLICACIÓN EN EL DISEÑO DEL ROBOT INMOOV .....	31
4. CRITERIOS DE DISEÑO .....	33

4.1 AJUSTE DIMENSIONAL Y APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO INTERNO .....	33
4.2 MATERIAL DE LAS CEJAS .....	34
4.3 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN .....	35
4.4 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO .....	37
4.5 MATERIAL DEL MECANISMO .....	39
4.6 DIFICULTAD DE IMPRESIÓN DE LOS MATERIALES.....	41
5. DISEÑO .....	44
5.1 MECANISMO.....	44
5.1.1 HUSILLO .....	45
5.1.2 TUERCA.....	47
5.1.3 CEJAS.....	48
5.1.4 SUJECIÓN .....	50
5.1.5 ADAPTADOR .....	51
5.2 MATERIAL .....	51
6. FABRICACIÓN .....	53
6.1 LAMINADOR .....	53
6.2 PREPARACIÓN DEL MODELO .....	55
6.3 ORIENTACIÓN Y PARÁMETROS.....	56
6.3.1 ORIENTACIÓN DEL HUSILLO .....	56
6.3.2 ORIENTACIÓN DE LA TUERCA.....	57
6.3.3 ORIENTACIÓN DE LAS CEJAS.....	58
6.3.4 ORIENTACIÓN EN LAS SUJECIONES.....	59
6.3.5 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN .....	60
7. POSTPROCESADO.....	67
8. TORNILLERÍA.....	68
9. PRESUPUESTO .....	69
9.1 PRESUPUESTO FINAL .....	69
10. CONCLUSIÓN .....	71
10.1 RESULTADO FINAL.....	72

11. LÍNEAS DE FUTURO.....	75
BIBLIOGRAFIA.....	76
ANEXO I: PLANOS DE FABRICACIÓN .....	79
ANEXO II: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	86
ANEXO III: DISEÑO DE LA ROSCA .....	91



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cabeza EZ-InMoov. ....	14
Figura 2. Ubicación y tamaño del altavoz. ....	17
Figura 3. Cabeza del robot Kismet. ....	23
Figura 4. Robot WE-4RII. ....	23
Figura 5. Cabeza de WE-4RII. ....	25
Figura 6. Mecanismo de movimiento de las cejas de WE-4RII. ....	25
Figura 7. Robot iCub. ....	27
Figura 8. Robot Furhat. ....	28
Figura 9. Robot Sophia. ....	29
Figura 10. Robot Seer. ....	30
Figura 11. Expresividad huamana, ....	31
Figura 12. Vista del espacio disponible dentro de la cabeza. ....	33
Figura 13. TPU. ....	34
Figura 14. Mecanismo biela.manivela. ....	37
Figura 15. Transmisión de movimiento mediante husillo y tuerca. ....	38
Figura 16. Mecanismo de engranaje. ....	39
Figura 17. Stringing de PETG. ....	42
Figura 18. Warping. ....	43
Figura 19. Husillo. ....	46
Figura 20. Cabeza del husillo. ....	47
Figura 21. Tuerca. ....	48
Figura 22. Vista isométrica de las cejas. ....	49
Figura 23. Vista frontal de las cejas. ....	49
Figura 24. Pieza de sujeción. ....	50
Figura 25. Adaptador. ....	51
Figura 26. Ender 3 V3 Plus. ....	53
Figura 27. Laminador PrusaSlicer. ....	54
Figura 28. Pieza importada al laminador. ....	55
Figura 29. Orientación del husillo. ....	57
Figura 30. Orientación de la tuerca. ....	58
Figura 31. Orientación de las cejas. ....	59
Figura 32. Orientación de las sujeciones. ....	60
Figura 33. Altura de capa y perímetros. ....	61
Figura 34. Relleno. ....	62
Figura 35. Temperatura de la Boquilla y de la cama. ....	62
Figura 36. Velocidades. ....	63
Figura 37. Retracciones. ....	64

Figura 38. Refrigeración.....	64
Figura 39. Adhesión a la cama mediante skirt.....	65
Figura 40. Soportes.....	66
Figura 41. Rebabas.....	67
Figura 42. Mecanismo ensamblado.....	68
Figura 43. Cabeza EZ-InMoov con las cejas incorporadas.....	72
Figura 44. Cabeza EZ-InMoov con cejas ligeramente girada.....	72
Figura 45. Cabeza Ez-InMoov con cejas ligeramente girada.....	73
Figura 46. Mecanismo de las cejas integrado.....	73
Figura 47. Cabeza Ez-InMoov de perfil.....	74
Figura 48. Especificaciones técnicas del servomotor.....	86
Figura 49. Especificaciones técnicas de la impresora modelo Ender 3 V3 Plus.....	87
Figura 50. Especificaciones técnicas de los M2 x 6mm Socket Button Screws.....	88
Figura 51 . Especificaciones técnicas de los M3 x 5mm Socket Button Screws.....	89
Figura 52. Especificaciones técnicas de los M3 x 8mm Socket Button Screws.....	90
Figura 53- Perfil trapecoidal de la rosca.....	91
Figura 54. Rosca trapecoidal modelo.....	92
Figura 55. Tuerca dividida.....	93
Figura 56. Perfil del diente dentro del cuerpo del husillo.....	94
Figura 57. Opreación de bobina.....	95
Figura 58. Perfil de los hilos del husillo.....	96
Figura 59. Rosca inacabada.....	97
Figura 60. Rosca adecuada.....	98
Figura 61. Holgura del diente de la tuerca.....	99
Figura 62. Tuerca diseñada.....	100

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Desglose de costes de fabricación. ....	69
Tabla 2. Presupuesto final. ....	70



# ABREVIATURAS

HRI – Interacción Humano-Robot

MIT – Instituto de Tecnología de Massachusetts

WE-4RII - Waseda Eye N°. 4 Redefined II

SEER - Simulative Emotional Expression Robot

IIT - Instituto Italiano de Tecnología

LED – Diodo Emisor de Luz

PLA – Ácido Poliáctido

TPU – Poliuretano Termoplástico

PETG - Tereftalato de Polietileno Glicolizado

PA12 – Poliamida 12

FDM – Modelado por Deposición Fundida

CAD – Diseño Asistido por Ordenador

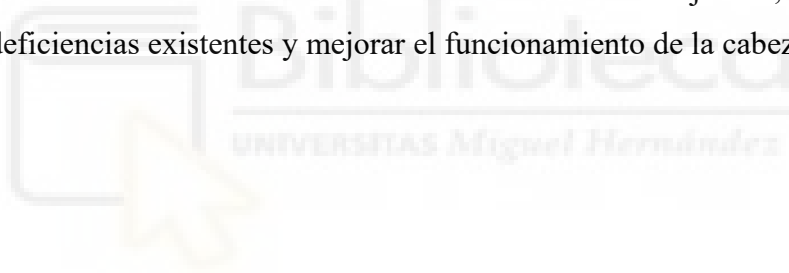


# RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en la mejora de la cabeza robótica EZ-InMoov, la cual presenta diversas limitaciones en su configuración actual, especialmente en lo relativo al reducido número de grados de libertad que limitan su expresividad.

El proyecto se articula en cinco etapas principales: en primer lugar, se realiza un análisis detallado de las deficiencias identificadas; posteriormente, se proponen nuevos componentes o modificaciones que permitan corregirlas; a continuación, se desarrolla el diseño mecánico de dichos elementos; seguidamente, se procede a la fabricación del prototipo mediante impresión 3D; y, por último, se lleva a cabo la integración y validación funcional de los nuevos componentes en la cabeza robótica.

El trabajo finaliza con la evaluación del rendimiento del sistema mejorado, con el objetivo de reducir las deficiencias existentes y mejorar el funcionamiento de la cabeza Ez-InMoov.



# 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una introducción general al trabajo realizado, con el propósito de contextualizar su desarrollo y facilitar la comprensión de los aspectos fundamentales que lo motivan. En la sección 1.1 se aborda la motivación principal del estudio, acompañada de una breve revisión sobre la evolución de la robótica social y las características que la definen como disciplina emergente dentro del campo de la inteligencia artificial y la interacción humano-robot.

A continuación, la sección 1.2 expone los objetivos que guían el desarrollo del trabajo, tanto desde una perspectiva técnica como conceptual, estableciendo las metas que se pretenden alcanzar y el enfoque metodológico adoptado.

Por último, la sección 1.3 describe la estructura del documento, detallando la organización de los capítulos y el contenido de cada uno de ellos, con el fin de ofrecer una visión clara del recorrido seguido a lo largo del proyecto.

## 1.1 MOTIVACIÓN

La motivación principal de este proyecto es analizar las limitaciones que presenta la cabeza robótica EZ-InMoov (figura 1) y desarrollar propuestas de mejora orientadas a optimizar su rendimiento funcional y expresivo. La idea es hacer más eficiente su propósito fundamental: favorecer la interacción entre humanos y robots, especialmente en contextos donde la comunicación no verbal, la expresividad y el realismo del movimiento resultan determinantes para generar empatía y confianza hacia los sistemas robóticos.

La cabeza EZ-InMoov forma parte de un robot humanoide de código abierto diseñado con fines educativos, experimentales y de investigación. Este modelo surge de la colaboración entre la empresa EZ-Robot y la comunidad internacional del proyecto InMoov, impulsado originalmente por el diseñador francés Gaël Langevin. La iniciativa se enmarca en la filosofía del hardware libre, lo que permite que cualquier persona interesada en robótica,

programación o mecatrónica pueda reproducir, modificar y adaptar el diseño de manera accesible.

El sistema se caracteriza por su arquitectura modular y de impresión 3D, lo que facilita el reemplazo o rediseño de componentes según las necesidades del usuario o los objetivos del proyecto. Esta versatilidad convierte a la cabeza EZ-InMoov en una plataforma idónea para la experimentación con tecnologías emergentes, como la visión por computador, el reconocimiento de voz o la integración del habla. Asimismo, permite explorar nuevas estrategias de expresividad robótica, estudiando cómo los movimientos o gestos pueden influir en la percepción emocional y social que las personas desarrollan hacia los robots.

El interés por mejorar la cabeza EZ-InMoov responde también a la creciente relevancia de la robótica social en ámbitos como la educación, la asistencia sanitaria o la atención al público. En estos entornos, la capacidad del robot para transmitir emociones y mantener una comunicación natural se ha convertido en un factor clave para la aceptación tecnológica. Por ello, este trabajo pretende no solo resolver las deficiencias mecánicas o funcionales del modelo original, sino también proponer soluciones que aumenten su expresividad, naturalidad y capacidad de interacción.

En resumen, el proyecto busca contribuir al desarrollo de sistemas robóticos más eficientes y socialmente inteligentes, capaces de integrarse de manera armónica en entornos humanos. La cabeza EZ-InMoov constituye, en este sentido, un punto de partida ideal para la investigación aplicada en el campo de la interacción humano-robot, al combinar accesibilidad tecnológica, modularidad y potencial de personalización.



*Figura 1. Cabeza EZ-InMoov.*

## 1.2 OBJETIVOS

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como finalidad el diseño, desarrollo e implementación de componentes alternativos que conlleven a mejoras funcionales en la cabeza robótica EZ-InMoov, abordando el proceso desde una perspectiva tanto técnica como experimental. Para ello, se llevará a cabo un análisis del modelo existente, con el propósito de identificar los componentes susceptibles de optimización en términos de movimiento, expresividad y eficiencia mecánica.

Una vez detectadas las áreas de mejora, se procederá a la propuesta, diseño y fabricación de nuevas piezas o sistemas, así como a la integración de elementos electrónicos y de control que permitan validar los avances obtenidos. Finalmente, se realizará una fase de pruebas y validación funcional, orientada a comprobar la fiabilidad, precisión y capacidad expresiva del sistema mejorado.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente Trabajo de Fin de Grado se organiza de manera secuencial para facilitar la comprensión del proceso completo, desde la definición inicial del proyecto hasta la obtención del diseño final y la evaluación de los resultados. En primer lugar, se exponen los objetivos generales y específicos, donde se describe con precisión qué se pretende alcanzar mediante el desarrollo del mecanismo de expresividad para la cabeza robótica. A continuación, se presenta la motivación, en la que se justifica la relevancia del proyecto y se explican las razones técnicas y funcionales que impulsan su realización.

Posteriormente, se analizan en detalle las deficiencias actuales de la cabeza robótica, identificando las limitaciones que condicionan su rendimiento y que fundamentan la necesidad de plantear una propuesta de mejora. Tras ello, se incluye un apartado de antecedentes, donde se revisan los avances más significativos en el campo de la expresividad robótica, poniendo especial atención en soluciones basadas en mecanismos faciales y cejas articuladas.

El trabajo continúa con la definición de los criterios de diseño, que establecen las restricciones técnicas que deben considerarse para el desarrollo del nuevo mecanismo. Una vez definidos los criterios, se presenta el diseño final propuesto, detallando su configuración, funcionamiento e integración dentro de la cabeza del robot.

Finalmente, se describe un apartado dedicado a las complicaciones encontradas durante el desarrollo, en el que se exponen las dificultades técnicas, de fabricación o de integración que surgieron durante el proyecto, así como las estrategias empleadas para resolverlas.



## 2. LIMITACIONES DE LA CABEZA EZ-INMOOV Y PROPUESTAS DE MEJORA

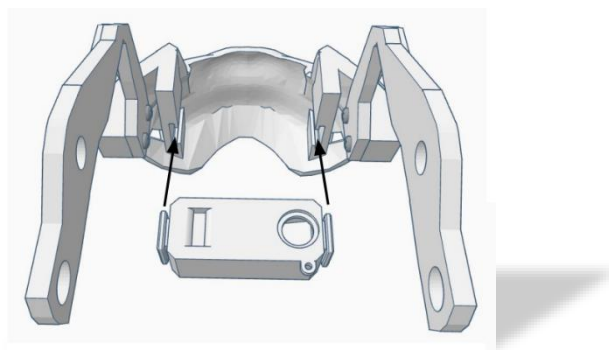
### 2. ANÁLISIS DE DEFICIENCIAS DE LA CABEZA EZ-INMOOV

En este apartado vamos a analizar la cabeza desde una perspectiva mecánica y vamos a realizar una lista de mejoras que se podrían presentar para aumentar el rendimiento de la cabeza.

#### 2.2 ALTAVOZ

Una de las mejoras propuestas consiste en modificar la ubicación y el tamaño del altavoz. Actualmente, este componente se encuentra instalado en la zona de la mandíbula, lo que limita la calidad y el volumen del sonido emitido. Se plantea reubicarlo en una posición más favorable dentro de la cabeza y sustituirlo por un modelo de mayor tamaño y potencia, con el fin de mejorar la audición y la claridad del habla del robot.

El principal desafío de esta modificación radica en encontrar un espacio adecuado dentro de la estructura, así como en diseñar e imprimir en 3D un soporte personalizado que garantice una sujeción firme. Como ventaja, esta mejora permitiría una comunicación más nítida y natural entre el robot y el usuario.



*Figura 2. Ubicación y tamaño del altavoz.*

## 2.3 GRADOS DE LIBERTAD

Otra mejora relevante sería incrementar los grados de libertad de la cabeza, ya que el modelo actual dispone de un número limitado para emular gestos y expresiones humanas. Se propone la incorporación de cejas móviles, movimientos de cabeceo (inclinación hacia arriba y abajo) o incluso un guiño de cabeza completo.

Para implementar estas funciones sería necesario añadir uno o varios servomotores adicionales, ubicados estratégicamente según el movimiento deseado. El principal inconveniente es la limitación de espacio interno, que obliga a optimizar la distribución de los componentes. No obstante, el beneficio resultante es significativo: una mayor capacidad expresiva que mejora la naturalidad de las interacciones y fortalece la relación humano-robot, uno de los objetivos fundamentales del proyecto.

## 2.4 UNIONES ATORNILLADAS

Las uniones atornilladas del modelo actual pueden presentar problemas de mantenimiento y durabilidad con el uso continuado. En algunos casos, los tornillos se introducen directamente en el plástico impreso en 3D, lo que puede generar fisuras, holguras o deformaciones tras varios ciclos de montaje y desmontaje. Además, una inserción incorrecta puede provocar que el tornillo quede excesivamente hundido, dificultando su extracción y comprometiendo la integridad de la pieza, dificultando el mantenimiento que se le deba hacer en un futuro.

Para solucionar esto, un cambio importante sería cambiar las uniones atornilladas por uniones macho-hembra. Se propone sustituir estas uniones por un sistema de macho-hembra. Este sistema permitiría unir las diferentes partes de la cabeza sin necesidad de tornillos, aprovechando la precisión del diseño 3D para garantizar un ajuste firme y estable.

## 2.5 CALIDAD DE IMPRESIÓN

Dado que muchas piezas del modelo (como carcasas, soportes o engranajes) se imprimen en 3D por el propio usuario, la calidad y precisión final dependen directamente de la calibración de la impresora, los parámetros de impresión y el postprocesado empleado.

Se propone estandarizar el proceso de fabricación mediante una guía técnica que detalle los parámetros óptimos de impresión (diámetro de boquilla, alturas de capa, retracciones, temperaturas de boquilla y cama, etc.) y los pasos necesarios de acabado posterior (lijado, pulido, desbarbado, etc.). Con ello se busca garantizar un resultado uniforme y funcional, reduciendo errores dimensionales, desalineamientos o deformaciones que puedan afectar al rendimiento mecánico del sistema.

## 2.6 GESTIÓN DEL CABLEADO

Finalmente, se plantea una mejora en la organización del cableado interno, ya que los movimientos de los ojos, la cabeza y la mandíbula pueden generar tensiones o interferencias en los cables que conectan los servomotores, la cámara y la batería.

La propuesta consiste en implementar canalizaciones internas fijas y zonas de flexión controlada que mantengan los cables ordenados, minimizando la fricción, el riesgo de enganches y la inercia durante el movimiento. De este modo, se consigue un sistema más seguro, ordenado y eficiente, que contribuye tanto al rendimiento mecánico como a la facilidad de mantenimiento.

## 2.7 PROPUESTA ELEGIDA

La propuesta finalmente seleccionada consiste en añadir un nuevo grado de libertad a la cabeza robótica, mediante la incorporación de cejas impresas en 3D que incrementen su nivel de expresividad facial. Esta mejora permitirá dotar al modelo de una mayor capacidad para

representar emociones, favoreciendo así una interacción más natural y cercana entre el robot y el usuario.

El desarrollo del proyecto se centrará en la instalación de un servomotor que accione de forma simultánea ambos movimientos de las cejas, transmitiendo el desplazamiento mediante un sistema mecánico común. De este modo, se busca ampliar el rango de expresiones disponibles, mejorando la comunicación no verbal del robot.

Para llevar a cabo esta propuesta, será necesario analizar la ubicación óptima del servomotor, diseñar el mecanismo de transmisión y modelar las cejas en función de las limitaciones de espacio y los requisitos estéticos. Una vez completado el diseño, se procederá a la impresión en 3D de las piezas, seguida de su ensamblaje e implementación en la cabeza robótica. Finalmente, se realizará una evaluación funcional para determinar la eficacia del sistema y el impacto real en la expresividad del robot, y para ello, se comenzará analizando los antecedentes y el estado del arte en expresividad robótica



## 3. ANTECEDENTES

La expresividad facial es uno de los componentes más significativos de la comunicación no verbal humana. A través de los gestos del rostro se transmiten emociones, intenciones y actitudes, facilitando la interpretación del estado emocional del interlocutor. En el contexto de la interacción humano-robot (HRI), reproducir esta capacidad expresiva resulta fundamental para crear una comunicación más intuitiva, empática y eficaz entre humanos y máquinas.

### 3.1. FUNDAMENTOS PSICOLÓGICOS DE LA EXPRESIVIDAD FACIAL

Los estudios pioneros de Paul Ekman sobre las emociones universales demostraron que el rostro humano puede expresar de manera reconocible un conjunto reducido de emociones básicas (alegría, tristeza, enfado, miedo, sorpresa y asco) a través de la acción coordinada de distintos grupos musculares. Entre ellos, las cejas desempeñan un papel crucial: su elevación o contracción modifica la apariencia de los ojos y el conjunto del rostro, afectando directamente a la interpretación emocional de la expresión.

Trasladado al ámbito de la robótica social, este principio implica que los movimientos de cejas y ojos pueden ser suficientes para evocar emociones reconocibles, incluso en robots con un repertorio limitado de gestos. Diversos estudios en HRI como los de Krämer y Paiva han confirmado que la presencia de rasgos expresivos mejora la empatía, confianza y cooperación del usuario hacia el robot. De este modo, el diseño de sistemas expresivos no solo persigue un realismo visual, sino que cumple una función comunicativa esencial.

### 3.2. EVOLUCIÓN DE LA EXPRESIVIDAD ROBÓTICA

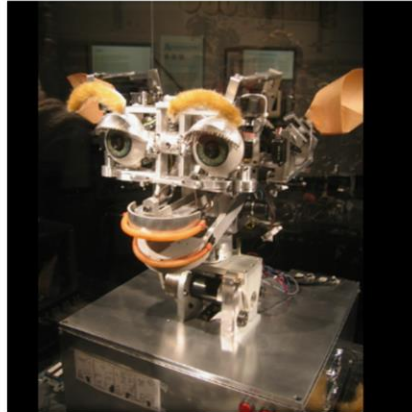
### 3.2.1 KISMET

Uno de los primeros hitos en este campo fue el robot Kismet (Figura 3), desarrollado por Cynthia Breazeal en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) Media Lab. Cynthia es profesora de artes y ciencias mediáticas en el MIT, donde fundó y dirige el Personal Robots Group del Media Lab. Es pionera en el campo de la robótica social y la interacción humano-robot. Su trabajo combina la innovación técnica en inteligencia artificial, el diseño de experiencias de usuario y la comprensión de la psicología del compromiso humano para desarrollar tecnologías de inteligencia artificial personificadas que promuevan el bienestar y el desarrollo personal.

Desarrolló Kismet como parte de su tesis doctoral a finales de los años noventa. Este robot se considera el primer sistema diseñado específicamente para promover una interacción cara a cara natural, expresiva y socialmente significativa entre humanos y máquinas, y es reconocido como el proyecto pionero que dio origen al campo de la robótica social.

El diseño de Kismet se inspiró en principios procedentes del desarrollo social infantil, la psicología y la etología, integrando conceptos de estas disciplinas para permitir que el robot participara en interacciones socioemocionales intuitivas con un “cuidador” humano. Estas interacciones evocaban las dinámicas observadas entre padres e infantes, caracterizadas por el intercambio de gestos, miradas y señales emocionales.

Su estructura facial articulada (que incluía cejas, labios y párpados móviles) permitía representar emociones básicas de forma coherente con su comportamiento interactivo. Los resultados mostraron que la expresividad facial, incluso con mecanismos sencillos, incrementaba la aceptación social del robot y facilitaba una comunicación más natural.



*Figura 3. Cabeza del robot Kismet.*

Cynthia propuso que este tipo de interacción temprana (fundamental en el desarrollo emocional, social y cognitivo de los bebés) puede trasladarse a la robótica social para fomentar el desarrollo socioemocional y cognitivo de los robots, permitiéndoles aprender y responder de forma más natural dentro de un contexto social.

### 3.2.2 WE-4RII

Posteriormente, el robot Waseda Eye No. 4 Redefined II (WE-4RII) (Figuras 4 y 5) fue desarrollado en la Universidad de Waseda por el equipo del profesor Atsuo Takashi, reconocido por su investigación en robots humanoides capaces de expresar emociones mediante movimientos faciales y corporales. WE-4RII fue el concepto final de una sucesión de mejoras implementadas en versiones anteriores, y consistía en un robot humanoide dentro de la línea de investigación iniciada en 1995 sobre robots capaces de expresar emociones humanas. El objetivo principal de este proyecto era diseñar mecanismos y funciones que permitan una comunicación natural entre humanos y robots mediante la representación de expresiones emocionales similares a las humanas.

La evolución de la serie Waseda Eye (WE) comenzó con el WE-2 (1995), que incorporaba la coordinación cabeza-ojo con 4 grados de libertad. En 1996, el WE-3 amplió esta capacidad

al seguimiento tridimensional mediante movimientos coordinados de cabeza y ojos. El WE-3R (1997) añadió párpados mejorados y audición direccional, mientras que el WE-3RII (1998) introdujo cejas, labios y mandíbula para lograr expresiones más humanas. En 1999, el WE-3RIII integró sensaciones táctiles, térmicas y auditivas junto con un modelo psicológico mejorado, seguido por el WE-3RIV (2000), que incorporó olor y cambios de color facial. En 2001, el WE-3RV añadió un sistema de voz, una piel más realista y mecanismos para representar “personalidades” robóticas. Con el WE-4 (2002) se miniaturizó el sistema mediante una unidad ocular integrada, mejorando las cejas e incorporando un torso con 2 grados de libertad.

En 2003 se incorporaron al proyecto unos brazos humanoides con 9 grados de libertad (9-DOF) para mejorar la expresividad emocional del robot. Estos brazos fueron integrados en el modelo WE-4, dando lugar al WE-4R, una versión avanzada capaz de transmitir emociones a través de la expresión facial, el movimiento del torso y los gestos de los brazos.

Posteriormente, en 2004 se desarrolló el WE-4RII mediante la integración de la mano antropomórfica RCH-1 (RoboCasa Hand No. 1). Esta mano, con 6 grados de libertad, no solo ampliaba la capacidad de expresión emocional del robot, sino que también añadía funciones de agarre y detección táctil, reforzando así su capacidad de interacción social y manipulativa.

Con esta investigación, demuestra experimentalmente que pequeñas variaciones en su posición alteraban de forma significativa la percepción emocional del usuario. Esta línea de trabajo consolidó la idea de que la expresividad localizada (centrada en elementos como las cejas) puede ser suficiente para comunicar emociones de forma efectiva.



Figura 4. Robot WE-4RII.

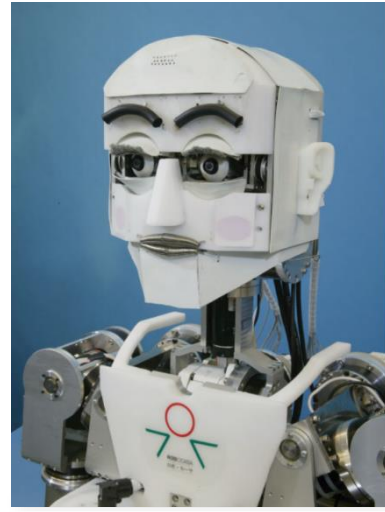


Figura 5. Cabeza de WE-4RII.

Si nos fijamos en las cejas (Figura 6), vemos que, para manipularlas de manera más fácil, utilizó como material esponja flexible, que moldeaban para dar forma a sus expresiones con cables conectados en diferentes puntos, dotándolo de un aspecto más orgánico y realista.

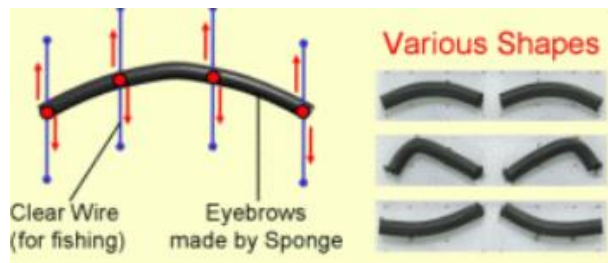


Figura 6. Mecanismo de movimiento de las cejas de WE-4RII.

### 3.2.3 ICUB

Durante la década de 2010, la investigación en expresividad robótica se diversificó con el desarrollo del robot iCub (Figura 7), el cual es un robot humanoide desarrollado por el Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) dentro del proyecto europeo RobotCub, liderado por investigadores como Giorgio Metta, Giulio Sandini y Lorenzo Natale. Concebido inicialmente como una plataforma abierta para el estudio del desarrollo cognitivo en robótica, iCub se ha convertido en uno de los robots humanoides más influyentes en investigación debido a su diseño versátil, su arquitectura modular y su fuerte orientación hacia la interacción social.

A lo largo de sus distintas generaciones, iCub ha evolucionado desde un modelo centrado en la manipulación y el aprendizaje sensorimotor hacia un robot capaz de mantener interacciones sociales más naturales mediante microexpresiones faciales, incluida la activación y movimiento de las cejas, un elemento crítico para la comunicación no verbal. El IIT incorporó progresivamente mecanismos faciales (entre ellos cejas LED y párpados superiores) con el fin de estudiar cómo los matices del rostro humano influyen en la interpretación emocional de los robots.

Las cejas del iCub, controladas por luces LED, permiten representar estados como sorpresa, duda o atención, facilitando la lectura emocional por parte del usuario, con la diferencia de no tener un sistema mecánico que lo controle.

Estas capacidades han demostrado ser especialmente útiles en experimentos de comunicación colaborativa, donde la expresión de intención o foco de atención mediante gestos faciales mejora la eficacia del intercambio. El trabajo del IIT ha servido así como referencia para otros diseños de cabezas robóticas expresivas, mostrando cómo incluso un número reducido de grados de libertad en las cejas puede incrementar significativamente la naturalidad percibida y la empatía en la interacción humano-robot.

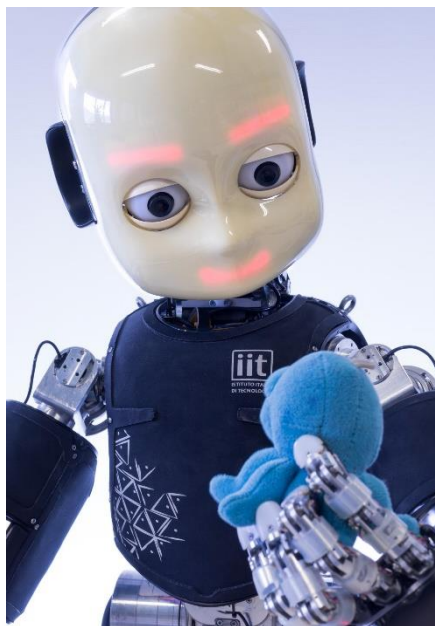


Figura 7. Robot iCub.

### 3.2.4 FURHAT Y SOPHIA

Paralelamente, el robot Furhat (Figura 8) fue desarrollado por el equipo de investigación del Furhat Robotics Lab en el KTH Royal Institute of Technology (Suecia), liderado inicialmente por Gabriel Skantze, Jonas Beskow y Samer Al Moubayed. El objetivo principal del proyecto era crear un robot social altamente expresivo, capaz de mantener interacciones fluidas mediante una técnica de proyección facial sobre una máscara translúcida tridimensional.

Esta arquitectura híbrida permitió reproducir microexpresiones con gran precisión, entre ellas el movimiento de las cejas, que desempeñan un papel fundamental en la transmisión de emociones y en la regulación del flujo conversacional. En Furhat, las cejas se convirtieron en un recurso clave para expresar prácticamente cualquier expresión posible, marcando una gran diferencia al cambiar la manera de crear expresividad en un robot social.

Todo ello contribuyó significativamente a su reputación como uno de los robots más expresivos y naturales en el ámbito de la interacción humano-robot.

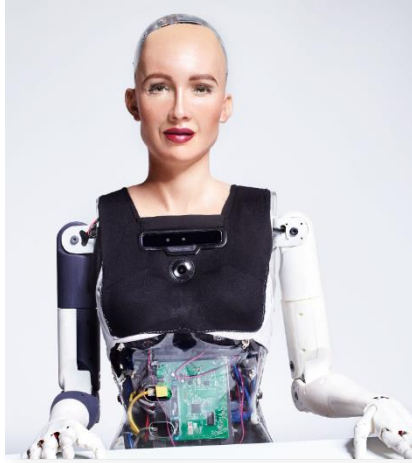


*Figura 8. Robot Furhat.*

En cuanto al robot Sophia (Figura 9), fue desarrollada por Hanson Robotics, bajo la dirección del ingeniero y escultor robótico David Hanson, con el propósito de crear un humanoide capaz de combinar expresividad facial avanzada, habilidades conversacionales y apariencia antropomórfica realista.

Su diseño se basó en un material flexible llamado frubber, un elastómero elástico patentado que imita la textura, la sensación y la flexibilidad de la piel humana. que permite reproducir más de sesenta expresiones faciales mediante una red interna de actuadores. Dentro de estas expresiones, las cejas desempeñan un papel esencial al modular emociones como alegría, tristeza o sorpresa, y al acompañar visualmente el discurso del robot.

La capacidad de Sophia para mover las cejas de manera coordinada y suave se convirtió en uno de los elementos que más repercusión mediática y científica generó, al demostrar que la expresividad facial compleja es un factor decisivo para que los usuarios perciban a un robot como socialmente competente y emocionalmente inteligible.



*Figura 9. Robot Sophia.*

### 3.2.5 SEER

El robot SEER (Simulative Emotional Expression Robot) es una obra tecnorrobótica creada por el artista e ingeniero japonés Takayuki Todo, presentada por primera vez en 2018 en el marco de diversas exhibiciones internacionales de arte y tecnología. El proyecto surge con el propósito de explorar cómo las máquinas pueden generar empatía mediante expresiones faciales sintéticas, investigando la relación emocional entre humanos y sistemas robóticos. A diferencia de los robots orientados a la funcionalidad industrial, SEER se sitúa en el cruce entre arte, interacción humano-robot y psicología perceptiva, proponiendo una reflexión sobre la comunicación no verbal y el impacto que posee la mirada en la interacción social.

Uno de los elementos más llamativos del diseño es el mecanismo de sus cejas, pensado para reproducir variaciones expresivas de manera simple pero altamente efectiva. Estas cejas están fabricadas con un material elástico (plástico flexible o alambre elástico) que permite deformaciones suaves. Su movilidad no depende de una réplica exacta de musculatura humana, sino de un sistema mecánico minimalista que actúa sobre este material flexible, logrando curvar, tensar o relajar las cejas según la expresión detectada. Esta elección de materiales blandos facilita transiciones fluidas y evita la rigidez típica de otros robots humanoides, aumentando la sensación de naturalidad.

SEER integra también un sistema de visión artificial que analiza el rostro del observador en tiempo real mediante una cámara. A partir de esta información, el robot replica la expresión captada ajustando el movimiento de ojos, párpados y cejas. La combinación de un análisis facial rápido con un mecanismo flexible y preciso convierte a SEER en uno de los robots más expresivos de su categoría, y en un ejemplo destacado de cómo la simplificación mecánica, combinada con el diseño emocional, puede generar una fuerte respuesta empática en el espectador.



Figura 10. Robot Seer.



### 3.3. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo contemporáneo en expresividad robótica ha evolucionado desde el control mecánico de servomotores hacia la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático. Los avances en aprendizaje profundo (deep learning) permiten que los robots adapten sus expresiones faciales al contexto comunicativo, sincronizando gestos, voz y tono emocional en tiempo real. Este cambio marca una transición desde sistemas programados manualmente hacia modelos autoadaptativos, capaces de aprender patrones de interacción social a partir de la experiencia.

Asimismo, los robots sociales actuales tienden a combinar la expresividad facial con otros canales no verbales, como la postura corporal o el contacto visual, para mejorar la coherencia multimodal de la comunicación. En este sentido, las cejas mantienen su papel como elemento clave, ya que incluso en configuraciones complejas siguen siendo determinantes para la transmisión de emociones básicas.

### 3.4. COMPARATIVA ENTRE EXPRESIVIDAD HUMANA Y ROBÓTICA

La expresividad facial humana es extremadamente rica, gracias a la acción coordinada de más de 40 músculos faciales que permiten generar miles de microexpresiones. En contraste, la mayoría de las cabezas robóticas actuales disponen de entre 4 y 12 grados de libertad como hemos visto en el caso de Kismet o WE, lo que limita la variedad y sutileza de las expresiones posibles.

Esta diferencia explica por qué pequeñas mejoras mecánicas, como la incorporación de cejas articuladas, pueden tener un impacto tan relevante en la percepción emocional del robot. Al reproducir incluso de manera aproximada el movimiento natural de las cejas, se consigue una notable mejora en la capacidad del robot para representar estados afectivos reconocibles y fortalecer la conexión emocional con el usuario.



*Figura 11. Expresividad humana,*

### 3.5. APLICACIÓN EN EL DISEÑO DEL ROBOT INMOOV

En el ámbito de la robótica de código abierto, el proyecto InMoov, ha supuesto una revolución por su enfoque modular y accesible mediante impresión 3D. Esta plataforma, ampliamente adoptada en educación e investigación, permite a los usuarios experimentar con diferentes configuraciones estructurales y expresivas. No obstante, la versión original de la

cabeza carece de cejas móviles, lo que restringe su capacidad de comunicar emociones de manera efectiva.

Este vacío ha motivado diversas propuestas de mejora, centradas en la adición de nuevos grados de libertad para ampliar el repertorio expresivo de la cabeza. La incorporación de cejas articuladas impresas en 3D representa una mejora viable y coherente con la línea del proyecto, orientada a incrementar su capacidad comunicativa y realismo emocional.

A la luz de los antecedentes revisados, puede afirmarse que la expresividad facial constituye un eje central en el desarrollo de robots sociales. Las cejas, en particular, destacan como uno de los rasgos más influyentes en la transmisión emocional, tanto por su impacto perceptivo como por su viabilidad técnica.

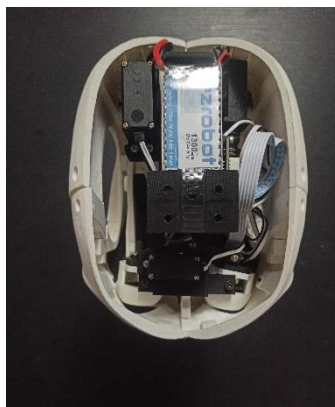


## 4. CRITERIOS DE DISEÑO

Con el fin de desarrollar un mecanismo funcional y adecuado para accionar las cejas impresas en 3D, es necesario establecer previamente una serie de criterios de diseño que orienten todo el proceso, desde la selección de componentes hasta la integración final en la cabeza robótica. Estos criterios permitirán definir las limitaciones físicas, mecánicas y operativas del sistema, asegurando que el movimiento de las cejas sea compatible con la estructura existente, técnicamente viable y capaz de aportar el nivel de expresividad deseado. A continuación, se presentan los criterios que guiarán el diseño del mecanismo propuesto.

### 4.1 AJUSTE DIMENSIONAL Y APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO INTERNO

Dado que la cabeza del robot dispone de un volumen interno muy limitado como vemos en la Figura 12, el mecanismo debe diseñarse para ocupar únicamente el espacio estrictamente necesario. Esto implica seleccionar componentes compactos y configurar una transmisión que se adapte a la geometría disponible sin interferir con otros elementos ya instalados. El diseño deberá optimizar la disposición del servomotor, los soportes y las piezas móviles para garantizar que todo el conjunto se integre correctamente dentro de la cavidad superior de la cabeza, evitando colisiones y manteniendo un montaje ordenado y funcional.



*Figura 12. Vista del espacio disponible dentro de la cabeza.*

La idea planteada es aprovechar el espacio disponible en la parte izquierda de la cabeza para diseñar el mecanismo.

## 4.2 MATERIAL DE LAS CEJAS

La elección del material para fabricar las cejas robóticas es un aspecto fundamental, ya que influye tanto en la estética final como en la durabilidad y el comportamiento mecánico durante el movimiento. Existen diversas opciones viables que pueden adaptarse a las necesidades del diseño, especialmente cuando se emplea impresión 3D como método de fabricación, como será nuestro caso.

Una primera alternativa es el uso de PLA, uno de los materiales más comunes en impresión 3D. El PLA ofrece una gran facilidad de impresión, buena rigidez y una amplia disponibilidad. Sin embargo, su naturaleza relativamente rígida lo hace menos adecuado para reproducir movimientos suaves o curvaturas continuas, pudiendo transmitir una apariencia poco natural en expresiones faciales.

Otra opción interesante es el TPU (poliuretano termoplástico), un material flexible y elástico que puede deformarse sin romperse. Su capacidad para absorber vibraciones y su comportamiento flexible permiten obtener cejas que acompañen el movimiento del mecanismo con mayor naturalidad, evitando tensiones innecesarias en los puntos de unión. No obstante, la impresión de TPU requiere ajustes específicos y puede presentar menor definición en detalles finos.



Figura 13. TPU.

El PETG se presenta como un material intermedio entre el PLA y el TPU. Ofrece buena resistencia mecánica, cierta flexibilidad y una mayor durabilidad que el PLA, sin llegar a ser tan elástico como el TPU. Puede ser adecuado si se busca un aspecto más rígido pero con un margen mínimo de flexión para evitar fracturas durante el montaje o el movimiento.

También es posible considerar materiales basados en silicona, ya sea mediante impresión en resina flexible o mediante moldeo. La silicona destaca por su comportamiento altamente elástico y su aspecto visual más cercano al de una ceja real, lo que puede mejorar la percepción de naturalidad. Sin embargo, su fabricación requiere procesos más complejos y menos compatibles con una integración mecánica precisa, especialmente en prototipos iniciales.

Por último, podríamos considerar la utilización de gomaespuma. Es un material fácil de implementar y es flexible, nos permitiría conseguir expresiones más elaboradas que con una ceja rígida. Es cierto que no sería tan resistente como los otros materiales anteriormente mencionados.

La selección del material dependerá de los requisitos de expresividad, la complejidad del mecanismo, la facilidad de fabricación y el nivel de realismo buscado. Cada opción ofrece un compromiso distinto entre flexibilidad, rigidez y naturalidad, por lo que debe evaluarse en función del diseño final y las limitaciones de la cabeza robótica.

### 4.3 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

La calidad final de las cejas impresas en 3D depende de forma directa de los parámetros de impresión, que actúan como un criterio de diseño esencial al determinar la precisión geométrica, la resistencia mecánica y el comportamiento dinámico de las piezas. Dado que las cejas formarán parte de un sistema móvil sometido a movimientos repetitivos y de pequeña amplitud, es imprescindible controlar con rigor dichos parámetros para garantizar un funcionamiento estable y una apariencia coherente con los requisitos expresivos del mecanismo.

Uno de los aspectos más relevantes es la altura de capa, ya que influye tanto en la resolución superficial como en la flexibilidad y la resistencia. Una altura de capa reducida permite obtener superficies más finas y curvaturas mejor definidas, lo cual resulta especialmente importante en piezas pequeñas como las cejas, donde las imperfecciones pueden afectar negativamente al movimiento y a la estética. Sin embargo, un espesor de capa mayor puede aportar más robustez en determinadas geometrías, por lo que debe seleccionarse cuidadosamente en función del material.

El ancho de línea y el porcentaje de relleno también determinan la rigidez final de la pieza. Un relleno bajo favorece la flexibilidad y reduce el peso, mientras que un relleno más denso aporta estabilidad, pero puede limitar la capacidad de deformación controlada durante el movimiento. Para cejas robóticas, suele ser necesario un equilibrio que permita mantener la forma sin añadir masa excesiva que incremente la inercia del mecanismo.

La temperatura de extrusión y de cama caliente constituye otro criterio clave, dado que afecta directamente a la adhesión entre capas y al comportamiento mecánico del material. En materiales flexibles como TPU, temperaturas inadecuadas pueden provocar deformaciones, warping o pérdida de definición en detalles finos. Por el contrario, temperaturas correctas facilitan una estructura interna más uniforme, lo que contribuye a mejorar la durabilidad de la pieza bajo esfuerzo.

Asimismo, parámetros como la velocidad de impresión, las retracciones y el flujo de material influyen en la precisión dimensional, la aparición de hilos o defectos superficiales y la uniformidad de las zonas móviles. En piezas sometidas a ensamblajes ajustados o a movimientos delicados, incluso pequeñas variaciones pueden generar holguras no deseadas o fricciones adicionales que afecten al rendimiento del mecanismo.

Por último, debe considerarse el orientado de la pieza en la cama de impresión, ya que determina la dirección de las capas y, por tanto, la resistencia frente a esfuerzos en los ejes críticos. Una orientación adecuada puede evitar roturas prematuras en zonas finas, mejorar la flexibilidad en la dirección del movimiento y garantizar la estabilidad del conjunto durante el funcionamiento.

La correcta definición de estos parámetros constituye un criterio de diseño fundamental que permite obtener cejas impresas con la calidad, precisión y propiedades mecánicas necesarias para su integración en un sistema de expresión facial robótico.

#### 4.4 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO

El diseño de un mecanismo capaz de mover cejas robóticas requiere seleccionar un sistema de transmisión de movimiento que convierta la acción del servomotor en un desplazamiento preciso, suave y controlado. La elección de la transmisión es un factor determinante tanto para la calidad expresiva como para la fiabilidad mecánica del conjunto, especialmente considerando las dimensiones reducidas y las limitaciones de espacio dentro de la cabeza. Existen diversas alternativas viables, cada una con ventajas e inconvenientes que deben evaluarse en función del comportamiento deseado.

Uno de los métodos más sencillos es la transmisión por biela-manivela, en la que el giro del servomotor se transforma en un movimiento lineal o angular mediante una varilla articulada. Esta solución destaca por su simplicidad, bajo coste y facilidad de impresión en 3D, además de proporcionar un movimiento estable y repetible. Sin embargo, su precisión depende de la longitud de las bielas y de la ausencia de holguras, por lo que requiere un ajuste fino en prototipos reducidos.

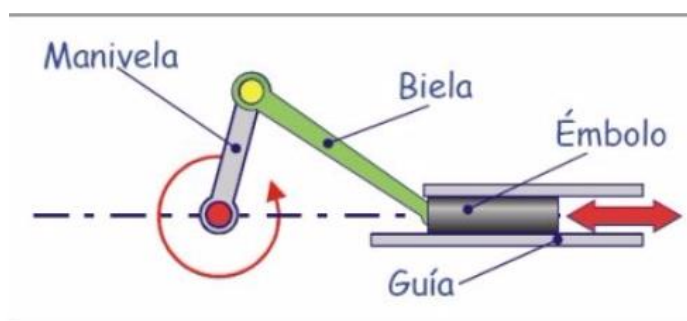


Figura 14. Mecanismo biela.manivela.

Otra alternativa es la transmisión mediante husillo, en la que el giro del motor se convierte en un desplazamiento lineal mediante un tornillo y una tuerca móvil. Este sistema permite

obtener un movimiento muy controlado y preciso, especialmente útil cuando se requiere ajustar la posición de las cejas con incrementos finos y repetibles. Además, el husillo proporciona estabilidad y evita retrocesos, manteniendo la posición incluso cuando el motor no está activo. No obstante, su principal inconveniente es la ocupación de espacio longitudinal y la necesidad de un alineamiento preciso entre el husillo y la tuerca, lo cual puede complicar la integración en volúmenes reducidos como la parte superior de la cabeza.



*Figura 15. Transmisión de movimiento mediante husillo y tuerca.*

Los sistemas de cable o hilo tensado constituyen una alternativa ligera y flexible, ampliamente utilizados en robótica blanda y mecanismos faciales humanoides. Mediante el uso de hilos de nylon o filamentos resistentes, el movimiento rotacional del servomotor se transmite por tracción, permitiendo desplazamientos fluidos y silenciosos. Su principal ventaja es la capacidad de adaptarse a geometrías complejas; no obstante, requieren un guiado adecuado y mecanismos de tensado que eviten holguras o pérdidas de precisión con el tiempo.

La transmisión mediante engranajes es otra opción sólida, especialmente adecuada cuando se necesita transformar o reducir el movimiento del actuador. Engranajes rectos, cónicos o helicoidales pueden emplearse para ajustar la dirección o la amplitud del movimiento. Aun así, esta solución suele ocupar más volumen y puede generar ruido o fricción no deseada, por lo que su uso en zonas faciales debe considerarse con precaución.

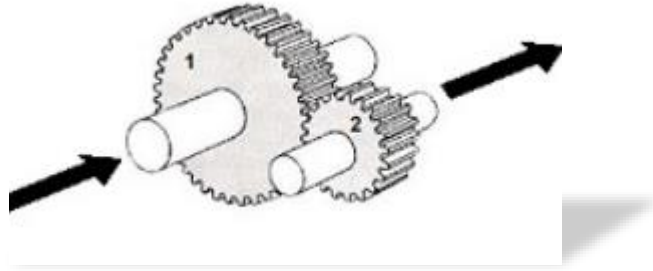


Figura 16. Mecanismo de engranaje.

Finalmente, los micromecanismos mediante levas o perfiles guiados permiten definir movimientos muy precisos mediante el contacto entre una leva y un seguidor. Aunque posibilitan un control exacto de la trayectoria, su diseño e impresión resultan más complejos, y su durabilidad depende del ajuste entre superficies.

La selección del tipo de transmisión dependerá del espacio disponible, la naturalidad del movimiento buscado, la facilidad de integración y la capacidad del material de soportar esfuerzos repetitivos. Cada sistema ofrece un compromiso distinto entre precisión, simplicidad y realismo, por lo que debe evaluarse en relación con los requisitos expresivos del robot y las limitaciones estructurales del mecanismo.

## 4.5 MATERIAL DEL MECANISMO

La selección del material para los mecanismos encargados de transmitir el movimiento hacia las cejas robóticas constituye un factor clave para garantizar la durabilidad, precisión y estabilidad del sistema. Dependiendo del tipo de transmisión (husillo, biela-manivela, cables tensados, engranajes o levas), los requisitos mecánicos pueden variar significativamente. Por ello, es necesario analizar qué materiales ofrecen el equilibrio adecuado entre resistencia, peso, rigidez y compatibilidad con técnicas de fabricación como la impresión 3D.

Uno de los materiales más utilizados para piezas estructurales en prototipos es el PLA, debido a su facilidad de impresión, su estabilidad dimensional y su rigidez. Estas cualidades lo hacen adecuado para elementos que no requieren flexión, como piezas guía, soportes o componentes de engranajes de baja carga. Sin embargo, su fragilidad ante esfuerzos

repetitivos o su baja resistencia térmica pueden limitar su durabilidad en mecanismos sometidos a movimiento continuo.

El PETG representa una alternativa más resistente y flexible. Su mayor tenacidad y capacidad para absorber cargas sin fracturarse lo convierten en un material adecuado para husillos impresos en 3D, alojamientos de tuercas o componentes que deban soportar fricción moderada. Además, su menor tendencia a romperse por fatiga lo hace adecuado para mecanismos sometidos a uso repetitivo.

En sistemas que requieren deslizamiento suave o alta precisión, especialmente en husillos, puede recurrirse a materiales técnicos como el nylon PA12. Este polímero destaca por su baja fricción, su excelente resistencia al desgaste y su capacidad para soportar cargas mecánicas elevadas sin perder estabilidad. Su uso es especialmente recomendable cuando se pretende imprimir tuercas móviles, engranajes o piezas sometidas a contacto continuo.

Para transmisiones basadas en cables tensados, los materiales deben combinar flexibilidad, resistencia a la tracción y estabilidad frente al desgaste. Los hilos de nylon, Dyneema o Kevlar son opciones habituales en robótica, ya que presentan una elevada relación resistencia-peso y mantienen la tensión sin deformaciones apreciables. Estos filamentos permiten movimientos suaves y precisos, aunque requieren un guiado cuidadoso para evitar rozamientos.

Otra alternativa para mejorar la resistencia estructural de piezas impresas es el uso de materiales compuestos, como PLA reforzado con fibra de carbono o PETG con fibra de vidrio. Estos materiales incrementan la rigidez y la estabilidad dimensional, lo que resulta especialmente útil para elementos del mecanismo que deben mantener tolerancias estrechas. No obstante, su abrasividad exige boquillas de acero endurecido para evitar desgaste prematuro en la impresora.

Finalmente, en prototipos que busquen máxima durabilidad o suavidad de funcionamiento, puede considerarse el uso de componentes metálicos, especialmente husillos roscados en acero, tuercas de latón o pequeños engranajes metálicos. Aunque esto incrementa el peso y dificulta la fabricación personalizada, proporciona un rendimiento mecánico superior y una vida útil más larga, especialmente en zonas sometidas a fricción constante.

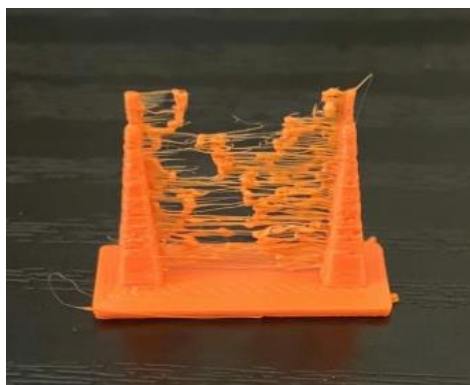
Es decir, la elección del material dependerá del tipo de transmisión seleccionado, del nivel de precisión requerido y de las restricciones volumétricas del interior de la cabeza. Un análisis equilibrado entre propiedades mecánicas, facilidad de fabricación y compatibilidad con la impresión 3D permitirá diseñar un mecanismo fiable y adecuado para el movimiento expresivo de las cejas robóticas.

## 4.6 DIFICULTAD DE IMPRESIÓN DE LOS MATERIALES

La elección del material no solo condiciona las propiedades mecánicas del mecanismo, sino también la viabilidad del proceso de fabricación mediante impresión 3D. Cada polímero presenta particularidades que pueden afectar a la precisión, la estabilidad dimensional y la repetibilidad de las piezas, especialmente en componentes pequeños y funcionales como los elementos del mecanismo de transmisión o las cejas robóticas. Por ello, las dificultades de impresión deben considerarse como un criterio de diseño relevante a la hora de seleccionar tanto el material como la geometría final de cada pieza.

El PLA es uno de los materiales más sencillos de imprimir, ya que presenta baja tendencia a la deformación, buena adhesión entre capas y una contracción térmica mínima. No obstante, en piezas pequeñas puede generar bordes frágiles y zonas propensas a la rotura, especialmente cuando se requieren espesores reducidos o mecanismos con elementos delgados. Además, su baja resistencia térmica puede generar deformaciones si el mecanismo se encuentra próximo a servomotores que alcancen temperaturas elevadas.

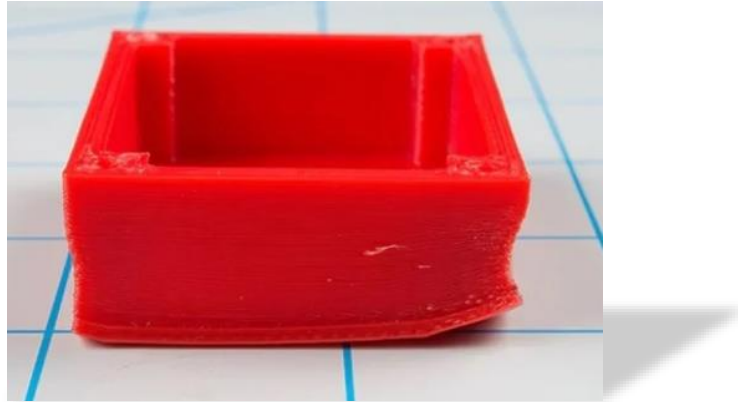
En el caso del PETG, aunque ofrece mayor resistencia mecánica, su impresión implica ciertas dificultades adicionales. Tiende a generar hilos (stringing) (Figura 17), requiere velocidades más bajas y una calibración cuidadosa para evitar acumulación de material en zonas estrechas. Estas características pueden afectar a la precisión dimensional de elementos que exigen tolerancias ajustadas, como engranajes pequeños, orificios para varillas o alojamientos de tuercas. Además, su adhesión entre capas, aunque elevada, puede dificultar la eliminación de soportes sin dañar la pieza.



*Figura 17. Stringing de PETG.*

El TPU, por su naturaleza flexible, presenta uno de los mayores desafíos. Su elasticidad provoca que el filamento tienda a doblarse dentro del extrusor, dificultando la alimentación en impresoras no preparadas para materiales flexibles. Asimismo, requiere velocidades muy bajas y una regulación específica de retracciones para evitar atascos. En piezas pequeñas, los movimientos rápidos o cambios bruscos de dirección pueden generar imperfecciones, y la definición de bordes puede ser inferior a la de materiales rígidos. Estas limitaciones deben tenerse en cuenta si se busca una estética precisa o un movimiento controlado.

El nylon (PA12) destaca por su excelente comportamiento mecánico, pero su impresión es especialmente compleja. Su elevada absorción de humedad puede provocar deformaciones, burbujeo o pérdida de precisión si no se seca adecuadamente antes de imprimir. Además, su tendencia al warping (la deformación de una pieza cuando se levanta de la base de impresión) (figura 18) requiere cama caliente, adhesivos específicos y una carcasa cerrada para mantener una temperatura estable. Piezas pequeñas como engranajes o tuercas móviles pueden contraerse más de lo esperado, alterando la compatibilidad con otras piezas del mecanismo.



*Figura 18.Warping*

En resumen, las dificultades de impresión asociadas a cada material deben considerarse desde la fase de diseño, ya que influyen directamente en la calidad del mecanismo final y en su capacidad para integrarse con precisión dentro de la cabeza del robot. Evaluar estos factores permite seleccionar materiales que equilibren la viabilidad de fabricación, la durabilidad y el comportamiento mecánico, garantizando un diseño funcional y adecuado para los requisitos expresivos del sistema.

## 5. DISEÑO

A continuación, vamos a justificar las decisiones tomadas en base a los criterios de diseño anteriormente mencionados. Comenzaremos por el mecanismo elegido.

### 5.1 MECANISMO

A la hora de definir el mecanismo encargado de accionar las cejas, fue necesario valorar qué tipo de transmisión podía ofrecer un movimiento suficientemente controlado, reproducible y compatible con las características del prototipo. Entre todas las alternativas estudiadas, el sistema husillo–tuerca resultó ser la opción más adecuada para las exigencias del proyecto.

La principal razón de esta elección radica en la precisión del desplazamiento lineal que proporciona este mecanismo. Dado que el gesto de las cejas requiere movimientos pequeños y muy definidos, la capacidad del husillo para transformar la rotación del servomotor en un avance lineal progresivo, sin saltos ni holguras excesivas, resulta especialmente ventajosa frente a otras soluciones más sensibles a variaciones o desajustes.

Además, este sistema destaca por su estabilidad y comportamiento predecible. A diferencia de las transmisiones mediante bielas o engranajes, cuyos movimientos dependen de múltiples puntos de articulación o contacto, el husillo mantiene una relación directa entre el giro del motor y el desplazamiento obtenido. Esto simplifica el control y facilita la calibración posterior del mecanismo.

Otro aspecto relevante es su compatibilidad con la fabricación mediante impresión 3D. Mientras que engranajes de pequeño tamaño o sistemas de varillaje requieren tolerancias muy estrictas (difíciles de garantizar con tecnologías FDM domésticas), el husillo y la tuerca admiten ligeras variaciones sin comprometer su funcionalidad. De este modo, el mecanismo puede reproducirse con fiabilidad sin necesidad de procesos de mecanizado de alta precisión.

Finalmente, su configuración compacta y lineal permite integrarlo de manera ordenada dentro de la cabeza, evitando interferencias con los elementos existentes y simplificando el montaje. Esta geometría facilita además el guiado del movimiento hacia las cejas,

minimizando la cantidad de piezas necesarias y reduciendo la probabilidad de desajustes con el uso.

Para continuar, vamos a ver más en profundidad los componentes de este mecanismo.

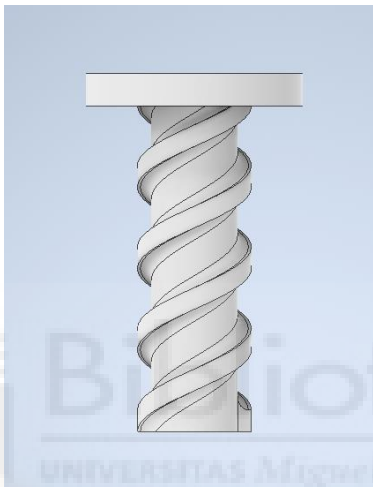
### 5.1.1 HUSILLO

Para el diseño del husillo se han considerado varios criterios fundamentales que determinan tanto su configuración geométrica como su comportamiento funcional. Los factores más relevantes han sido el espacio disponible en el interior de la cabeza, el recorrido angular del servomotor y la posición exacta en la que debía integrarse el husillo dentro del mecanismo. Estos elementos han condicionado directamente la longitud útil del husillo y las características de su rosca.

Dado que el espacio disponible interno destinado al mecanismo es reducido, la longitud del husillo debía mantenerse en valores mínimos para evitar interferencias con otros componentes. Sin embargo, la reducción de longitud implica también una disminución del desplazamiento lineal total que puede obtenerse. Considerando que el servomotor utilizado dispone de un giro aproximado de  $180^\circ$ , era necesario compensar esta limitación aumentando el paso de la rosca, de manera que cada grado de giro generase un avance lineal suficiente para producir un movimiento visible en las cejas. Por este motivo, se optó por un paso elevado, que permite maximizar el recorrido lineal a pesar de la longitud reducida disponible.

Además, para incrementar aún más el desplazamiento obtenido por revolución, se decidió incorporar un doble hilo en el diseño del husillo. Esta solución permite duplicar el avance lineal respecto al que proporcionaría una rosca de un solo hilo, multiplicando el efecto del giro del servomotor sin aumentar el tamaño del mecanismo. De este modo, se consigue un desplazamiento mayor con un número muy reducido de vueltas, lo cual es esencial para obtener expresividad apreciable en un espacio tan limitado.

En cuanto a la geometría del diente, los husillos suelen emplear perfiles trapezoidales por su facilidad de fabricación y buena resistencia al desgaste, y es por ello que es el perfil utilizado en este caso. La razón principal es que el husillo estará dispuesto en posición vertical y se requiere minimizar cualquier tendencia al deslizamiento de la tuerca cuando el mecanismo se detenga. El perfil trapezoidal ofrece caras laterales más perpendiculares, lo que aumenta la resistencia al retroceso y mejora la estabilidad posicional cuando el motor deja de aplicar par.



*Figura 19. Husillo.*

Asimismo, el husillo incorpora en su extremo superior una plataforma circular con cuatro taladros distribuidos simétricamente, como se puede observar en la figura 20. Estos taladros permiten fijar un adaptador que conecta directamente el husillo con el eje del servomotor, garantizando una transmisión sólida y evitando desalineamientos durante el funcionamiento.

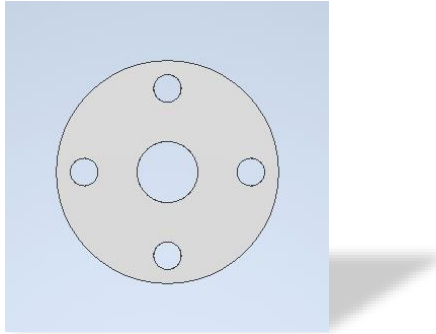


Figura 20. Cabeza del husillo.

Por último, es importante señalar que las cargas a las que estará sometido el husillo en esta aplicación son muy reducidas, ya que el sistema únicamente debe desplazar las cejas sin soportar esfuerzos significativos. Esto permite asegurar que el husillo, incluso fabricado mediante impresión 3D, ofrecerá la resistencia mecánica necesaria para un funcionamiento fiable y seguro.

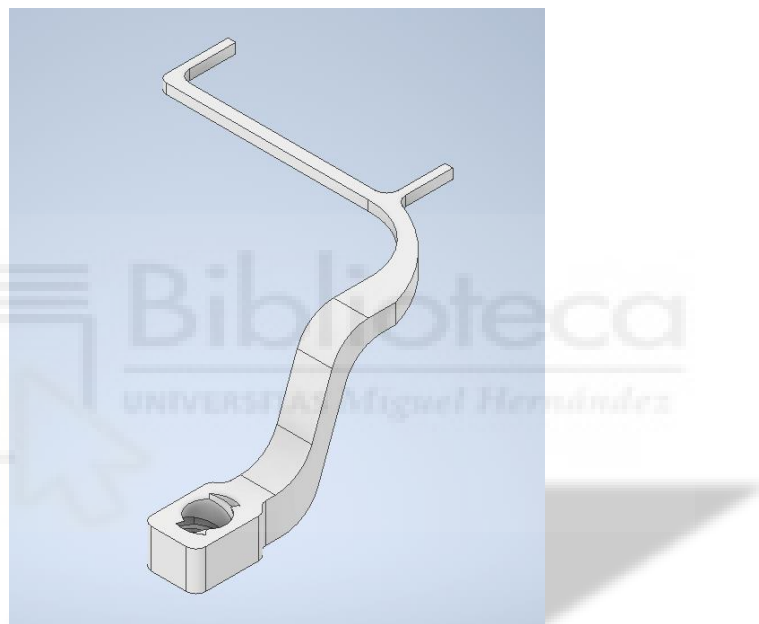
### 5.1.2 TUERCA

La tuerca constituye el elemento encargado de transformar el desplazamiento lineal generado por el husillo en el movimiento vertical de las cejas. Para integrarse correctamente en el espacio interno de la cabeza robótica fue necesario diseñarla con una geometría no convencional. En lugar de utilizar una pieza simétrica o de contornos rectos, se optó por una forma inspirada en una estructura ramificada, similar a una rama de árbol. Esta configuración orgánica permite que la pieza esquive los componentes ya presentes en la zona superior de la cabeza (principalmente los mecanismos oculares) evitando interferencias durante su desplazamiento.

En la parte inferior de la tuerca se dispone un agujero roscado, encargado de engranar con el diente del husillo. Desde este punto de conexión, la pieza se prolonga siguiendo un recorrido ascendente que permite sortear el volumen ocupado por los ojos y sus servomotores. Posteriormente, la tuerca se desplaza hacia el lateral izquierdo mediante una rama principal alargada, de la cual emergen dos prolongaciones menores. Estas dos ramas finales se insertan

en ranuras específicas diseñadas en la zona frontal interna de la cabeza y actúan como puntos de anclaje directo para las futuras cejas impresas en 3D.

Gracias a esta morfología ramificada, la tuerca es capaz de transmitir el movimiento del husillo hacia ambas cejas simultáneamente, distribuyendo el desplazamiento de manera equilibrada y sin invadir zonas críticas del interior de la cabeza. Además, la forma flexible de su diseño permite adaptarse al entorno geométrico complejo del robot sin comprometer la estabilidad ni la precisión del sistema.



*Figura 21. Tuerca.*

### 5.1.3 CEJAS

Las cejas constituyen la parte visible del sistema de expresividad y, por tanto, desempeñan un papel fundamental en la percepción emocional del robot. Su diseño no solo debe ser compatible con el mecanismo de desplazamiento, sino que además debe transmitir de forma clara las variaciones gestuales que el movimiento del husillo-tuerca genere. Dado que son el elemento directamente observado por el usuario, su geometría influye de manera decisiva en la naturalidad y legibilidad de las expresiones faciales.

Para este proyecto se han seleccionado unas cejas de forma estándar, con una curvatura suave y un grosor uniforme, a fin de obtener un aspecto neutro que pueda adaptarse a diferentes configuraciones expresivas (sorpresa, enfado, tristeza, duda, entre otras). Esta elección responde a la necesidad de evitar formas excesivamente estilizadas o exageradas que pudieran limitar la versatilidad emocional del robot o provocar interpretaciones no deseadas.

Además, las cejas se han diseñado con una base optimizada para su acoplamiento directo a las ramas terminales de la tuerca, garantizando un montaje estable y evitando holguras que puedan restar precisión al movimiento. Este enfoque asegura que las variaciones generadas por el mecanismo se traduzcan de manera fiel en la expresión final, manteniendo la coherencia estética y funcional del conjunto.

La unión con las ramas no se hará con tornillería ni con adhesivo, se ha diseñado con la holgura justa y necesaria para encajar ambas piezas como si fuesen un puzle. De esta manera, facilitamos el desmontaje para el futuro mantenimiento que se le vaya a realizar.

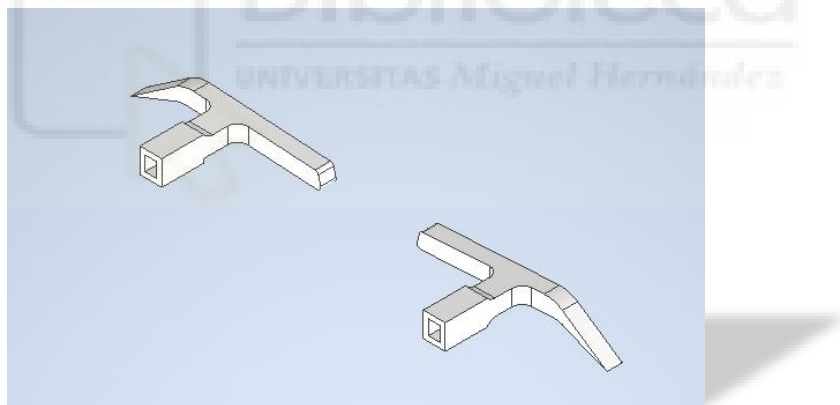


Figura 22. Vista isométrica de las cejas.

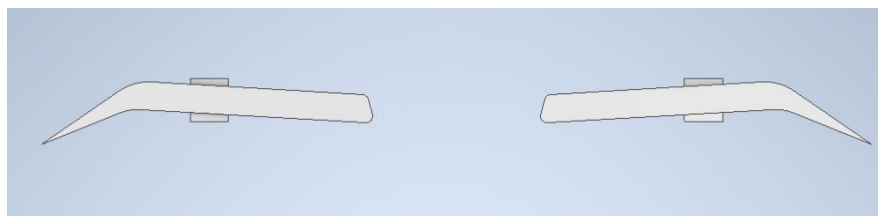


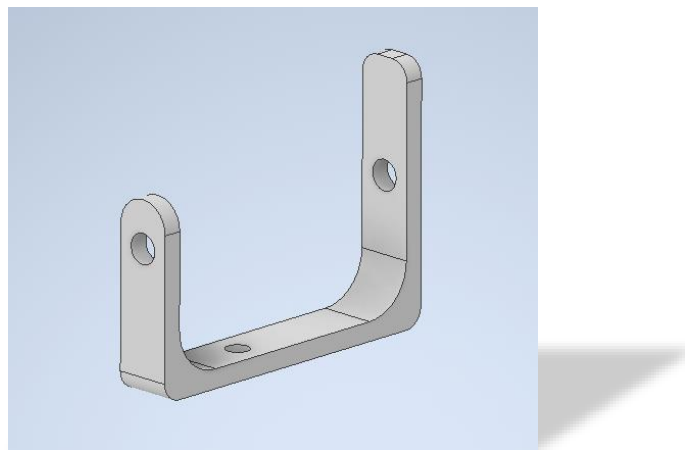
Figura 23. Vista frontal de las cejas.

#### 5.1.4 SUJECCIÓN

El soporte del servomotor es un elemento esencial para garantizar la estabilidad del sistema de accionamiento. Su función principal es mantener el servomotor completamente fijo durante el funcionamiento, evitando desplazamientos o vibraciones que puedan afectar negativamente al movimiento de las cejas y a la precisión del mecanismo.

El diseño adoptado consiste en una pieza de sujeción en forma de “U”, concebida para abrazar el servomotor y fijarlo simultáneamente a tres puntos estructurales: el propio servo, la superficie interna del cráneo y una pieza impresa adicional que forma parte de la estructura interna de la cabeza. Esta triple fijación permite distribuir las fuerzas y eliminar cualquier grado de libertad no deseado, evitando que el motor se incline, gire o flexe durante su funcionamiento.

Al no dejar extremos libres y al asegurar el contacto firme en varias direcciones, la pieza reduce de forma significativa la transmisión de vibraciones al mecanismo. Esto resulta especialmente importante en un sistema tan sensible, donde pequeñas oscilaciones podrían traducirse en movimientos imprecisos o temblores visibles en las cejas. Gracias a esta configuración, el servomotor opera de manera estable y constante, proporcionando un accionamiento limpio y fiable.

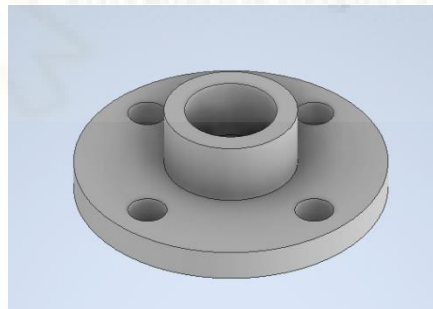


*Figura 24. Pieza de sujeción.*

### 5.1.5 ADAPTADOR

El adaptador constituye el elemento responsable de transmitir el par del servomotor al husillo. Se trata de una pieza incluida originalmente entre los componentes de la cabeza robótica, diseñada para acoplarse directamente al eje del servo. Su geometría es esencialmente circular, y dispone de un orificio central que permite fijarlo firmemente al eje mediante un tornillo, asegurando así una conexión rígida y sin holguras.

La función principal del adaptador es garantizar una transferencia de movimiento precisa y estable entre el servomotor y el husillo. Al actuar como interfaz mecánica entre ambos elementos, evita deslizamientos, desalineaciones o pérdidas de par que podrían comprometer la calidad del desplazamiento lineal generado. Gracias a esta pieza, la rotación del servo se transmite de forma uniforme al husillo, permitiendo que el mecanismo funcione de manera fiable y que las cejas reproduzcan con exactitud los movimientos previstos por el diseño.



*Figura 25. Adaptador.*

## 5.2 MATERIAL

El material elegido para la fabricación tanto del mecanismo como de las cejas ha sido PLA. Esta decisión responde a una combinación de factores relacionados con la facilidad de impresión, la precisión dimensional y la resistencia mecánica, aspectos especialmente relevantes en un mecanismo compacto y con tolerancias ajustadas como el diseñado.

En primer lugar, el PLA ofrece una excelente procesabilidad en impresión 3D FDM, permitiendo obtener piezas con buena resolución, superficies uniformes y baja contracción térmica. Estas características reducen la probabilidad de deformaciones, alabeos o errores dimensionales que podrían comprometer el funcionamiento del husillo, la tuerca o los soportes. Si bien es cierto que el PLA puede mantenerse ligeramente blando durante los primeros minutos tras la impresión, basta con extremar el cuidado al retirarlo de la cama para evitar deformaciones no deseadas.

Desde el punto de vista mecánico, el PLA proporciona una rigidez suficiente para resistir las fuerzas generadas durante el movimiento del mecanismo, que en este caso son muy reducidas. Su estabilidad dimensional permite que elementos como la rosca del husillo o las guías del mecanismo mantengan una geometría precisa, condición indispensable para asegurar un movimiento fluido y sin holguras.

En comparación con otros materiales de impresión, como PETG o TPU, el PLA ofrece una ventaja clara en cuanto a precisión. El PETG, aunque más resistente, tiende a formar hilos (figura 17) y presenta una mayor flexibilidad, lo que puede dificultar la obtención de roscas finas o piezas donde la rigidez sea esencial para el correcto funcionamiento del sistema. Por su parte, materiales flexibles como el TPU resultan inadecuados para componentes donde se requiere rigidez estructural, aunque podrían ser interesantes para elementos estéticos como las cejas en iteraciones futuras.

En el caso concreto de las cejas, aunque existen opciones potencialmente más realistas (como elastómeros o polímeros flexibles que imiten mejor el movimiento del cabello o la piel), para la funcionalidad buscada en esta fase del proyecto (añadir un grado de libertad y evaluar su expresividad) resulta suficiente utilizar un material rígido como el PLA. Las cejas impresas en PLA permiten una transmisión directa del movimiento, simplifican el montaje y evitan problemas de deformación o vibración. Para futuras líneas de mejora, podría estudiarse la sustitución de este material por uno más flexible o con propiedades estéticas mejoradas, dependiendo del comportamiento expresivo que se desee alcanzar.

En cuanto a los parámetros de impresión, hablaremos de ellos en el siguiente apartado.

## 6. FABRICACIÓN

La fabricación de las piezas se realizará en la impresora 3D proporcionada por la Universidad Miguel Hernández, modelo Ender 3 V3 Plus (figura 26). Para garantizar que cada componente cumpla los requisitos dimensionales y funcionales del diseño, es imprescindible preparar correctamente el archivo y ajustar el laminador. A continuación, se detalla el laminador usado, el procedimiento de trabajo con los parámetros y comprobaciones clave.



Figura 26. Ender 3 V3 Plus.

### 6.1 LAMINADOR

Antes de realizar cualquier impresión 3D, es necesario procesar el modelo 3D para convertirlo en un conjunto de instrucciones que la impresora pueda interpretar. Esta tarea la realiza un laminador (slicer), un software que divide el modelo tridimensional en capas horizontales y genera el código G (G-code) que contiene todos los parámetros de fabricación: temperaturas, velocidades, rutas de movimiento, altura de capa, retracciones, patrones de relleno y configuración de soportes, entre otros. El laminador es, por tanto, una herramienta esencial que determina la calidad final de la pieza y su adecuación funcional a los requisitos del diseño.

Para este proyecto se ha utilizado PrusaSlicer (figura 27), un laminador avanzado desarrollado por Prusa Research. Este software destaca por su precisión, su alto grado de personalización y su compatibilidad con una amplia variedad de impresoras FDM, incluida la Ender 3 V3 Plus empleada en este trabajo. PrusaSlicer ofrece perfiles de impresión configurables, control detallado sobre la geometría de las capas, herramientas de análisis del modelo y opciones de previsualización que permiten comprobar el comportamiento de la boquilla en cada punto de la impresión. Su interfaz facilita el ajuste de parámetros críticos (como altura de capa, densidad de relleno, soportes o temperatura) proporcionando un control exhaustivo sobre la fabricación de piezas funcionales, como las que forman parte del mecanismo de accionamiento de las cejas.

Gracias a estas capacidades, PrusaSlicer permite optimizar el proceso de impresión para obtener componentes con una buena precisión dimensional, una correcta adhesión entre capas y un comportamiento mecánico adecuado, elementos fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del mecanismo desarrollado.

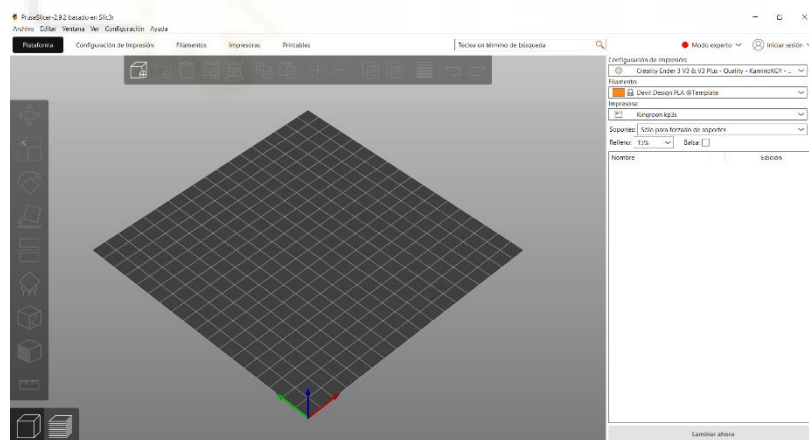


Figura 27. Laminador PrusaSlicer.

## 6.2 PREPARACIÓN DEL MODELO

Para comenzar el proceso de fabricación de las piezas diseñadas, es necesario convertir los modelos CAD al formato compatible con el laminador. En este caso, los modelos se exportan desde Autodesk Inventor en formato .stl, que es el estándar utilizado por PrusaSlicer para generar el G-code. Una vez obtenidos los archivos, se procede a abrir PrusaSlicer e importar cada una de las piezas en el espacio de trabajo (figura 28).

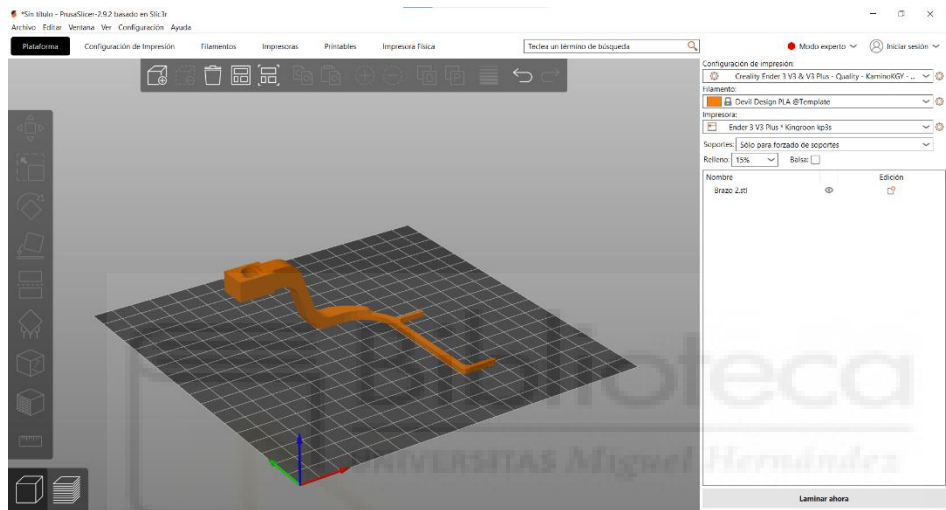


Figura 28. Pieza importada al laminador.

Al cargarse el modelo, este aparece representado en 3D sobre la plataforma virtual de impresión, adoptando una orientación predeterminada que no siempre coincide con la más adecuada para obtener una impresión correcta. Por este motivo, es imprescindible reorientar cada pieza según sus necesidades geométricas y funcionales, optimizando aspectos como la estabilidad, la superficie de contacto con la cama y la reducción de soportes.

Adicionalmente, en función de la forma de la pieza, será necesario evaluar si existen zonas en voladizo que requieran la generación de soportes para garantizar la correcta fabricación. De ser así, PrusaSlicer permite configurarlos de manera personalizada para equilibrar la estabilidad estructural y la facilidad de retirada posterior.

También es necesario configurar los parámetros con los que se va a imprimir cada pieza, pues son los que determinarán la calidad final de cada una de ellas.

Una vez todo listo, laminaremos la pieza y exportaremos el G-code que utilizará la impresora para fabricar la pieza.

Para continuar, se detallará la orientación final seleccionada y los parámetros para cada componente del mecanismo.

## 6.3 ORIENTACIÓN Y PARÁMETROS

Vamos a estudiar cada pieza para ver cuál es la manera óptima para fabricarlas.

### 6.3.1 ORIENTACIÓN DEL HUSILLO

Comenzaremos por el husillo. Esta pieza cuenta con una base superior plana que puede emplearse como superficie de apoyo durante la impresión, garantizando una fijación estable a la cama. Aunque podría parecer que los hilos de la rosca requieren soportes debido a los pequeños voladizos que presentan, en este caso se ha decidido no utilizarlos.

La razón principal es que la impresora empleada es capaz de reproducir voladizos de poca longitud sin comprometer la calidad de la pieza, especialmente tratándose de un componente de dimensiones reducidas. La geometría ligera del diente, junto con la precisión propia de la Ender 3 V3 Plus al trabajar con PLA, permite que la rosca se forme correctamente sin necesidad de estructuras adicionales. Además, evitar los soportes facilita el postprocesado y reduce el riesgo de dañar la rosca durante su retirada. Por tanto, se laminará de la manera que vemos en la figura 29.

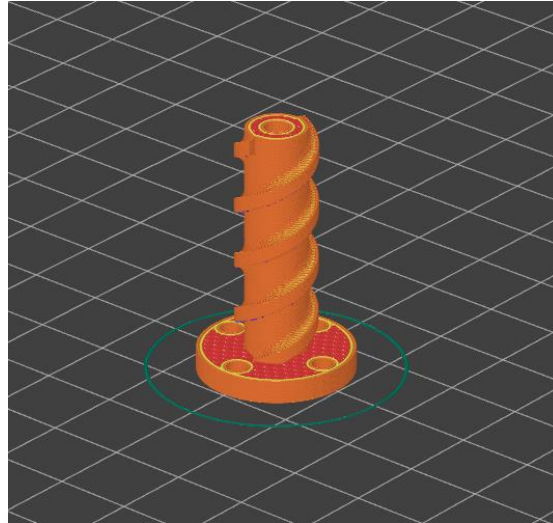
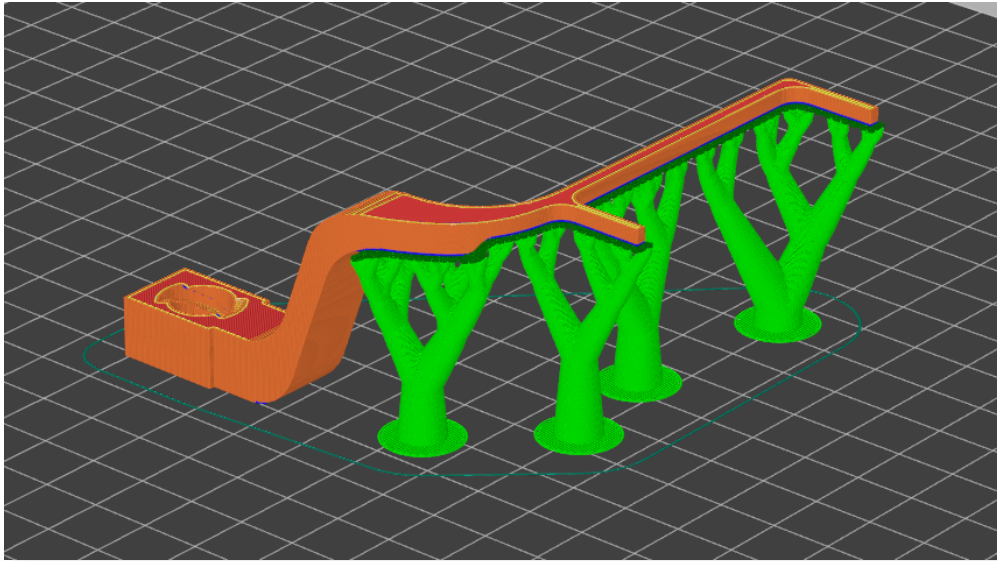


Figura 29. Orientación del husillo.

### 6.3.2 ORIENTACIÓN DE LA TUERCA

En el caso de la tuerca, existe una consideración fundamental: su ajuste debe ser lo más preciso posible con respecto al husillo. Para garantizar esta precisión, se ha priorizado la correcta impresión del agujero roscado, ya que de él depende la calidad del acoplamiento y la suavidad del desplazamiento lineal. Por este motivo, la pieza se ha orientado de modo que la superficie que contiene la rosca quede directamente apoyada sobre la cama de impresión (figura 30). Con esta orientación, la rosca se fabrica de manera vertical, lo que permite obtener una definición más limpia y un perfil más uniforme, minimizando irregularidades que podrían generar fricción o bloqueos durante el funcionamiento.

Al igual que ocurría en el husillo, la rosca de la tuerca puede imprimirse sin necesidad de soportes, dado que las capas sucesivas se apoyan entre sí y no presentan voladizos críticos. Sin embargo, la parte superior de la tuerca (la que conecta con las cejas mediante las ramas más finas) sí contiene voladizos pronunciados que no pueden sostenerse por sí solos. En este caso, es necesario utilizar soportes, seleccionando la modalidad de soportes orgánicos, la cual se detalla más adelante.



*Figura 30. Orientación de la tuerca.*

### 6.3.3 ORIENTACIÓN DE LAS CEJAS

En el caso de las cejas, su orientación para la impresión es también sencilla gracias a que disponen de una superficie plana. Esta cara permite apoyar la pieza de manera estable sobre la cama, garantizando una correcta adhesión y evitando la necesidad de utilizar soportes adicionales. Al no presentar voladizos significativos en esta posición, toda la geometría puede imprimirse de forma limpia y continua, optimizando tanto el tiempo de impresión como la calidad superficial. La orientación final puede observarse en la figura 31.

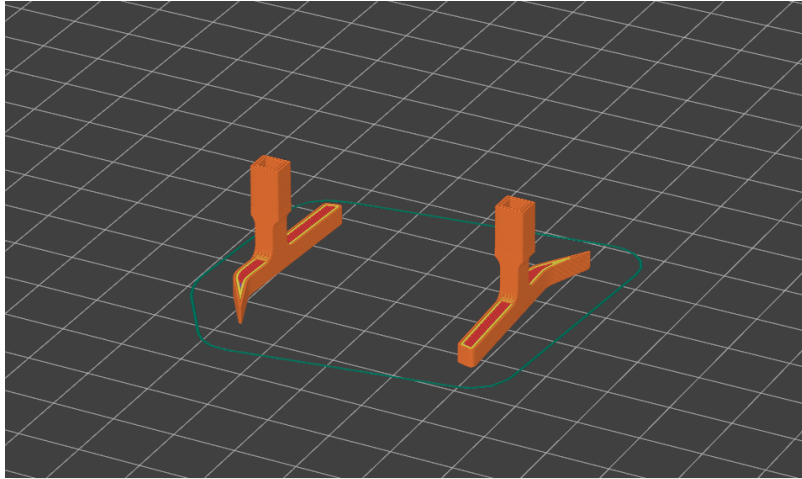


Figura 31. Orientación de las cejas.

#### 6.3.4 ORIENTACIÓN EN LAS SUJECIONES

En el caso de las piezas de sujeción, es fundamental garantizar su resistencia estructural, ya que serán las encargadas de soportar el peso del mecanismo completo. Para ello, se ha priorizado la orientación de las capas de impresión de modo que queden perpendiculares a la dirección del esfuerzo principal, como se puede observar en la figura 32. Esta disposición mejora notablemente el comportamiento mecánico de la pieza, ya que evita que la carga actúe paralelamente a las capas, situación que reduciría de forma significativa la resistencia y disminuiría el coeficiente de seguridad del conjunto.

Con esta orientación, la pieza puede imprimirse sin necesidad de soportes adicionales. Aunque la zona superior de los taladros pueda presentar cierto riesgo de imprecisión durante la fabricación, esto no supone un inconveniente relevante: cualquier pequeña irregularidad puede corregirse fácilmente mediante un postprocesado ligero, como un limado manual, asegurando así un ajuste adecuado para los tornillos o elementos de fijación.

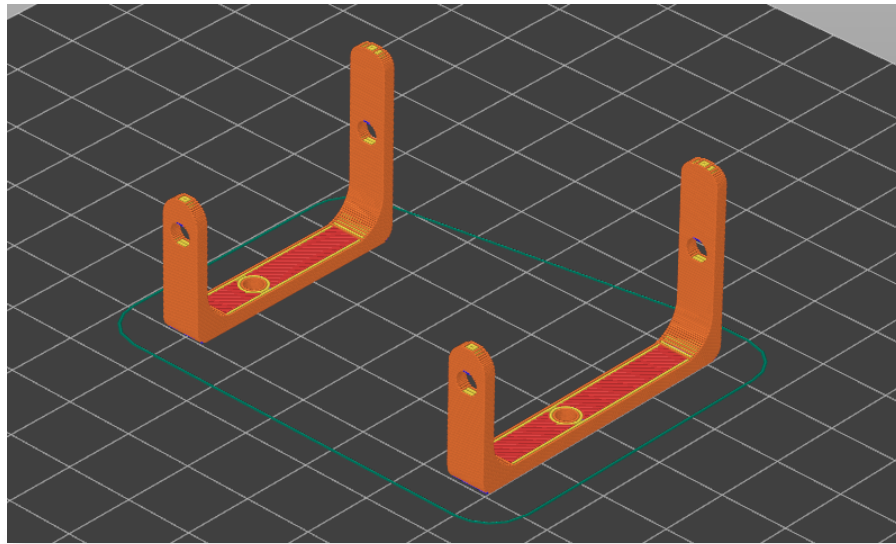


Figura 32. Orientación de las sujeciones.

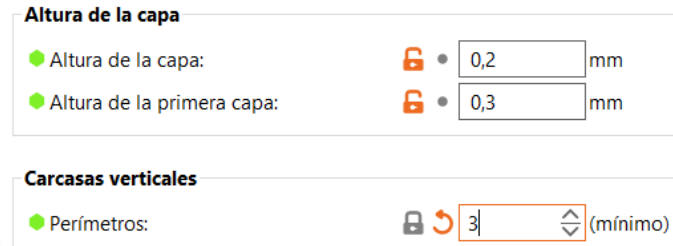
### 6.3.5 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Para garantizar que las piezas del mecanismo (husillo, tuerca, cejas y soportes) presenten la precisión y resistencia necesarias, es imprescindible seleccionar adecuadamente los parámetros de impresión. A continuación, se detallan los parámetros más relevantes y los valores seleccionados para nuestra impresora y para nuestro filamento.

- **Altura de capa:** La altura de capa es el grosor de cada capa de material que se deposita para fabricar una pieza. Determina el nivel de detalle y la suavidad del acabado. Una altura menor mejora la definición de elementos delicados como la rosca del husillo y el agujero roscado de la tuerca. Lo más habitual es usar entre 0,12 y 0,20 mm.

En este caso, le hemos dado una altura de capa de 0,2 mm lo cual es más que suficiente para el nivel de precisión que queremos. Para la primera capa, se suele dar un poquito

más para mejorar la adhesión, por tanto, le hemos dado 0,3 mm a la capa inicial como se puede apreciar en la figura 33.



The image shows a software interface with two sections. The first section is titled "Altura de la capa" and contains two rows. The first row is "Altura de la capa:" with a green dot icon, a lock icon, a text input field containing "0,2", and "mm". The second row is "Altura de la primera capa:" with a green dot icon, a lock icon, a text input field containing "0,3", and "mm". The second section is titled "Carcasas verticales" and contains one row: "Perímetros:" with a green dot icon, a lock icon, a refresh icon, a text input field containing "3", a dropdown arrow icon, and "(mínimo)".

Figura 33. Altura de capa y perímetros.

- **Perímetros de las paredes:** Son el número de líneas de material que el software utiliza para formar las paredes exteriores e interiores de una pieza. El ajuste determina la resistencia, solidez y el grosor de la pieza. Un mayor número de perímetros aumenta la resistencia de la pieza y la hace más robusta. Lo habitual es trabajar con 3-4 perímetros.

Para nuestras impresiones le hemos dado 3 perímetros (figura 33) a todas las piezas menos a las sujeciones, que les hemos dado 4 para que tengan una buena resistencia.

- **Relleno:** El relleno es la estructura interna de la pieza. Afecta directamente tanto a la pieza como al peso. Lo habitual es un 30-40% para componentes funcionales.

Para nuestras piezas hemos utilizado un 40% de relleno para darle un equilibrio entre resistencia y ligereza, salvo en las sujeciones, que hemos optado por darle un 70% de relleno, pensando en que debe ser el responsable de aguantar todo el peso. Además, el relleno se puede configurar para que siga un patrón. Para todas nuestras impresiones hemos usado el relleno cúbico como podemos observar en la figura 33, que es óptimo para aplicaciones de ingeniería.



Figura 34. Relleno.

- **Temperatura de la boquilla:** Define la fluidez del material y la adhesión entre capas. Suele situarse entre 200 y 210 °C para la mayoría de PLAs. Una temperatura demasiado baja puede generar capas frágiles, mientras que una demasiado alta puede causar sobreextrusión o pérdida de definición en los detalles.

En este caso le hemos dado una temperatura de 200°C (figura 35).

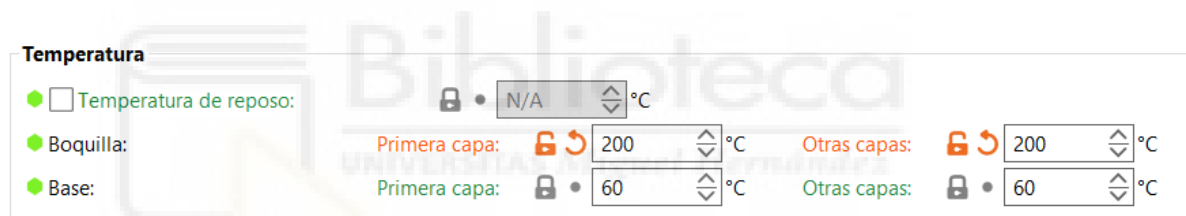


Figura 35. Temperatura de la Boquilla y de la cama.

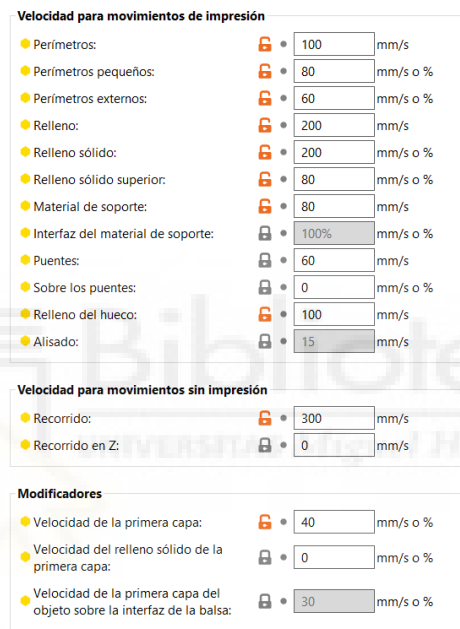
- **Temperatura de la cama:** La temperatura de la cama, que ayuda a la fijación de la primera capa, normalmente se mantiene entre 55 y 60 °C en la Ender 3 V3 Plus, suficiente para evitar que la pieza se despegue sin provocar deformaciones.

A este parámetro le hemos asignado el valor de 60°C para asegurar una buena adhesión de la primera capa, que es la más crítica. (Figura 35)

- **Velocidad de impresión:** La velocidad determina cuán rápido la impresora deposita el material. Aunque la Ender 3 V3 Plus puede alcanzar velocidades elevadas, para obtener buena calidad se prefieren valores moderados, normalmente entre 40 y 50

mm/s. A esta velocidad se reduce la vibración y se mejora la precisión en zonas delicadas, lo que resulta esencial en componentes con tolerancias ajustada.

En este apartado, la velocidad que le asignamos a cada pieza depende de lo que se esté imprimiendo: perímetros, relleno, material de soporte, puentes en voladizo... Así que se mostrarán los parámetros de forma más ordenada en la figura 36:



The image shows a software interface with three sections for configuring printing velocities. Each parameter has a yellow dot icon, a lock icon, a text input field, and a unit label.

Section	Parameter	Value	Unit
Velocidad para movimientos de impresión	Perímetros:	100	mm/s
	Perímetros pequeños:	80	mm/s o %
	Perímetros externos:	60	mm/s o %
	Relleno:	200	mm/s
	Relleno sólido:	200	mm/s o %
	Relleno sólido superior:	80	mm/s o %
	Material de soporte:	80	mm/s
	Interfaz del material de soporte:	100%	mm/s o %
	Puentes:	60	mm/s
	Sobre los puentes:	0	mm/s o %
	Relleno del hueco:	100	mm/s
	Alisado:	15	mm/s
Velocidad para movimientos sin impresión	Recorrido:	300	mm/s
	Recorrido en Z:	0	mm/s
Modificadores	Velocidad de la primera capa:	40	mm/s o %
	Velocidad del relleno sólido de la primera capa:	0	mm/s o %
	Velocidad de la primera capa del objeto sobre la interfaz de la balsa:	30	mm/s o %

Figura 36. Velocidades.

- **Retracciones:** Las retracciones evitan la formación de hilos al mover el cabezal entre zonas sin imprimir. En esta máquina, los parámetros más eficaces suelen ser distancias entre 0,8 y 1,2 mm y velocidades de 30 a 40 mm/s. Estos valores ayudan a mantener superficies limpias y son especialmente útiles en piezas con roscas o pequeños huecos.

En este parámetro usaremos unas retracciones de 0,8 mm y 40 mm/s, como vemos en la figura 37.



Figura 37. Retracciones.

- **Refrigeración:** La refrigeración controla cómo solidifica el material recién depositado. Con PLA, el comportamiento óptimo se consigue poniendo el ventilador de capa al 100 % a partir de la segunda capa para favorecer la adhesión en la primera, la cuál será la configuración que usaremos (figura 38). Esto mantiene la estabilidad dimensional, mejora los voladizos y ayuda a conservar la forma en regiones pequeñas o detalladas, como los hilos de una rosca.

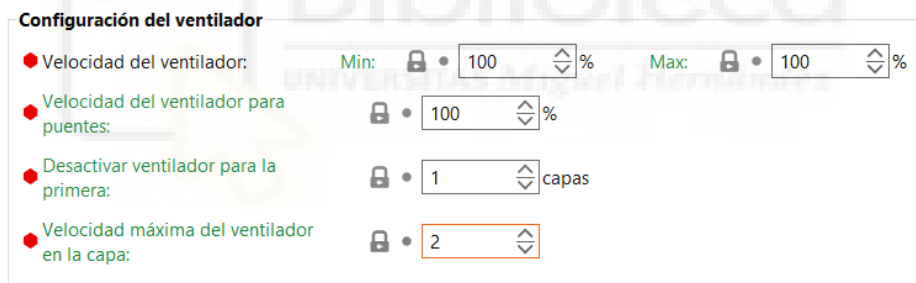


Figura 38. Refrigeración.

- **Adhesión a la cama:** La adhesión a la cama es simplemente asegurarse de que la primera capa de la impresión se quede bien pegada a la superficie, porque si se despegas, toda la pieza se arruina. Para conseguirlo, a veces se usa un **brim**, que es un borde plano que se imprime alrededor de la pieza. Este borde aumenta la superficie que toca la cama y evita que piezas altas o delgadas se levanten o se caigan durante la impresión. En piezas anchas y planas no hace falta usar brim, porque ya se adhieren bien por sí solas. Se puede usar un skirt, que simplemente es trazar una línea de

contorno alrededor de la pieza para depurar el extrusor y asegurarse de que en la primera capa no se formen nudos innecesarios.

Nosotros usaremos el skirt (figura 39), ya que por sí solas, las piezas se adhieren bien a la cama.

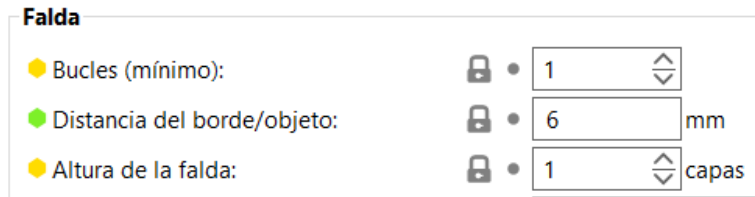


Figura 39. Adhesión a la cama mediante skirt.

- **Soportes:** Los soportes en impresión 3D son estructuras temporales que la impresora crea para sostener partes de la pieza que quedan en el aire y que, sin ayuda, se deformarían o caerían durante la impresión. Se colocan debajo de voladizos, puentes o zonas con mucho ángulo, y se retiran al final del proceso. En la práctica, se ajustan parámetros como el ángulo a partir del cual se generan, la densidad, el patrón y la distancia de separación para equilibrar buena sujeción con una retirada fácil.

Existe la posibilidad de configurarlos en modo “árbol”, que consiste en imprimir soportes en forma de ramas de manera que optimiza el uso de material en vez de poner un “muro” de PLA. También configuraremos su relleno y el ángulo máximo de la rama como podemos ver en la figura 40. Los demás parámetros los dejaremos por defecto.

### Soportes orgánicos









● Ángulo Máximo de la Rama:	 • <input type="text" value="40"/>	°
● Ángulo Preferido de la Rama:	 • <input type="text" value="25"/>	°
● Diámetro de la Rama:	 • <input type="text" value="2"/>	mm
● Ángulo del Diámetro de la Rama:	 • <input type="text" value="5"/>	°
● Diámetro de las ramas con paredes dobles:	 • <input type="text" value="3"/>	mm
● Diámetro de la Punta:	 • <input type="text" value="0,8"/>	mm
● Distancia de ramas:	 • <input type="text" value="1"/>	
● Densidad de la Rama:	 • <input type="text" value="15"/>	%

Figura 40. Soportes.

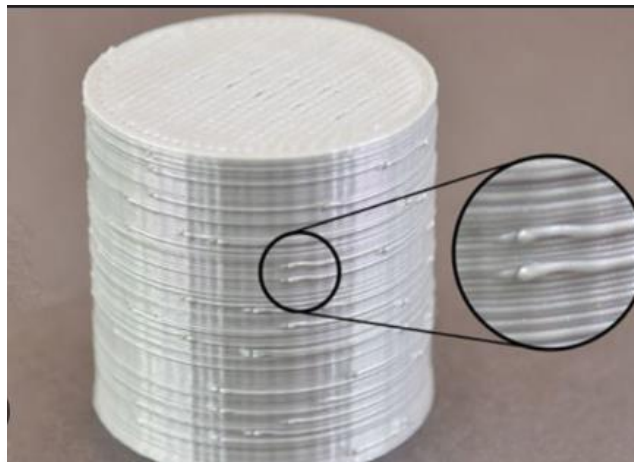


## 7. POSTPROCESADO

El postprocesado comprende el conjunto de operaciones que se realizan sobre una pieza una vez finalizada la impresión con el fin de mejorar su apariencia superficial, su funcionalidad o sus propiedades mecánicas. Entre estas operaciones se incluyen tareas como la retirada de soportes, el lijado para suavizar irregularidades, el ajuste dimensional de zonas críticas, el pegado de elementos independientes o la aplicación de imprimación y pintura para obtener un acabado uniforme. En determinados materiales también pueden emplearse métodos específicos, como el alisado químico por vaporización de acetona en piezas de ABS.

Las técnicas empleadas dependen en gran medida del material utilizado. Por ejemplo, el ABS permite un lijado más eficiente que el PLA, mientras que los materiales flexibles presentan mayor dificultad debido a su deformabilidad.

En nuestro caso, dado que las piezas obtenidas muestran una buena calidad de impresión, el postprocesado necesario será mínimo. Se limitará a la retirada de los soportes y al lijado puntual en aquellas zonas donde puedan haberse generado pequeñas rebabas o imperfecciones derivadas del proceso de impresión.

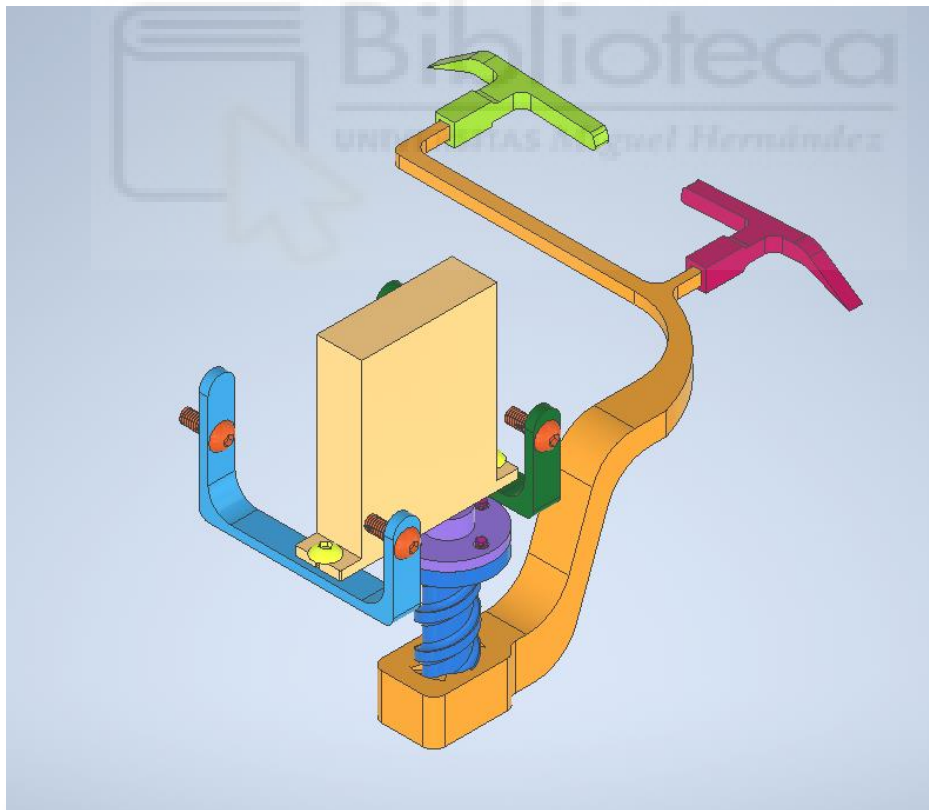


*Figura 41. Rebabas.*

## 8. TORNILLERÍA

La tornillería seleccionada para el ensamblaje del mecanismo pertenece a la misma familia de fijaciones, concretamente tornillos Socket Button Screw (ISO 7380-1) fabricados en acero inoxidable negro A2. Esta elección garantiza uniformidad en el montaje, resistencia adecuada a la corrosión y una estética homogénea en los componentes visibles de la cabeza robótica. Además, la cabeza tipo button proporciona un perfil bajo que evita interferencias con elementos móviles y facilita el montaje en espacios reducidos.

En cuanto a las uniones específicas, se emplearán tornillos M3×5 para fijar el servo al adaptador, tornillos M2×6 para la unión entre el adaptador y el husillo, y tornillos M3×8 para el anclaje del servo a la estructura de la cabeza robótica.



*Figura 42. Mecanismo ensamblado.*

## 9. PRESUPUESTO

En este apartado se presenta el presupuesto completo del proyecto, que incluye el coste de todos los componentes electrónicos, de fijación y de software empleados, así como el gasto asociado a la impresión 3D de las piezas diseñadas. Además, se detallan las horas dedicadas al diseño, fabricación y montaje del mecanismo, junto con su correspondiente valoración económica.

### 9.1 PRESUPUESTO FINAL

Podemos ver el desglose de los costes de fabricación en la Tabla 1, donde se detalla el coste que tienen las piezas impresas en 3D, además de las horas dedicadas al diseño y al postprocesado.

Ref.	Unidades	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
1	Ud	Husillo	1	0,05 €	0,05 €
2	Ud	Tuerca	1	0,18 €	0,18 €
3	Ud	Ceja izquierda	1	0,01 €	0,01 €
4	Ud	Ceja derecha	1	0,01 €	0,01 €
5	Ud	Sujeción	1	0,03 €	0,03 €
6	Ud	Sujeción 2	1	0,03 €	0,03 €
7	h	Hora de postprocesado	1	25,00 €	25,00 €
8	h	Horas de diseño	12	25,00 €	300,00 €
<b>IMPORTE TOTAL</b>					<b>325,31 €</b>

Tabla 1. Desglose de costes de fabricación.

Hay que tener en cuenta que estos son los costes en el caso de que tuviésemos el material justo y necesario para imprimir las piezas. Sin embargo, el coste mínimo del material sería el de una bobina de 1 kg de PLA blanco de 1,75mm de diámetro, que es lo mínimo que podemos comprar. Este coste lo debemos sustituir por el de los componentes del mecanismo.

Además de ello, también hemos de evaluar los costes invertidos en software, tornillería, maquinaria y electrónica. Todo ello se verá reflejado en la Tabla 2, donde se representa el presupuesto final.

Ref.	Ud	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
1	kg	Bobina de PLA	1	15,00 €	15,00 €
2	h	Hora de postprocesado	1	20,00 €	20,00 €
3	h	Horas de diseño	12	20,00 €	240,00 €
4	Ud	Micro HDD servo	1	19,34 €	19,34 €
5	Ud	Socket Button Screws-M2-6-A2-BL	4	0,27 €	1,08 €
6	Ud	Socket Button Screws-M3-5-A2-BL	3	0,16 €	0,49 €
7	Ud	Socket Button Screws-M3-8-A2-BL	4	0,12 €	0,49 €
8	Ud	Ender 3 V3 Plus	1	399,00 €	399,00 €
9	Ud	Inventor Professional (Licencia anual)	1	2.771,00 €	2.771,00 €
<b>IMPORTE TOTAL</b>					<b>3.466,40 €</b>

Tabla 2. Presupuesto final.

Cabe mencionar que el IVA ya viene incluido en cada uno de los precios.

## 10. CONCLUSIÓN

A pesar de las importantes restricciones de espacio presentes en el interior de la cabeza EZ-InMoov, se ha logrado desarrollar una solución mecánica plenamente funcional y coherente con los requisitos del proyecto. El reducido volumen disponible condicionaba tanto la geometría como la ubicación de los componentes, limitando notablemente las opciones posibles para albergar un mecanismo que permitiera añadir un nuevo grado de libertad. No obstante, mediante un proceso iterativo de análisis y rediseño, ha sido posible concebir un sistema compacto que se integra por completo en el interior del cráneo sin necesidad de modificar su estructura original ni añadir elementos externos que comprometan la estética del robot.

Uno de los logros más relevantes del diseño final es que evita completamente la presencia de reenvíos, varillajes o soluciones externas que, aunque funcionales, resultarían visualmente intrusivas y contrarias al propósito de mejorar la expresividad facial del robot sin afectar a su apariencia. Mantener el mecanismo oculto dentro de la cabeza no solo mejora la limpieza visual del conjunto, sino que preserva la coherencia anatómica de la plataforma y permite que las cejas se integren como un componente natural del rostro.

Además, el sistema propuesto logra accionar el movimiento de ambas cejas utilizando un único servomotor, lo que supone una optimización significativa en términos de simplicidad, consumo energético y facilidad de montaje. Esta decisión permite reducir el número de componentes móviles, minimizar el cableado interno y disminuir la probabilidad de fallos, al tiempo que garantiza un movimiento coordinado y suficientemente expresivo para los objetivos planteados. El uso de un único actuador también contribuye a mantener el peso y el coste del sistema dentro de límites razonables, favoreciendo su replicabilidad en entornos educativos y de investigación.

El diseño obtenido demuestra que es posible mejorar la expresividad de la cabeza EZ-InMoov sin comprometer su integridad estructural y respetando las limitaciones impuestas por el espacio disponible. El mecanismo final constituye así una solución equilibrada, eficiente y visualmente integrada, que amplía las capacidades del robot sin alterar su diseño original.

## 10.1 RESULTADO FINAL

A continuación, se muestran las imágenes con el resultado final:



*Figura 43. Cabeza EZ-InMoov con las cejas incorporadas.*



*Figura 44. Cabeza EZ-InMoov con cejas ligeramente girada.*



Figura 45. Cabeza Ez-InMoov con cejas ligeramente girada.

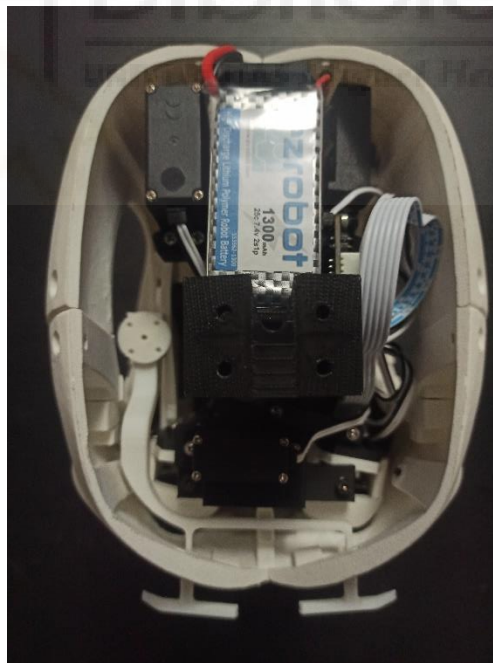
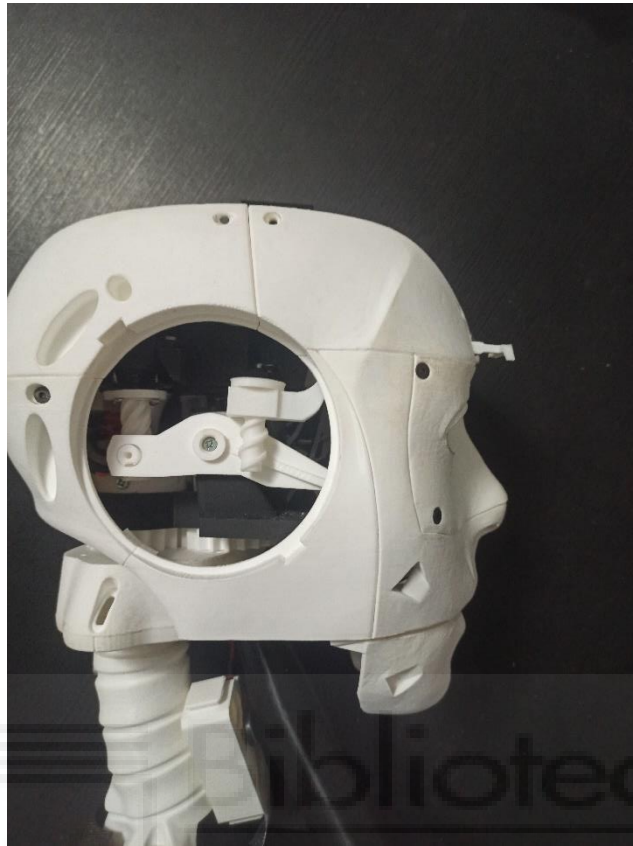


Figura 46. Mecanismo de las cejas integrado.



*Figura 47. Cabeza Ez-InMoov de perfil.*

Como se aprecia en las figuras anteriores, el mecanismo ha sido diseñado para integrarse de forma eficiente en el interior de la cabeza robótica. Su geometría permite sortear los servomotores encargados del movimiento ocular, evitar interferencias con la estructura del cráneo y mantener un ligero desplazamiento lateral que impide cualquier colisión con el mecanismo de la mandíbula. Finalmente, el conjunto se acopla correctamente en las ranuras frontales existentes, garantizando una instalación estable y funcional.

## 11. LÍNEAS DE FUTURO

De cara a la continuación del proyecto, resulta necesario realizar una evaluación experimental completa del mecanismo diseñado. Aunque el prototipo ha demostrado ser funcional, sería conveniente someterlo a pruebas sistemáticas que permitan analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de carga, identificar posibles limitaciones y, en caso necesario, optimizar aspectos concretos del diseño para aumentar su fiabilidad y durabilidad.

Asimismo, una línea de mejora evidente consiste en modificar las piezas frontales de la cabeza EZ-InMoov para integrar directamente en el modelo las ranuras que actúan como guías de las cejas. En la fase actual, estas ranuras tuvieron que realizarse manualmente, lo que introduce variabilidad y reduce la precisión del conjunto. Incorporarlas en el diseño original permitiría garantizar un ajuste más exacto y una integración estética más limpia.

Dado que la cabeza EZ-InMoov admite nuevas ampliaciones, el proyecto también abre la puerta a incrementar el número de grados de libertad asociados a la expresividad facial. Entre las posibilidades destacables se encuentra la incorporación de movimientos independientes para cada ceja o la exploración de materiales más flexibles que permitan reproducir gestos más sutiles. Todo ello contribuiría a enriquecer el repertorio expresivo del robot y a aproximarle aún más al comportamiento humano.

Finalmente, una línea de futuro especialmente relevante es la continuación del montaje del robot completo, integrando esta mejora en un sistema humanoide plenamente operativo. Esto permitiría evaluar el impacto real del nuevo mecanismo de cejas en contextos de interacción social más amplios y valorar su contribución al comportamiento global del robot.

# BIBLIOGRAFIA

EZ-Robot. (n.d.). EZ-InMoov robot head.

Link: <https://www.ez-robot.com/store/p86/ez-inmoov-robot-head.html>

Breazeal, C. (n.d.). Kismet: A sociable robot. MIT Media Lab.

Link: <https://cynthiabreazeal.media.mit.edu>

Takanishi Laboratory. (n.d.). WE-4RII: Emotion expression humanoid robot.

Link: <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/we/we-4rII/index.htm>

Istituto Italiano di Tecnologia. (n.d.). iCub humanoid robot – Who we are.

Link: <https://icub.iit.it/about-us/who-we-are>

Hanson Robotics. (n.d.). Sophia.

Link: <https://www.hansonrobotics.com/sophia>

Furhat Robotics. (n.d.). Furhat robot.

Link: <https://www.furhatrobotics.com/es-es/furhat-robot>

Prusa Research. (n.d.). PrusaSlicer.

Link: <https://prusaslicer.net>

Todo, T. (n.d.). SEER project.

Link: <https://www.takayukitodo.com/#seer>

Accu. (n.d.). Engineering components.

Link: <https://www.accu.co.uk>

Ultimaker. (n.d.). Ultimaker Cura support.

Link: <https://support.ultimaker.com/s/topic/0TO5b0000000Q4utGAC/ultimaker-cura>

Breazeal, C. (2000). Sociable machines: Expressive social exchange between humans and robots (PhD thesis). MIT Media Lab.

Breazeal, C. (2003). Emotion and sociable humanoid robots. *International Journal of Human-Computer Studies*.

Al Moubayed, S., Skantze, G., & Beskow, J. (2012). The Furhat back-projected humanoid head: Lip reading, gaze and multi-party interaction. *International Journal of Humanoid Robotics*.

Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion*.

Ekman, P., & Friesen, W. V. (2003). *Unmasking the face: A guide to recognizing emotions from facial clues*. Malor Books.

Krämer, N. C., von der Pütten, A., & Eimler, S. C. (2012). Human-agent and human-robot interaction theory: Similarities to and differences from human-human interaction.

Leite, I., Martinho, C., & Paiva, A. (2013). Social robots for long-term interaction: A survey

Paiva, A., Leite, I., & Ribeiro, T. (2014). Emotion modeling for social robots.

Miwa, H., Okuchi, T., Takanobu, H., & Takanishi, A. (2002). Development of a human-like head robot for human-robot communication.

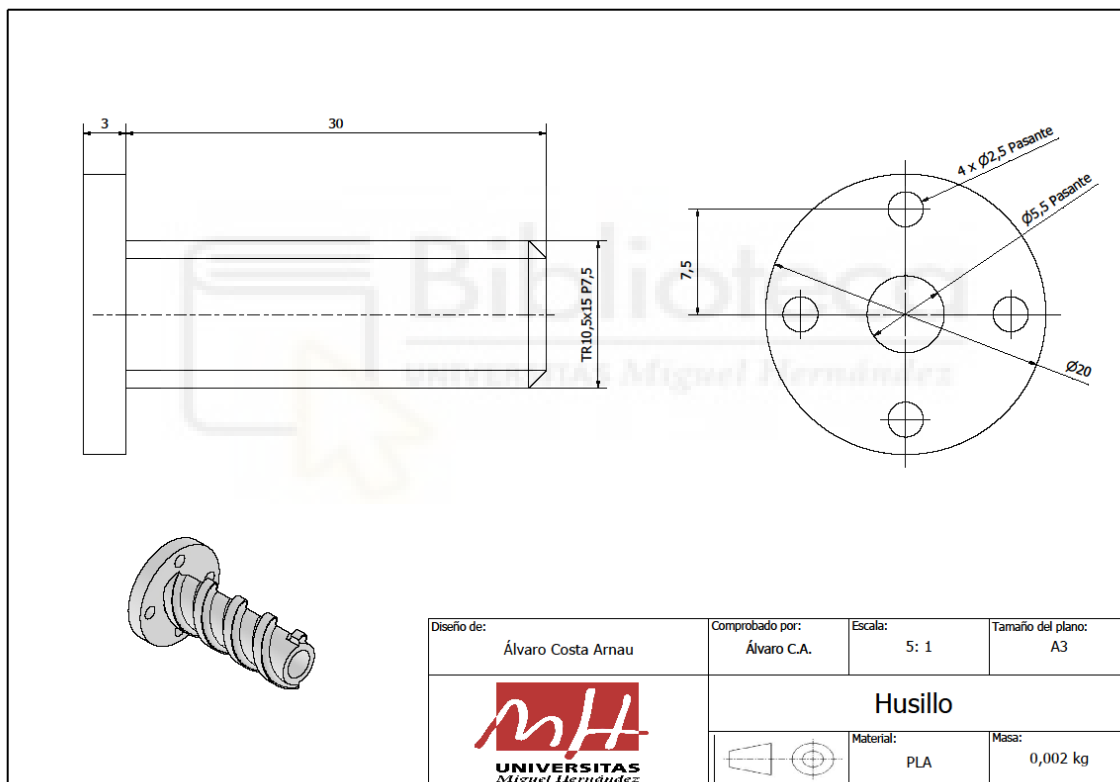
Metta, G., Sandini, G., Vernon, D., Natale, L., & Nori, F. (2010). The iCub humanoid robot: An open platform for research in embodied cognition.

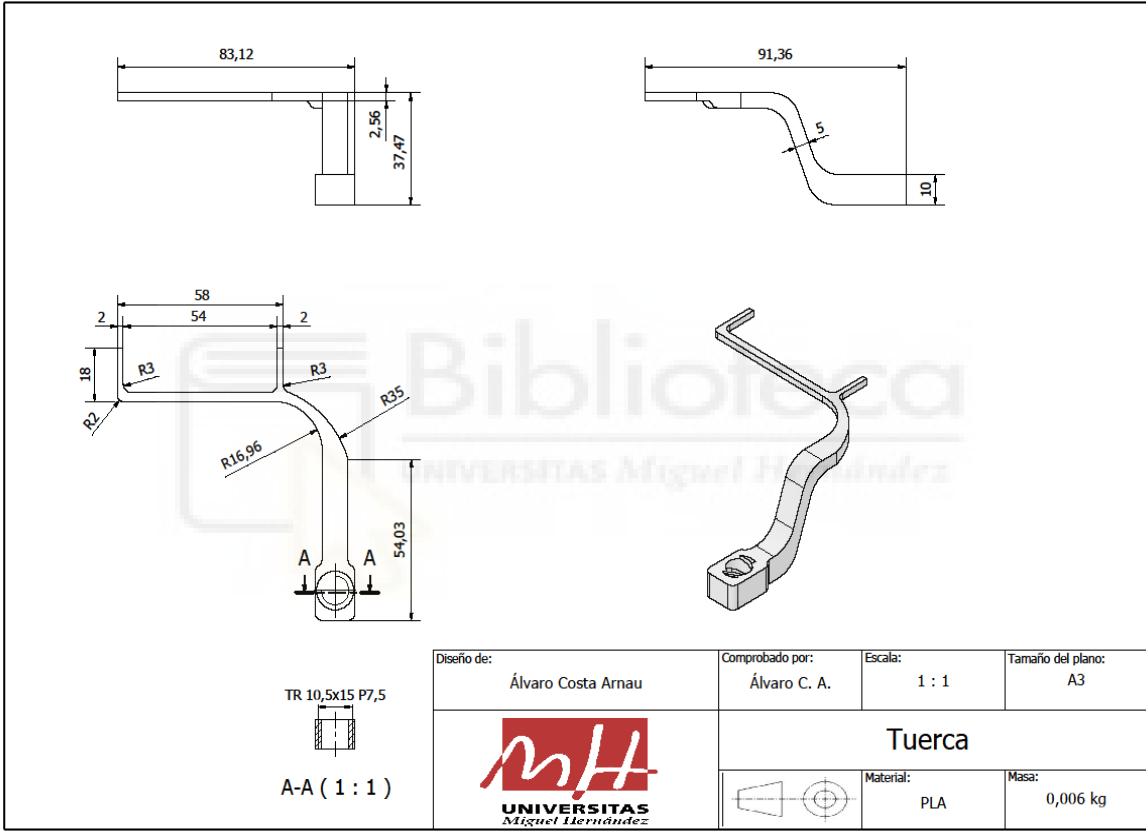
Norton, R. L. (2019). Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines. McGraw-Hill.

Walker, I. D. (2013). Continuous backbone “continuum” robot manipulators. ISRN Robotics.

Félez, J. (2008). Ingeniería gráfica y diseño. Síntesis.

# ANEXO I: PLANOS DE FABRICACIÓN

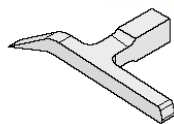
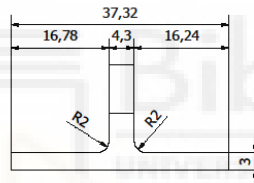
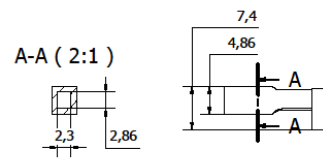




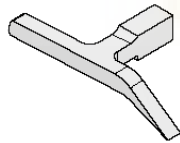
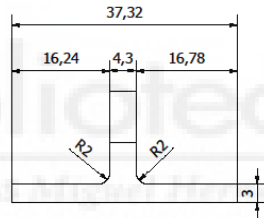
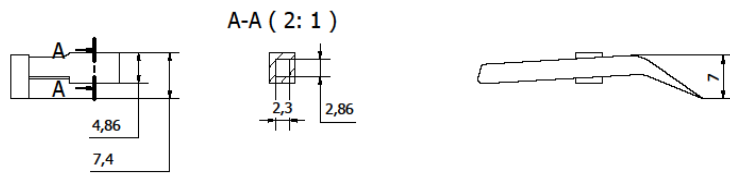
TR 10,5x15 P7,5




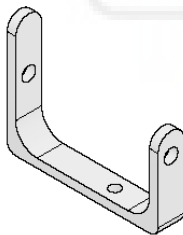
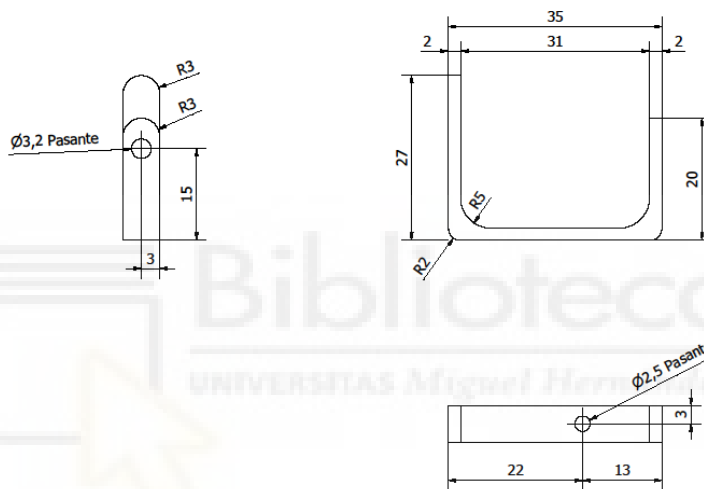
A-A (1 : 1)



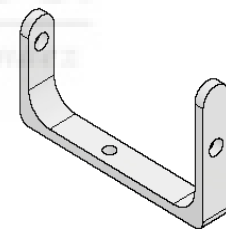
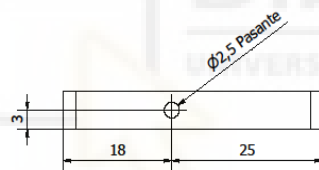
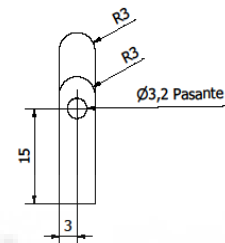
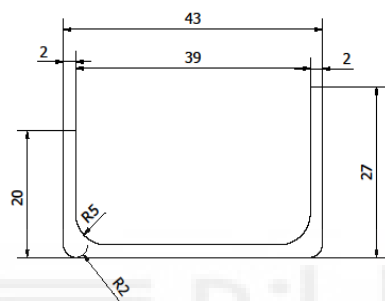
Diseño de:	Álvaro Costa Arnau	Comprobado por:	Álvaro C.A.	Escala:	2:1	Tamaño del plano:	A3
		<b>Ceja derecha</b>					
			Material:	PLA	Masa:	0,001 kg	



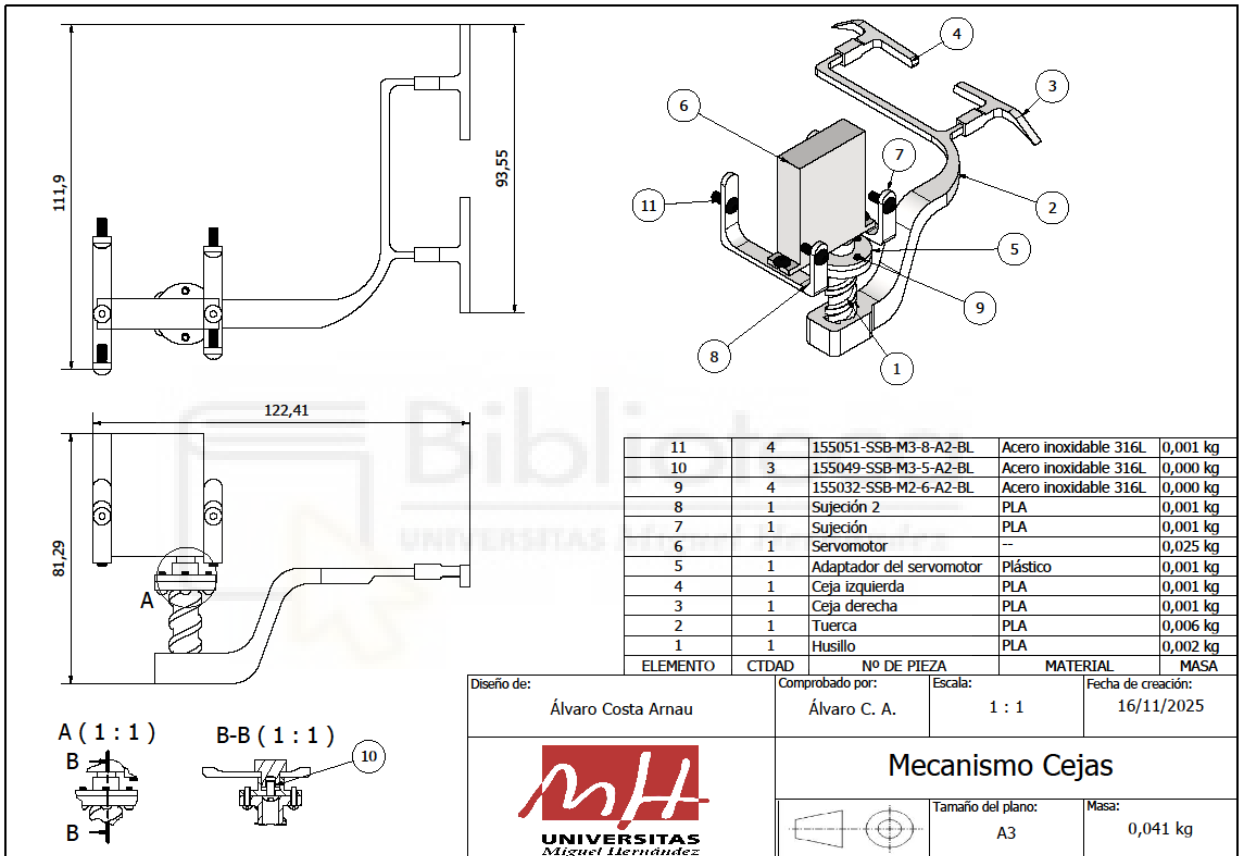
Diseño de: Álvaro Costa Arnau	Comprobado por: Álvaro C. A.	Escala: 2: 1	Tamaño del plano: A3
		<b>Ceja izquierda</b>	
		Material: PLA	Masa: 0,001 kg



Diseño de:	Álvaro Costa Arnau	Comprobado por:	Álvaro C. A.	Escala:	2 : 1	Tamaño del plano:	A3
		<b>Sujeción</b>					
				Material:	PLA	Masa:	0,001 kg



Diseño de: Álvaro Costa Arnau	Comprobado por: Álvaro C. A.	Escala: 2 : 1	Tamaño del plano: A3
 <b>UNIVERSITAS</b> <i>Miguel Hernández</i>		<b>Sujeción 2</b>	
			Material: PLA



## ANEXO II: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

### Features

- Operating speed:  $0.22 \pm 0.01$  sec/60° (7.4v)
- Running current:  $1400 \pm 30$ mA (7.4v)
- Stall torque:  $19 \pm 0.20$ kg·cm (7.4v)
- Stall current:  $3000 \pm 50$ mA (7.4v)
- Running life: > 180,000 Turns
- Temperature range: -10C to +50C
- Operating voltage: 4.8V to 8.4v
- Dual ball metal bearing
- All metal gears
- Connector wire length: 32cm
- Futaba 3f (25 teeth) for driving spline/shaft
- 6.2mm C1 standard spline (including teeth)

*Figura 48. Especificaciones técnicas del servomotor.*

# Specifications

Printing Technology	Fused deposition modeling	Build Volume	300*300*330mm
Product Dimensions	410*445*577mm	Package Dimensions	623*503*245mm
Net Weight	11.5kg	Printing Speed	≤600mm/s
Acceleration	≤20000mm/s <sup>2</sup>	Printing Accuracy	±0.2mm
Layer Height	0.1-0.35mm	Filament Diameter	1.75mm
File Transfer	USB drive, WLAN, Creality Cloud	Nozzle Diameter	0.4mm
Build Plate	Flexible build plate	Nozzle Kit	Quick-swap nozzle (hardened steel tip) integrated with heatbreak
Extruder	New high-speed direct drive extruder	Nozzle Temperature	≤300°C
Heatbed Temperature	≤100°C	Input Shaping	Yes (G-sensor included)
Leveling Mode	Auto Leveling	Display Screen	4.3" HD color touch screen
Mainboard	32-bit	Connectivity	WiFi
Printable File Format	G-code	Power Loss Recovery	Yes
Filament Run-out Sensor	Yes	Nebula Camera	Optional
Rated Voltage	100-120V~, 200-240V~, 50/60Hz	Rated Power	350W
Slicing Software	Creality Print	File Formats for Slicing	STL, OBJ, 3MF
Supported Filaments	PLA, TPU(95A), PETG, ABS, PLA-CF, PETG-CF, CR-carbon	APP for Cloud Printing	Creality Cloud
UI Languages	English/Español/Deutsche/Français/Русский/Português/Italiano/Türk/ 中文/日本語/한국어		

Figura 49. Especificaciones técnicas de la impresora modelo Ender 3 V3 Plus.

## Technical Data Sheet.

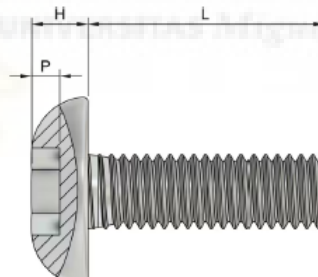
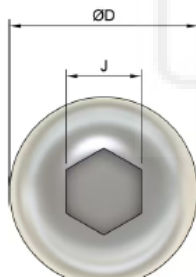
Accu Product Code (APC): SSB-M2-6-A2-BL

### M2 x 6mm Socket Button Screws (ISO 7380-1) - Black Stainless Steel (A2)



**ACCUBLACK** Official AccuBlack Product.

Thread Size	M2 (2mm)	Manufacturing Standard	ISO 7380-1
Length (L)	6mm	Thread Pitch	0.4mm
Socket Size (J)	1.3mm	Metric or Imperial?	Metric
Material	Stainless Steel - (A2)	Head Diameter (D)	3.5mm <i>Tolerance: +0/-0.2mm</i>
Finish	Matte Black	Socket Depth (Min) (P)	0.8mm
Head Length (H)	1.3mm <i>Tolerance: +0/-0.2mm</i>	Material Family	Stainless Steel



Available CAD Downloads:

- STL
- STP
- IGS

Figura 50. Especificaciones técnicas de los M2 x 6mm Socket Button Screws.

## Technical Data Sheet.

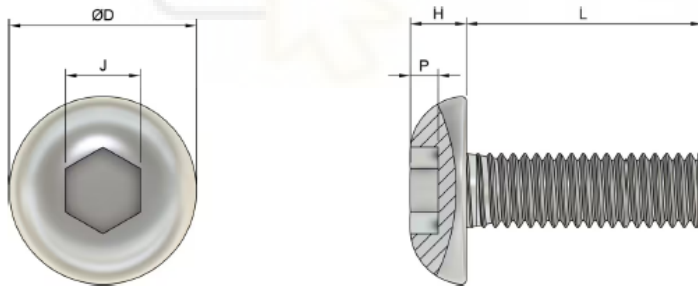
Accu Product Code (APC): SSB-M3-5-A2-BL

### M3 x 5mm Socket Button Screws (ISO 7380-1) - Black Stainless Steel (A2)



**ACCUBLACK** Official AccuBlack Product.

Thread Size	M3 (3mm)	Manufacturing Standard	ISO 7380-1
Length (L)	5mm	Thread Pitch	0.5mm
Socket Size (J)	2mm	Metric or Imperial?	Metric
Material	Stainless Steel - (A2)	Head Diameter (D)	5.7mm <i>Tolerance: +0/-0.3mm</i>
Finish	Matte Black	Socket Depth (Min) (P)	1.04mm
Head Length (H)	1.65mm <i>Tolerance: +0/-0.25mm</i>	Material Family	Stainless Steel



#### Available CAD Downloads:

- STP
- STL
- IGS

Figura 51 . Especificaciones técnicas de los M3 x 5mm Socket Button Screws.

## Technical Data Sheet.

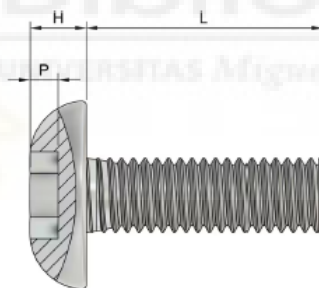
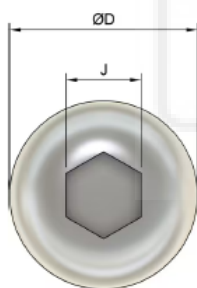
Accu Product Code (APC): SSB-M3-8-A2-BL

### M3 x 8mm Socket Button Screws (ISO 7380-1) - Black Stainless Steel (A2)



ACCUBLACK Official AccuBlack Product.

Thread Size	M3 (3mm)	Manufacturing Standard	ISO 7380-1
Length (L)	8mm	Thread Pitch	0.5mm
Socket Size (J)	2mm	Metric or Imperial?	Metric
Material	Stainless Steel - (A2)	Head Diameter (D)	5.7mm Tolerance: +0/-0.3mm
Finish	Matte Black	Socket Depth (Min) (P)	1.04mm
Head Length (H)	1.65mm Tolerance: +0/-0.25mm	Material Family	Stainless Steel



Available CAD Downloads:

- IGS
- STL
- STP

Figura 52. Especificaciones técnicas de los M3 x 8mm Socket Button Screws.

## ANEXO III: DISEÑO DE LA ROSCA

En este anexo se describe con detalle el proceso seguido para diseñar la rosca del husillo y la correspondiente rosca interna de la tuerca, dado que ambos procedimientos son prácticamente equivalentes.

Como punto de partida, es fundamental determinar el tipo de rosca que se va a generar en cada componente. Tal y como se mencionó en el capítulo 4, la geometría más habitual en mecanismos de tornillos de potencia o de avance es la rosca trapezoidal, debido a su buena capacidad de transmisión de carga y a la facilidad de fabricación respecto a otros perfiles, como podría ser la rosca cuadrada. Por este motivo, el primer paso consiste en definir en un boceto el perfil trapezoidal que servirá de base para el modelado tridimensional posterior.

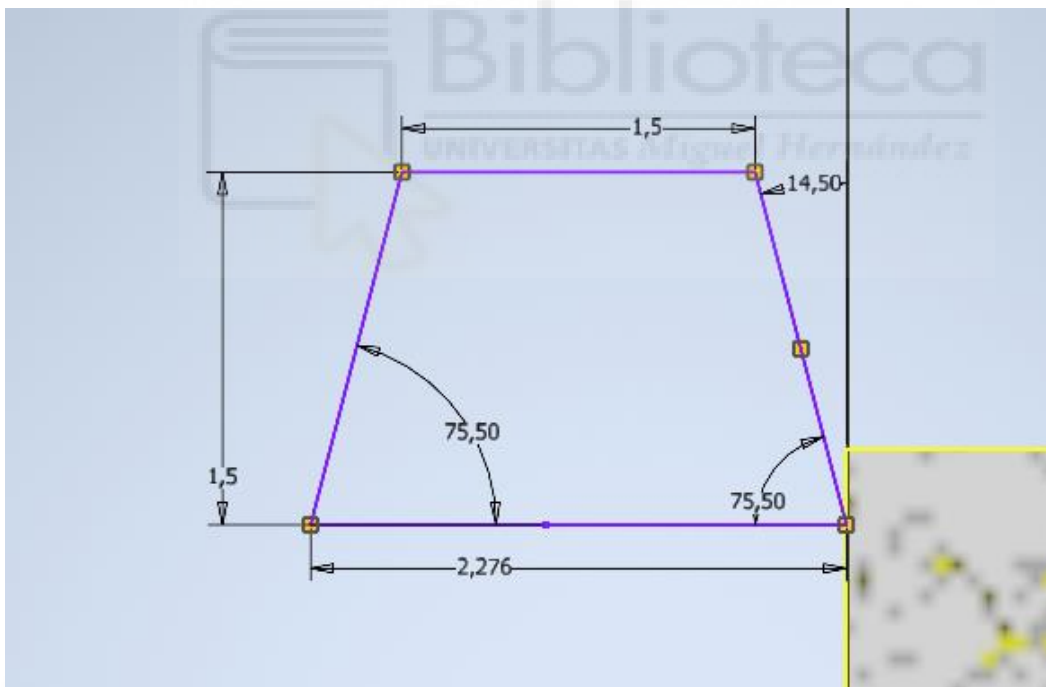


Figura 53- Perfil trapezoidal de la rosca.

En la Figura 53 podemos ver el perfil de la rosca. Nos hemos inspirado en un perfil estándar del libro de Diseño de máquinas de Norton, el cuál se puede apreciar en la Figura 54.

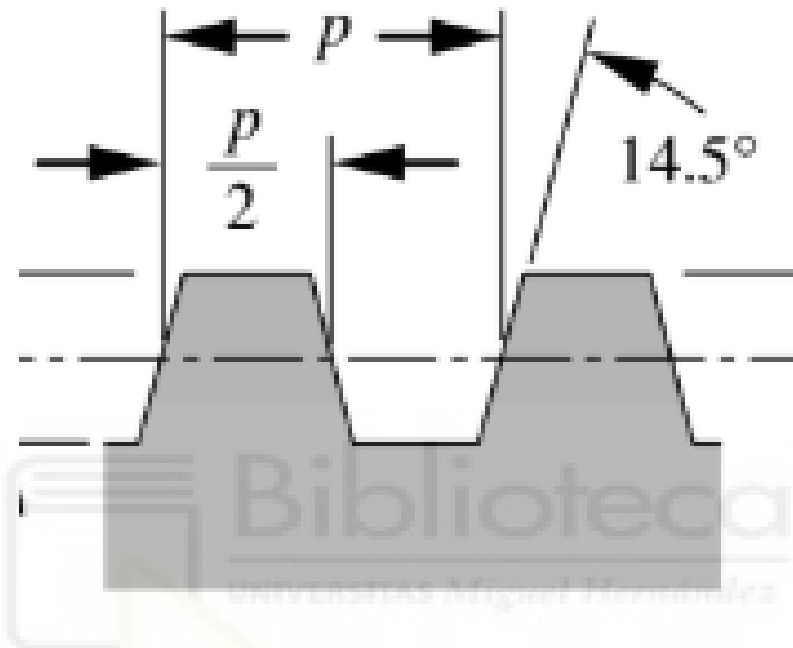
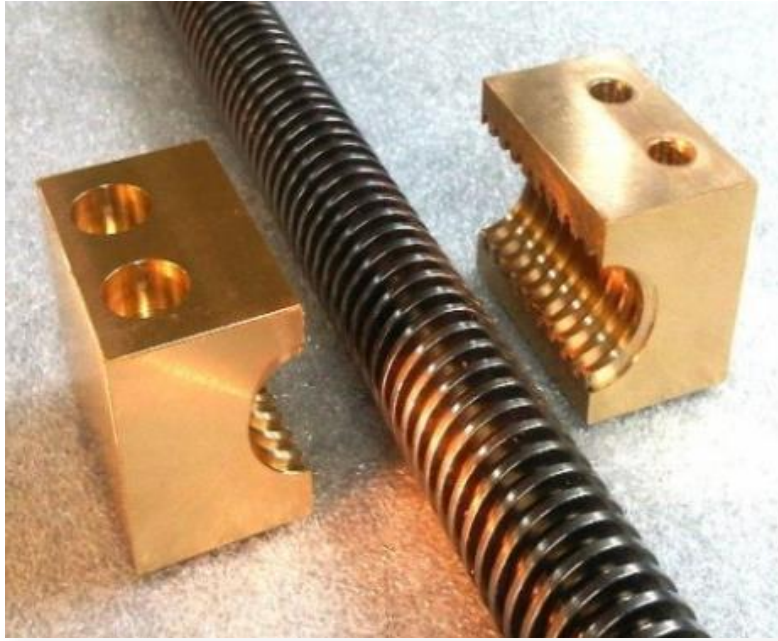


Figura 54. Rosca trapecoidal modelo.

En nuestro diseño hemos optado por un ángulo de  $14,5^\circ$ , dado que esta inclinación facilita significativamente el proceso de fabricación. Un ángulo menor (por ejemplo,  $10^\circ$ ) exigiría operaciones más complejas en torno o fresadora, ya que la herramienta tendría mayores dificultades para acceder y generar correctamente el perfil. Con el ángulo seleccionado, además, el husillo resulta compatible con el uso de tuercas divididas, las cuales pueden ajustarse radialmente sobre la rosca para compensar el desgaste y minimizar holguras a lo largo del tiempo.



*Figura 55. Tuerca dividida.*

En nuestro caso, la situación es distinta, ya que la pieza no será fabricada mediante mecanizado convencional, sino mediante tecnología aditiva, lo que nos otorga mayor libertad geométrica y elimina algunas de las limitaciones asociadas al uso de herramientas de corte. Aun así, mantenemos el criterio geométrico del perfil trapezoidal y aplicamos un ángulo de  $14,5^\circ$  en cada flanco, obteniendo así un ángulo total de  $29^\circ$ .

Una vez definido el perfil del diente, el siguiente paso es determinar su posición exacta dentro del boceto, ya que la ubicación influirá directamente en el resultado final de la operación posterior. Esto se debe a que, tras completar el boceto, aplicaremos la función de bobina, encargada de generar una trayectoria helicoidal alrededor del eje del husillo, replicando el perfil del diente a lo largo de la pieza.

La colocación del diente respecto al cuerpo del husillo es fundamental porque determina cómo será la transición de entrada de la rosca al inicio de la pieza. Dependiendo del punto donde comience el diente, la entrada podrá ser más suave, más agresiva o incluso quedar parcialmente embebida en el material.

Por ejemplo, si el diente comienza dentro del cuerpo del husillo, como se muestra en la figura 55, la transición inicial quedará oculta en la geometría, lo cual produce un inicio abrupto de la rosca.



Figura 56. Perfil del diente dentro del cuerpo del husillo.

Ejecutamos el comando de bobina (Figura 57).

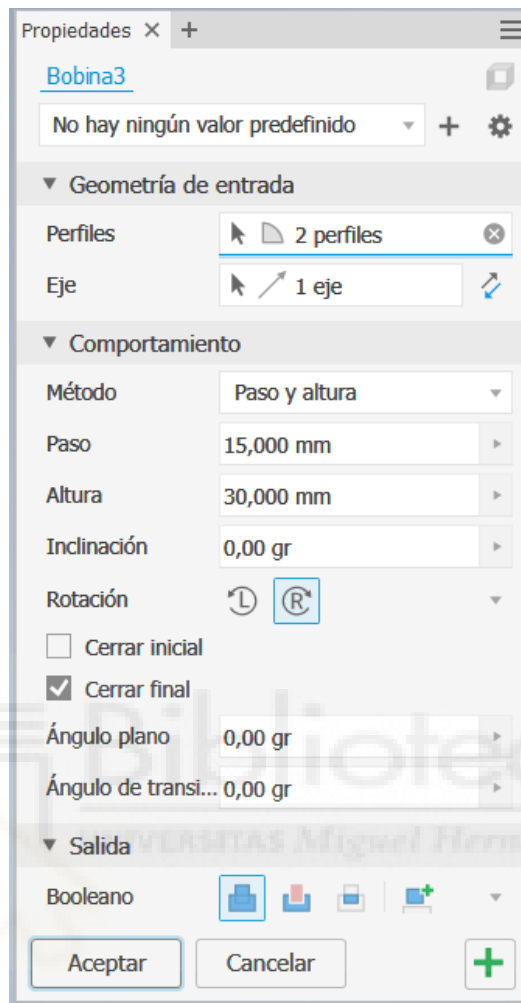


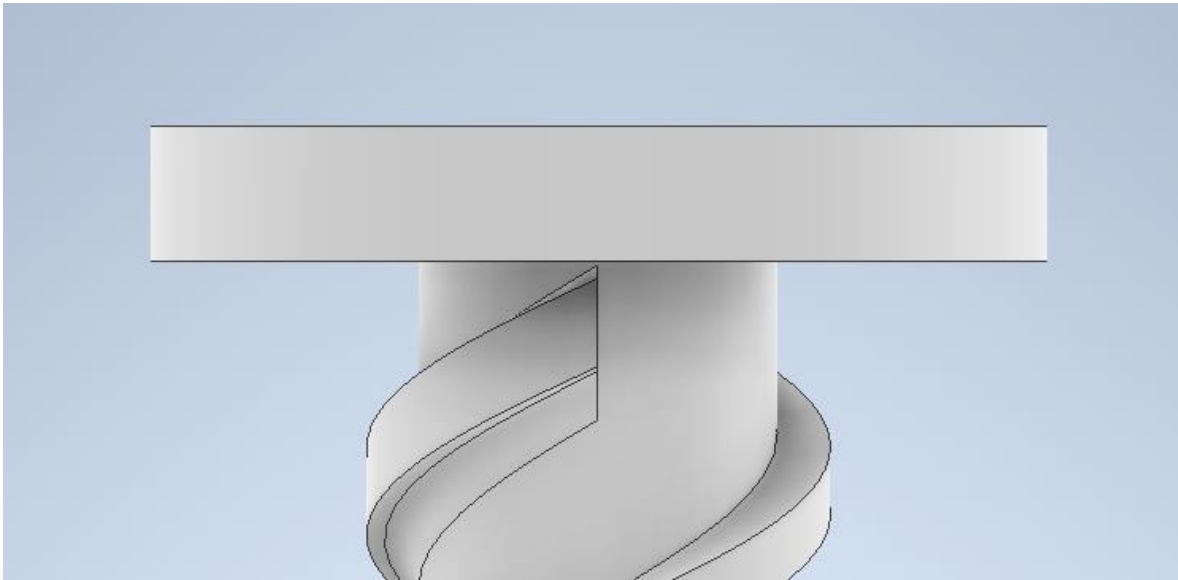
Figura 57. Opreación de bobina.

Como argumentamos en el apartado 4, necesitamos un paso alto, que será de 15 mm, además de varios hilos, en este caso serán dos (figura 58), que realizaremos ejecutando una simetría al perfil ya dibujado. La altura será la longitud del husillo, que son 30 mm.

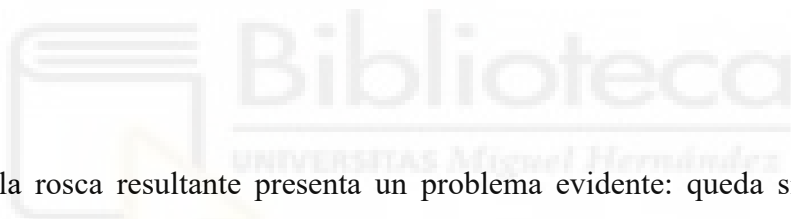


Figura 58. Perfil de los hilos del husillo.

Al aceptar la operación observamos lo que pasa.



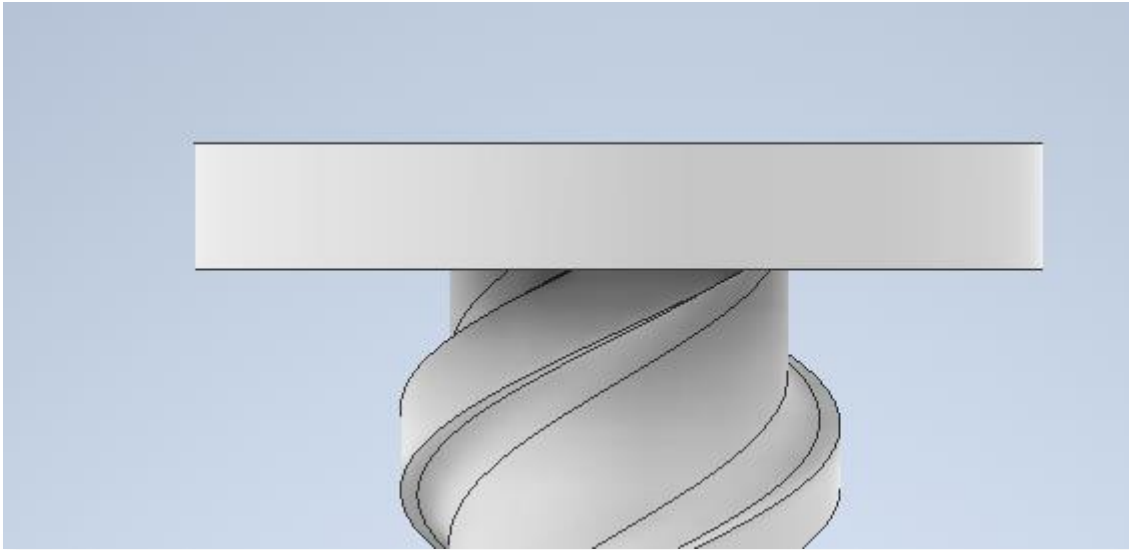
*Figura 59. Rosca inacabada.*



En este caso, la rosca resultante presenta un problema evidente: queda sin transición y aparece incompleta, ya que el inicio del filete se encuentra parcialmente embebido en el cuerpo del husillo. Para evitar este efecto indeseado, es necesario desplazar el perfil del diente de modo que comience justo fuera del cilindro base, tal como se observa en la Figura 53.

Al posicionar el diente en el exterior, la operación de bobina genera una entrada continua, lo que da como resultado una transición mucho más suave entre la superficie cilíndrica y el inicio de la rosca.

Con esta configuración, el filete se desarrolla de forma uniforme a lo largo de toda la longitud del husillo, garantizando que la rosca quede completa, funcional y correctamente definida.



*Figura 60. Rosca adecuada.*



Es importante señalar que, en el caso del husillo, el proceso consiste en añadir material siguiendo la geometría del diente previamente definida, generando así el filete de la rosca. En cambio, para la tuerca, el procedimiento es equivalente pero inverso: en lugar de crear material, lo que hacemos es retirarlo, vaciando el volumen que describe el diente del husillo a lo largo de la trayectoria helicoidal.

Una vez modelada la rosca del husillo mediante la operación de bobina, se repite exactamente el mismo proceso para la tuerca, con la diferencia de que en este caso la bobina actúa a modo de sustracción. De este modo se obtiene un alojamiento interno perfectamente coincidente con el perfil exterior del husillo.

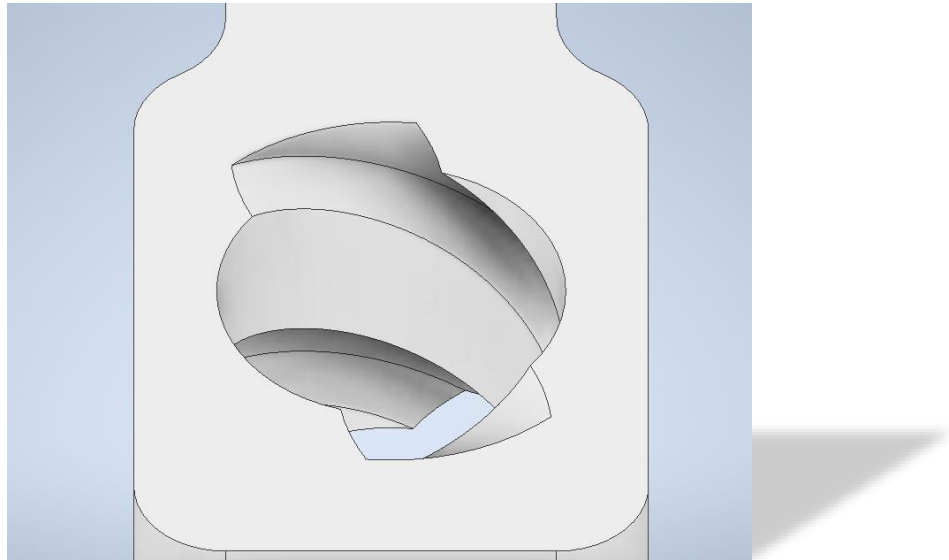
No obstante, es fundamental considerar las tolerancias inherentes a la fabricación aditiva, ya que las impresoras 3D introducen pequeñas desviaciones dimensionales que pueden dificultar el acoplamiento entre ambas piezas si se diseña un ajuste completamente teórico. Por ello, resulta recomendable incorporar una holgura adicional en el diseño del diente destinado a la tuerca. En nuestro caso, se ha optado por añadir 0,5 mm de holgura, lo que

garantiza un montaje fluido, evita bloqueos y mejora la funcionalidad del conjunto sin comprometer la estabilidad del mecanismo.



Figura 61. Holgura del diente de la tuerca.

El resultado final es una tuerca plenamente funcional, capaz de engranar correctamente con el husillo y transmitir el movimiento de manera fluida y estable, cumpliendo así su cometido dentro del mecanismo.



*Figura 62. Tuerca diseñada.*

