

---

# Diseño e implementación de una cabeza animatrónica inspirada en Jack, la mascota de la Universidad del Valle de Guatemala

---

Shagty Valeria Fuentes García





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de una cabeza animatrónica inspirada  
en Jack, la mascota de la Universidad del Valle de Guatemala**


Trabajo de graduación presentado por Shagty Valeria Fuentes García  
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

(f)   
MSc. Carlos Esquit

Este trabajo de graduación marca el cierre de una etapa muy especial en mi vida. La cabeza animatrónica de Jack es fruto de muchas horas de dedicación y, también, del cariño y apoyo de quienes hicieron posible que este sueño llegara a completarse.

Agradezco profundamente a mis papás por darme la oportunidad de estudiar en la universidad que soñaba, por confiar en mí, incluso cuando yo dudaba y por acompañarme en cada paso. A mis hermanas, gracias por ser mi apoyo constante y recordarme que este esfuerzo vale la pena. Me llena de ilusión compartir este momento con Ivanna, cada una con su propio camino, pero celebrando juntas el cierre de este ciclo.

Agradezco profundamente a mis abuelos por su cariño y apoyo constante. Entre ellos, guardo un lugar especial para mi abuelo materno, que aunque ya no está físicamente, me acompañó siempre con sus palabras de ánimo y su interés genuino por mis estudios. Este trabajo refleja todo lo que me enseñaron sobre perseverar y hacer las cosas con dedicación.

A mis profesores, gracias por las clases, los retos y el impulso que me hicieron crecer como ingeniera, en especial al ingeniero Kurt Kellner por su forma de enseñar y por motivarme a llevar mis ideas más lejos. A mi pareja, gracias por ser un apoyo indispensable durante toda la tesis; por su paciencia, ayuda e inspiración en los momentos de cansancio y frustración. Este proyecto también lleva mucho de su compañía.

Finalmente, agradezco a mis gatitas, Suki y Shiver. Suki fue mi apoyo emocional durante gran parte de la carrera; su partida en marzo fue un golpe muy duro, pero también un recordatorio del amor que nos brindan las mascotas. Shiver llegó cuando pensaba que no quería otra mascota y terminó convirtiéndose en un apoyo enorme, acompañándome justo cuando más lo necesitaba.

A todas estas personas —y pequeñas compañeras de cuatro patas— debo, en buena parte, que este documento exista y que este proyecto haya llegado a su final.

<b>Prefacio</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con 18 grados de libertad . . .	3
2.2. Diseño y construcción de cocodrilo animatrónico . . . . .	3
2.3. Diseño de la estructura mecánica del animatrónico dinosaurio Laquin- tasaura . . . . .	4
2.4. Puesta en marcha y programación de un robot animatrónico . . . . .	4
<b>3. Justificación</b>	<b>6</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>8</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	8
4.2. Objetivos específicos . . . . .	8
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>10</b>
6.1. Animatrónico . . . . .	10
6.2. Diseño animatrónico . . . . .	11
6.3. Psicología del color . . . . .	11
6.4. Fabricación digital . . . . .	12

6.5. Servomotor . . . . .	13
6.6. Controlador de servomotores . . . . .	15
6.7. Protocolo de comunicación I <sup>2</sup> C . . . . .	15
6.8. Protocolo de comunicación BLE . . . . .	16
6.9. Banco de poder . . . . .	17
<b>7. Proceso de diseño, fabricación y ensamblaje del rostro animatrónico</b>	<b>18</b>
7.1. Requerimientos y criterios de diseño del rostro animatrónico . . . . .	19
7.2. Diseño mecánico del rostro animatrónico . . . . .	24
7.3. Fabricación de los componentes mecánicos . . . . .	35
7.4. Ensamblaje y verificación del rostro animatrónico . . . . .	41
<b>8. Circuitería y componentes electrónicos</b>	<b>49</b>
8.1. Requerimientos y arquitectura del sistema de control . . . . .	49
8.2. Circuito integrador en protoboard . . . . .	54
8.3. Diseño del PCB del circuito integrador . . . . .	58
8.4. Programación y control del rostro animatrónico . . . . .	60
<b>9. Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>10.Recomendaciones</b>	<b>67</b>
<b>11.Referencias</b>	<b>69</b>
<b>12.Anexos</b>	<b>74</b>
12.1. Referencias visuales y modelos base . . . . .	75
12.2. Diario de investigación del proyecto Jack . . . . .	82

1.	Prototipo final de la cabeza animatrónica de Jack. . . . .	2
2.	Animatrónico Mime Face: estructura interna y piel sintética . . . . .	11
3.	Psicología del color . . . . .	12
4.	Impresión 3D . . . . .	13
5.	Maquinado CNC . . . . .	14
6.	Control PWM . . . . .	14
7.	Mecanismo interno de un servomotor típico. . . . .	14
8.	Controlador de servomotores . . . . .	15
9.	Ejemplo de topología del bus I <sup>2</sup> C con un maestro y múltiples esclavos. . . . .	16
10.	Fuente conmutada de 5 V y 20 A utilizada en el sistema. . . . .	17
11.	Ejemplos de expresiones faciales del rostro animatrónico de Jack . . . . .	21
12.	Iteraciones del mecanismo de ojos y párpados (versiones 1, 2 y 3) . . . . .	23
13.	Vista frontal del rostro final de Jack . . . . .	25
14.	Conjunto del mecanismo de ojos y párpados con sus componentes principales . . . . .	29
15.	Integración de la mandíbula con la carcasa y la ubicación de los servomotores . . . . .	30
16.	Mecanismo de las cejas y elementos principales . . . . .	32
17.	Base del animatrónico con cubierta de MDF y distribución de componentes internos . . . . .	34
18.	Proceso de masillado y lijado de la carcasa del rostro animatrónico . . . . .	41
19.	Vista general del montaje final del animatrónico y de la organización de la electrónica . . . . .	48
20.	Diagrama de bloques del sistema de control del rostro animatrónico. . . . .	55
21.	Diagrama de cableado del sistema de control del rostro animatrónico. . . . .	56
22.	Esquemático del sistema de control del rostro animatrónico. . . . .	57
23.	Esquemático de la placa PCB del circuito integrador. . . . .	58
24.	Organización de componentes y ruteo del PCB. . . . .	59
25.	Referencia de estilo FNAF para el rostro . . . . .	75

26.	Servomotor MG90s . . . . .	75
27.	Referencia visual de la mascota Jack original . . . . .	76
28.	Subsistemas principales del rostro animatrónico y sus grados de libertad	76
29.	Globo ocular del mecanismo . . . . .	77
30.	Vistas seccionadas superior e inferior del globo ocular . . . . .	77
31.	Ensamble: ojo con servomotor y aro NeoPixel . . . . .	78
32.	Mecanismo de pestañeo 4 barras V1 . . . . .	78
33.	Movimiento arriba-abajo del mecanismo ocular accionado por el eslabón vertical . . . . .	79
34.	Mecanismo completo de las cejas del rostro animatrónico de Jack. . .	79
35.	Mecanismo de la mandíbula del animatrónico de Jack. . . . .	80
36.	Módulo IEC de 3 pines con interruptor y fusible utilizado como entrada de corriente de la base. . . . .	80
37.	PCB del circuito integrador en diferentes etapas de fabricación e instalación . . . . .	81

---

## Índice de cuadros

---

1.	Grados de libertad por subsistema del rostro animatrónico . . . . .	20
2.	Parámetros utilizados para el cálculo de torque de la mandíbula . . .	31
3.	Parámetros generales de impresión 3D . . . . .	36
4.	Resumen de impresión de carcasa y mandíbula . . . . .	37
5.	Perfiles de aluminio 2020 utilizados en la estructura . . . . .	39
6.	Modelos 3D del rostro animatrónico de Jack publicados en Printables	82

Este trabajo describe el diseño, la fabricación y la puesta en marcha de una cabeza animatrónica inspirada en Jack, mascota de la Universidad del Valle de Guatemala. El objetivo fue desarrollar un prototipo funcional capaz de reproducir expresiones básicas con movimiento coordinado de ojos, párpados, cejas y mandíbula para utilizarse como recurso didáctico en cursos de *science, technology, engineering and mathematics* (STEM).

Se diseñó un rostro con ocho grados de libertad accionados por servomotores MG90S, controlados mediante una tarjeta PCA9685 y una unidad de control basada en microcontrolador. Los mecanismos se alojan en una estructura modular construida con perfiles de aluminio 2020 y un cobertor de *medium-density fiberboard* (MDF) que integra la electrónica, la fuente de alimentación y el cableado. Las piezas mecánicas se manufacturaron por impresión 3D en *polylactic acid* (PLA) y corte láser, siguiendo un proceso iterativo de rediseño para reducir peso, mejorar holguras y facilitar el ensamblaje.

Como resultado, se obtuvo un prototipo capaz de realizar movimientos suaves y repetibles de mirada, pestañeo, elevación de cejas y apertura de mandíbula, suficientes para transmitir emociones simples como sorpresa, curiosidad y enojo. El sistema se probó mediante secuencias de animación preprogramadas y control manual, validando el desempeño de los mecanismos y la capacidad de los servomotores para operar dentro de su rango de torque. Además, se documentó el proceso completo de diseño y manufactura. Por se generó un conjunto de modelos 3D que permitiera replicar o adaptar el rostro animatrónico en futuros proyectos.

**Palabras clave:** animatrónica, rostro animatrónico, expresiones faciales, servomotores MG90s, controlador PCA9685, impresión 3D, fabricación digital.

This work describes the design, fabrication, and commissioning of an animatronic head inspired by Jack, the mascot of the Universidad del Valle de Guatemala. The objective was to develop a functional prototype capable of reproducing basic expressions with coordinated movement of the eyes, eyelids, eyebrows, and jaw to be used as a didactic resource in *science, technology, engineering and mathematics* (STEM) courses.

A face with eight degrees of freedom driven by MG90S servomotors was designed, controlled by a PCA9685 board and a microcontroller-based control unit. The mechanisms are housed in a modular structure built with 2020 aluminum profiles and a *medium-density fiberboard* (MDF) cover that integrates the electronics, the power supply, and the wiring. The mechanical parts were manufactured through 3D printing in *polylactic acid* (PLA) and laser cutting, following an iterative redesign process to reduce weight, improve clearances, and facilitate assembly.

As a result, a prototype capable of performing smooth and repeatable movements of gaze, blinking, eyebrow elevation, and jaw opening was obtained, sufficient to convey simple emotions such as surprise, curiosity, and anger. The system was tested through preprogrammed animation sequences and manual control, validating the performance of the mechanisms and the ability of the servomotors to operate within their torque range. In addition, the complete design and manufacturing process was documented. A set of 3D models was also generated to allow the animatronic face to be replicated or adapted in future projects.

**Keywords:** animatronics, animatronic face, facial expressions, servomotors MG90s, PCA9685 controller, 3D printing, digital fabrication.

La animatrónica combina mecánica, electrónica, control y diseño digital para dar la sensación de vida a personajes ficticios. Además del entretenimiento, estos sistemas tienen un alto potencial didáctico porque reúnen en un solo proyecto temas como diseño de mecanismos, selección de actuadores, electrónica de potencia, programación de microcontroladores y prototipado rápido. En el contexto de la Universidad del Valle de Guatemala, aprovechar este potencial a través de la mascota institucional permite acercar a los estudiantes a las carreras STEM desde algo cercano y llamativo.

En este trabajo, se desarrolló una cabeza animatrónica inspirada en Jack, la mascota de la universidad, con el objetivo de diseñar, fabricar e implementar un prototipo capaz de expresar emociones básicas mediante el movimiento coordinado de ojos, párpados, cejas y mandíbula, tal como se muestra en la Figura 1. De forma resumida, los objetivos específicos se enfocaron en definir los grados de libertad necesarios para lograr expresividad; diseñar los mecanismos internos y la carcasa considerando espacio, torque y manufactura; integrar la electrónica de control y los sistemas de iluminación, y validar el desempeño del prototipo mediante pruebas de movimiento y secuencias de animación.

El problema no era únicamente hacer que Jack se moviera, sino que lo hiciera de forma controlada y repetible, de manera que el sistema pudiera usarse como recurso de laboratorio. Esto implicó decidir cuántos grados de libertad son razonables sin volver el diseño inmanejable, qué tan ligera debía ser la mandíbula para no exceder el torque de los servomotores, cómo organizar el espacio interno para alojar mecanismos, cables y electrónica dentro del volumen de la cabeza, y qué procesos de manufactura disponibles en la universidad (impresión 3D, corte láser, maquinado básico) eran los más adecuados para fabricar las piezas.

El alcance del proyecto se limita a la cabeza animatrónica de Jack y a los subsistemas asociados a ella. No se desarrolla un cuerpo completo ni se integra con sistemas avanzados de visión o reconocimiento de voz. El foco estuvo en el diseño mecánico,

la selección e integración de la electrónica de control, la programación necesaria para accionar los movimientos y la documentación del proceso para que pueda ser replicado o ampliado en futuros proyectos académicos. El prototipo se concibe como una plataforma de demostración y experimentación, más que como un producto comercial.

La metodología empleada siguió un enfoque de diseño iterativo. Primero se establecieron los requerimientos funcionales y las restricciones de diseño con base en la aplicación deseada y los recursos disponibles. Luego se desarrollaron modelos *Computer-Aided Design* (CAD) de la carcasa y de los mecanismos internos, refinados en varias versiones con ayuda de simulaciones, revisiones geométricas y prototipos impresos en 3D. En paralelo se diseñó la arquitectura electrónica basada en servomotores MG90S, un controlador PCA9685 y una unidad de control programable, definiendo el esquema de alimentación y el ruteo de cables. Finalmente se fabricaron las piezas, se ensambló el prototipo y se realizaron pruebas para verificar rangos de movimiento, repetibilidad y capacidad de generar expresiones reconocibles. La redacción del documento contó con apoyo de la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT de OpenAI, manteniendo la revisión manual de todo el contenido [1].

La estructura del documento refleja esta secuencia de trabajo. Primero se presenta el marco conceptual y el estado del arte relacionado con animatrónica, actuadores y mecanismos para expresiones faciales. Luego se describe el diseño mecánico del rostro animatrónico, seguido por el diseño electrónico y de control, la programación empleada para accionar los movimientos y los resultados de las pruebas realizadas sobre el prototipo.

**Figura 1.** Prototipo final de la cabeza animatrónica de Jack.



Nota. Elaboración propia

### 2.1. Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con 18 grados de libertad

En 2020, el Ing. Jenatz desarrolló un rostro animatrónico, su objetivo era diseñar un sistema mecánico y electrónico capaz de simular expresiones faciales y movimientos de cuello con un total de 18 grados de libertad, buscando que estos fueran lo más fluidos y realistas posible.

Para lograrlo, integró movimientos en la mandíbula, labios, cejas, párpados y ojos (en dos direcciones), además de incluir rotaciones en el cuello para darle más expresividad. En cuanto a la electrónica, utilizó una combinación de servomotores TowerPro SG90, Dynamixel XL-320 y Dynamixel AX-12A, algunos de estos utilizaron controladores controladores de tipo *Proportional-Integral-Derivative* (PID) para optimizar su precisión. Además, utilizó distintos protocolos de comunicación, como Dynamixel 1.0 y 2.0 para los actuadores más avanzados e *Inter-Integrated Circuit* (I2C) para los servos más pequeños [2].

### 2.2. Diseño y construcción de cocodrilo animatrónico

En 2018, el Ing. Hernández llevó a cabo el diseño y la construcción de un cocodrilo animatrónico. La idea era lograr un prototipo funcional, utilizando actuadores neumáticos y controlado por un *Programmable Logic Controller* (PLC). El proyecto surgió a partir de una necesidad del parque temático Xetulul, en Guatemala, donde querían incorporar un animatrónico en una nueva atracción inspirada en el Castillo de San Felipe, en Río Dulce, Izabal.

Para la fabricación utilizó impresión 3D, con el material *Polylactic Acid* (PLA), aplicando una capa de impermeabilizante para mejorar la uniformidad y facilitar la capa de pintura. Para accionar los mecanismos, empleó hilo de pescar para replicar los ligamentos de la cola del cocodrilo y complementó la estructura con materiales metálicos para mayor resistencia. Además, usó actuadores neumáticos y mecanismos manufacturados e impresos en 3D, asegurando facilidad de mantenimiento y reposición.

El sistema de control del animatrónico en un PLC Allen Bradley Micrologix 1100, encargado de la gestión del circuito electroneumático. Para la movilidad, se integraron pistones de acero inoxidable, permitiendo un movimiento fluido y realista [3].

### **2.3. Diseño de la estructura mecánica del animatrónico dinosaurio Laquintasaura**

En 2019, en la Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela, se desarrolló el diseño de un animatrónico basado en el dinosaurio Laquintasaura. Este proyecto se enfocó en la creación de una estructura mecánica con nueve grados de libertad, permitiendo movimientos en la cabeza, cuello, torso, brazos y cola. Para evaluar su funcionamiento, se diseñaron las piezas y sistemas en 3D y se realizaron simulaciones cinemáticas y dinámicas, junto con un análisis por el Método de Elementos Finitos (MEF) en los componentes más críticos. Esto aseguró su resistencia ante las fuerzas ejercidas durante los movimientos.

El animatrónico fue construido con perfiles y láminas de aluminio, lo que permitió reducir su peso y los costos de fabricación. Su diseño modular facilitó tanto el ensamblaje como el mantenimiento y la sustitución de piezas en caso de avería. El alcance de este proyecto abarcó únicamente el diseño y fabricación de la estructura interna, más no una cubierta externa que le diera una apariencia más realista al animatrónico, ni un sistema electrónico de control [4].

### **2.4. Puesta en marcha y programación de un robot animatrónico**

En 2021, Haldón desarrolló "Puesta en marcha y programación de un robot animatrónico", el cual presentó a Currito, un animatrónico inspirado en la mascota de la Expo-92. Para hacerlo posible, combinó plataformas de control Arduino, Raspberry Pi, así como sensores y actuadores, logrando que el robot detectara obstáculos, reaccionara a sonidos y expresara emociones con *Light-Emitting Diode* (LED) y movimientos en su cresta, cejas y cuello. Su estructura fue fabricada en impresión 3D impresa en material *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), esto le dio resistencia sin sacrificar peso.

El alcance del proyecto abarcó diseño mecánico y programación avanzada, buscando lograr una interacción fluida entre hardware y software. Se utilizó comunicación por puerto serie entre un Arduino UNO y una Raspberry Pi para coordinar el comportamiento del animatrónico, lo que le permitiría responder de forma autónoma a su entorno [5].

La Universidad del Valle de Guatemala realiza frecuentemente actividades y eventos dirigidos al público general, especialmente a jóvenes interesados en la ciencia y la tecnología. Este tipo de proyecto busca promover el interés por las áreas STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas), con el objetivo de impulsar una mayor inclusión en estas carreras y motivar a más personas a considerar sus estudios en las mismas.

Los animatrónicos son un recurso innovador y ampliamente utilizado en la industria del entretenimiento. En 2018, Oh y Ma analizaron una atracción de Disneyland llamada *turtle talk with crush*, donde los visitantes pueden interactuar en tiempo real con un personaje animado. Descubrieron que este tipo de experiencias, cuando están bien diseñadas y cuentan con una narrativa clara, incrementan la participación del público y generan una sensación de pertenencia a la historia, en lugar de una observación pasiva. Además, esta conexión fortalece significativamente el recuerdo de la experiencia [6].

Actualmente, gran parte de los parques temáticos del mundo, como Universal Studios y Disneyland, cuentan con una amplia variedad de animatrónicos, cada uno asociado a una atracción o película específica. Esto permite que los visitantes se familiaricen con los personajes y le otorguen un mayor significado a la experiencia. Por ejemplo, Disneyland anunció recientemente su primer animatrónico de Walt Disney, diseñado para generar una conexión más cercana y emocional con el público [7].

De forma similar, Universal Studios planea incorporar personajes animatrónicos de monstruos clásicos en su nuevo parque Epic Universe, con el objetivo de hacer el recorrido más inmersivo y enriquecer la experiencia de los visitantes [8].

El desarrollo de un animatrónico de Jack, la mascota de la Universidad del Valle de Guatemala, representa una oportunidad para abrir una nueva línea de investigación. Este proyecto, además de constituir una representación visual de la mascota,

demuestra cómo el diseño mecánico y la electrónica pueden integrarse para crear un sistema funcional con movimientos dinámicos.

En la actualidad no existe una versión animatrónica de Jack, por lo que este desarrollo busca darle vida a la mascota mediante la implementación de mecanismos y sistemas de control electrónicos. Su estructura estará diseñada para permitir movimientos expresivos en los ojos, párpados, boca y cejas, logrando un nivel de interacción atractivo en exhibiciones y eventos universitarios.

A largo plazo, este proyecto busca fortalecer la identidad universitaria, además puede convertirse en un referente dentro de la comunidad académica. Al demostrar cómo la ingeniería puede unir distintas disciplinas para dar vida a un sistema funcional, sentará las bases para futuras mejoras y expansiones, como optimizar la movilidad o incluso desarrollar un animatrónico completo en unos años, por lo que tiene mucho potencial. Este proyecto puede ser utilizado como una herramienta para inspirar a más estudiantes a involucrarse en el desarrollo de sistemas mecatrónicos, fomentando la creatividad, la experimentación y el aprendizaje aplicado a la vida real.

### 4.1. Objetivo general

Desarrollar una cabeza animatrónica inspirada en Jack como herramienta de divulgación tecnológica en la Universidad del Valle de Guatemala.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar con software CAD la carcasa de la cabeza animatrónica y sus mecanismos internos.
- Fabricar los mecanismos y componentes del rostro animatrónico por medio de fabricación digital.
- Diseñar el sistema de control utilizando un ESP32, un controlador PCA9685 y el control *bluetooth* para gestionar los servomotores, sensores y otros componentes electrónicos.
- Integrar el sistema de control en circuitos impresos personalizados para organizar los componentes electrónicos.
- Realizar pruebas de movimiento y ajustes para optimizar la funcionalidad y precisión de los mecanismos.

Este proyecto se enfoca en el diseño e implementación de una cabeza animatrónica inspirada en Jack, la mascota de la Universidad del Valle de Guatemala. El alcance se limita exclusivamente al rostro y a los movimientos de ojos, párpados, cejas y mandíbula; no se contempla el desarrollo de un cuerpo completo ni de otros tipos de expresiones más complejas fuera de estos cuatro elementos.

Dentro de este alcance se incluye el diseño mecánico de la cabeza animatrónica en software CAD y la fabricación de sus piezas mediante métodos de fabricación digital, principalmente impresión 3D y maquinado *computer numerical control* (CNC). También abarca el diseño e implementación del sistema electrónico y de control basado en un microcontrolador ESP32 TinyS3 y un controlador PCA9685, encargados de gestionar los servomotores que producen los movimientos expresivos del rostro. Además, comprende la programación del sistema de control para generar movimientos básicos de mirada (derecha–izquierda y arriba–abajo), la apertura y cierre de párpados, el movimiento de cejas y la apertura/cierre de la mandíbula, así como la integración de comunicación inalámbrica mediante Bluetooth Low Energy (BLE) para el control remoto del rostro y el ajuste de sus movimientos en tiempo real.

Quedan fuera del alcance del proyecto aspectos como la construcción de un cuerpo animatrónico completo, la implementación de sistemas avanzados de interacción (por ejemplo, reconocimiento de voz o inteligencia artificial) y el diseño de rutinas coreografiadas de larga duración. Estos elementos se consideran posibles líneas de trabajo futuro.

## 6.1. Animatrónico

Los animatrónicos son máquinas o “robots” diseñados para simular personajes ficticios, animales e incluso humanos, con el objetivo de imitar gestos y movimientos que permitan representar emociones humanas. Estos sistemas pueden variar en su complejidad, desde aquellos que realizan movimientos básicos hasta los que logran recrear gestos extremadamente detallados, lo que les permite ser utilizados en áreas tan diversas como el entretenimiento, el aprendizaje e incluso la terapia psicológica [9].

La animatrónica en cambio, es la técnica que da vida a estas máquinas, que les da un comportamiento similar al de los seres vivos. Esta disciplina permite “humanizar” a los robots, dándoles la capacidad de imitar los movimientos de los músculos, las expresiones faciales y otras características biológicas. Sin embargo, no todos los animatrónicos requieren el mismo nivel de realismo, algunos solo necesitan movimientos simples, mientras que otros, más avanzados, demandan un grado de detalle mucho más alto para lograr una interacción más natural. En este sentido, la animatrónica es el proceso técnico detrás del animatrónico, que es el producto final resultante.

El primer audio-animatronic oficial de Disney se presentó en 1954 en la película *20,000 leguas de viaje submarino*, donde un calamar gigante cobraba vida gracias a un sistema de cables y actuadores mecánicos ocultos bajo el set de filmación [10]. Desde entonces, los avances en la animatrónica han permitido la creación de sistemas mucho más complejos, combinando control digital, materiales como piel sintética y maquillaje, e incluso inteligencia artificial.

Hoy en día, la animatrónica es mucho más avanzada que hace 60 años. No solo los movimientos son más naturales, sino que también se utilizan tecnologías que permiten crear animatrónicos tan realistas que es difícil distinguir si estamos frente a

una máquina o a una persona. Además, la incorporación de la inteligencia artificial ha dado paso a los androides, robots diseñados para imitar al humano de manera extremadamente precisa [11].

**Figura 2.** Animatrónico Mime Face: estructura interna y piel sintética



Nota. Comparación entre la estructura mecánica interna y la apariencia final con piel sintética. Esta imagen fue obtenida de [12], cortesía de Engineered Arts.

## 6.2. Diseño animatrónico

El diseño animatrónico es un proceso multidisciplinario que integra diferentes áreas de la ingeniería, como la electrónica, la mecánica, la programación y el control. A diferencia de un enfoque secuencial en el que se tratan los componentes tecnológicos de manera aislada, el diseño animatrónico debe ser abordado como un sistema completo e interconectado. Esto significa que se puede separar lo mecánico de lo electrónico, sino que ambos deben complementarse para optimizar el rendimiento del sistema. Este proceso es iterativo, esto implica que el diseño no avance de manera lineal. Cada fase del proyecto va acompañada de pruebas físicas, programación, evaluación del funcionamiento, rediseño y nuevas pruebas, lo que permite realizar mejoras continuas hasta alcanzar el resultado deseado [9].

## 6.3. Psicología del color

La psicología del color dice que los colores no son solo estímulos visuales, sino que activan respuestas emocionales y fisiológicas automáticas en el ser humano. Que el humano pueda hacer estas asociaciones no es coincidencia: el rojo se vincula histórica y universalmente con alerta, peligro o agresividad, mientras que el azul se asocia con calma, neutralidad o control. Estas relaciones se han documentado desde

Goethe (1810) hasta estudios contemporáneos como los de Eva Heller (2004) [13], quien demuestra que, a pesar de que hay variaciones culturales, sí existen patrones perceptuales compartidos que les permiten a las personas interpretar los colores como señales emocionales.

En contextos donde no hay lenguaje verbal directo, como en los animatrónicos, este código de color se vuelve muy importante. El cambio de color en los ojos, de azul a rojo, no es solo una variación técnica, sino que activa una respuesta cognitiva instintiva. El observador lo interpreta como un cambio de ánimo o de estado, puede ser de seguridad a amenaza o de tranquilidad a agresividad. Esto representa la misma lógica que hace que una mirada intensa o un rostro enrojecido se vean como señales de enojo o ira. El color, en este caso, actúa como un lenguaje visual, rápido y conocido, que comunica el estado emocional del sistema sin necesidad de movimientos complejos o sonido [13].

**Figura 3.** Psicología del color



Nota. Psicología del color de Goethe moderno. Elaboración propia

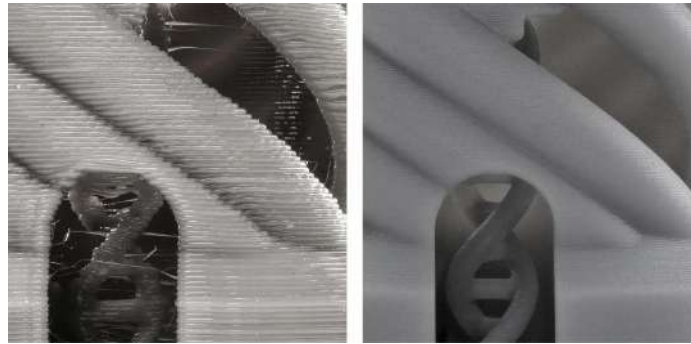
## 6.4. Fabricación digital

La fabricación digital es el proceso de transformar un modelo digital en un objeto físico mediante herramientas controladas por computadora. El propósito es reducir errores humanos, acelerar la producción y permitir la creación de piezas que serían difíciles o imposibles de hacer a mano [14]. En este proyecto, se utilizan dos tecnologías: la impresión 3D y el maquinado CNC. Cada una tiene una lógica distinta, por lo que, elegir una u otra depende de lo que se necesite [14].

La impresión 3D es un proceso aditivo, esto significa que no se remueve material, sino que se construyen las piezas capa por capa a partir de un modelo digital. Esto permite hacer formas compleja, como cavidades internas o curvas orgánicas, que no se podrían obtener con otros métodos. La precisión varía dependiendo de la configu-

ración, el equipo y el material utilizados, por ejemplo, en impresoras *stereolithography* (SLA) o *digital light Processing* (DLP) se alcanzan tolerancias de 0.1 a 0.2 mm; en las *fused deposition modeling* (FDM), suelen estar entre  $\pm 0.3$  y  $\pm 0.5$  mm. Es importante tomar en cuenta que la calidad de la pieza impresa puede verse afectada por factores de diseño, calibración y configuración de la impresora o la contracción del material durante el proceso de fabricación [15].

**Figura 4.** Impresión 3D



Nota. La imagen muestra la comparación de calidad de precisión de la misma pieza. Imagen obtenida de [15].

El maquinado CNC (Control Numérico Computarizado) es un método de fabricación sustractiva, donde se remueve material de una pieza en bruto hasta obtener la forma deseada. Las máquinas CNC utilizan herramientas mecánicas como fresas, brocas o cuchillas, permitiendo trabajar con madera, plásticos y metales, sin embargo, hay máquinas CNC que utilizan rayos de luz altamente concentrados para realizar cortes mucho más precisos en distintos materiales. La precisión del mecanizado CNC depende de la calidad de la máquina, la rigidez del sistema y el tipo de herramienta utilizada. En general, permite obtener piezas con tolerancias de hasta 0.01 mm, dependiendo del material y la configuración. El CNC es ampliamente utilizado en industria, manufactura y prototipado, ya que permite producir piezas idénticas con alta repetibilidad [16].

## 6.5. Servomotor

Un servomotor es un dispositivo electromecánico que en su interior cuenta con un motor de corriente directa (DC), una caja reductora de engranajes y una tarjeta de control, lo que le permite tener un control preciso del ángulo de rotación [18]. El funcionamiento del servomotor se basa en una interacción entre varios componentes clave:

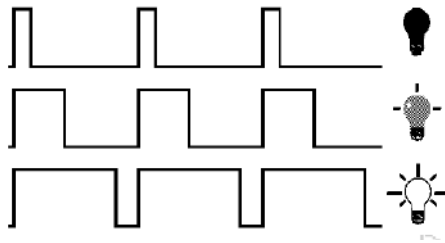
1. **Señal de control:** es una señal eléctrica, generalmente en forma de *pulse-width modulation* (PWM), que indica la posición o el movimiento deseado. En la figura 6 se puede observar diferentes señales PWM.

**Figura 5.** Maquinado CNC



Nota. La imagen muestra una máquina de corte láser trabajando en material MDF, imagen obtenida de [17].

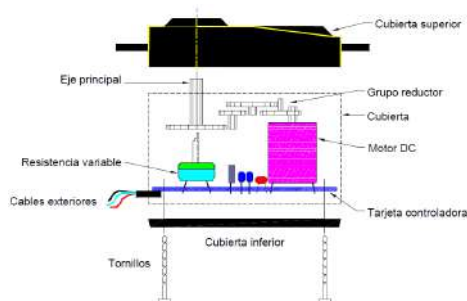
**Figura 6.** Control PWM



Nota. Imagen obtenida de [19].

2. **Motor y mecanismo de engranaje:** el motor, junto con la caja reductora de engranajes, mueve el eje hacia la posición indicada, controlando el par y la velocidad. En la figura 7 se observa un plano deconstruido de un servomotor, para poder apreciar sus componentes internos.

**Figura 7.** Mecanismo interno de un servomotor típico.



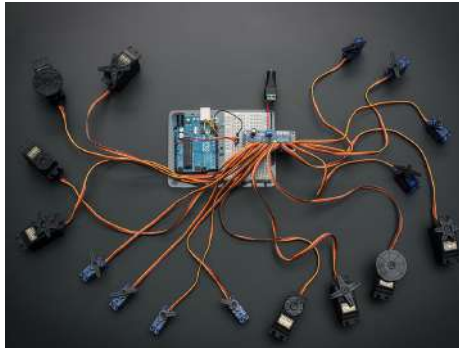
Nota. Adaptado de Naylamp Mechatronics, obtenida de [20].

## 6.6. Controlador de servomotores

El PCA9685 es un controlador PWM de 16 canales pensado originalmente para el manejo de *LEDs red-green-blue* (RGB) mediante el bus I<sup>2</sup>C. Cada salida dispone de un generador de PWM de 12 bits (4096 pasos) que opera a una frecuencia programable entre aproximadamente 24 y 1526 Hz, con ciclo de trabajo ajustable de 0 % a 100 % [21]. Aunque fue diseñado para iluminación, esta misma lógica de PWM lo hace muy útil para controlar varios servomotores con una sola interfaz I<sup>2</sup>C.

En este proyecto, el PCA9685 se utiliza a una frecuencia fija de 50 Hz, adecuada para servomotores tipo hobby como los MG90S y se varía el ciclo de trabajo para colocar cada servo en la posición deseada. De esta forma, el microcontrolador sólo necesita dos pines (SDA y SCL) para manejar hasta 16 canales PWM, reduciendo la cantidad de entradas y salidas requeridas. Además, las tarjetas basadas en este chip permiten encadenar hasta 62 módulos en cascada, lo que se traduce en un máximo teórico de 992 salidas PWM [22], suficiente para sistemas animatrónicos mucho más grandes que el rostro de Jack.

**Figura 8.** Controlador de servomotores



Nota. Placa controladora de múltiples servomotores PCA9685, imagen obtenida de [22].

## 6.7. Protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C

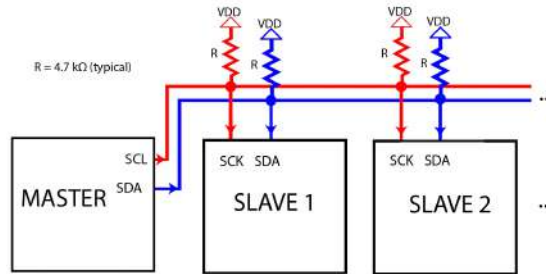
El bus *inter-integrated circuit* (I<sup>2</sup>C) es un protocolo de comunicación serie síncrono, de corta distancia, diseñado para conectar circuitos integrados en una misma tarjeta usando solo dos líneas: SDA (datos) y SCL (reloj). Ambas líneas son bidireccionales y de tipo drenador abierto (*open-drain*), por lo que requieren resistencias de *pull-up* hacia la tensión de alimentación. Este esquema permite que varios dispositivos compartan el mismo bus sin generar cortocircuitos, lo que reduce el cableado y el número de pines necesarios en el microcontrolador [23].

En I<sup>2</sup>C la comunicación siempre es iniciada por un maestro, que genera una condición de inicio (*START*), envía la dirección del dispositivo esclavo (típicamente de

7 bits) y un bit que indica si la operación será de lectura o escritura. El esclavo que reconoce su dirección responde con un bit de confirmación (*ACK*), tras lo cual se transmiten bytes de datos, cada uno seguido de un nuevo *ACK* o *NACK*. La transacción finaliza con una condición de parada (*STOP*). Además, el protocolo permite la existencia de varios maestros en el mismo bus, utilizando un mecanismo de arbitraje basado en el nivel lógico observado en la línea SDA durante la transmisión [23], [24].

El estándar define distintos modos de operación, desde el modo estándar (hasta 100 kbit/s) y modo rápido (hasta 400 kbit/s), hasta extensiones como *fast-mode plus* y *high-speed mode*. Estas velocidades son más que suficientes para aplicaciones de control y sensado típicas en sistemas animatrónicos, donde el bus I<sup>2</sup>C se utiliza para comunicar el microcontrolador principal con periféricos como controladores de servomotores, expansores de entradas/salidas o sensores integrados, manteniendo una topología compacta dentro de la estructura mecánica [23].

**Figura 9.** Ejemplo de topología del bus I<sup>2</sup>C con un maestro y múltiples esclavos.



Nota. Diagrama de conexión típica de SDA y SCL compartidas para varios dispositivos, imagen obtenida de [25].

## 6.8. Protocolo de comunicación BLE

*Bluetooth low energy* (BLE) es un protocolo inalámbrico de corto alcance diseñado para ahorrar energía manteniendo una comunicación estable. Opera en 2.4 GHz con 40 canales y utiliza saltos de frecuencia para evitar interferencias. Su estructura separa la capa de radio/enlace (*controller/host*) de la lógica de datos, donde *generic attribute profile* (GATT) organiza la información en servicios y características. En la práctica, un periférico envía anuncios para ser descubierto y un host/central se conecta y recibe datos mediante notificaciones [26].

Con BLE 5 es posible escoger mayor velocidad (2M PHY) o mayor alcance (LE Coded), según la necesidad del caso. En este proyecto, el control de xbox funciona como periférico BLE utilizando el perfil estándar HID sobre GATT y el esptinyS3 es el host/central empleando la librería Bluepad32 (Arduino/ESP32) [27], para gestionar el emparejamiento BLE, la suscripción a reportes *human interface device* (HID) y la lectura de botones/joysticks, que luego se traducen en movimientos de un rostro

animatrónico con baja latencia y consumo eficiente.

## 6.9. Banco de poder

Una fuente conmutada es un dispositivo electrónico que convierte eficientemente energía eléctrica de un voltaje a otro, utilizando transistores que se encienden y apagan rápidamente (conmutan) para transferir energía en pulsos de alta frecuencia. En este proyecto, la alimentación inicia en la red a través de un jack AC de 3 pines con interruptor y fusible, que protege el primario y permite el corte seguro. La conversión AC-DC se realiza con una fuente conmutada de 5 V/20 A, para potencia de actuadores (V+ del PCA9685) y para la lógica (*printed circuit board* (PCB) con esptinyS3). Se utilizó cable calibre 14 para la conexión entre el Jack *alternating current* (AC) y los pines de línea, neutro y tierra de la fuente, para el PCA9685 que recibe 5 V en V+ para servos, se usó calibre 18 y calibre 20 para la conexión hacia el ESPtinyS3 para lógica y comparten GND con el bus de potencia [28].

**Figura 10.** Fuente conmutada de 5 V y 20 A utilizada en el sistema.



Nota. Imagen referencial de una fuente conmutada 5 V/20 A, obtenida de [29].

---

### Proceso de diseño, fabricación y ensamblaje del rostro animatrónico

---

En el presente capítulo se describe el proceso completo de diseño, fabricación y ensamblaje del rostro animatrónico. El desarrollo de Jack no fue lineal, sino iterativo, cada componente como los mecanismos internos, la carcasa que da forma al rostro y la base que sostiene el conjunto, pasó por varias versiones de diseño hasta llegar a una configuración funcional y manufacturable. Estas iteraciones se centraron principalmente en optimizar el espacio interno para los mecanismos de ojos, párpados, cejas y mandíbula; reducir el peso de las piezas móviles para que los servomotores trabajaran dentro de su rango de torque; mejorar la rigidez y estabilidad de la estructura base en perfiles de aluminio 2020; y facilitar el cableado y la integración de la electrónica de control. El detalle de estas versiones intermedias y de las decisiones tomadas en el camino se documentó en un diario de investigación, incluido como anexo digital en formato de cuaderno OneNote (Anexo 12.2).

A lo largo del capítulo se presentan los criterios de diseño y los resultados finales de cada subsistema, más que describir cronológicamente cada versión intermedia. Se explica cómo se definió la geometría actual del rostro, cómo se organizaron los mecanismos que producen los movimientos expresivos y cómo se configuró la base que soporta el animatrónico, de modo que el conjunto pueda funcionar como un sistema estable, repetible y didáctico.

Inspirado en el estilo de los animatrónicos de juegos y películas como *Five Nights at Freddy's* (Figura 25), el diseño del rostro busca hacer alusión directa a este lenguaje visual. Este enfoque no solo define su estética, sino que también pretende generar una conexión con los estudiantes interesados en las carreras STEM, mostrando que, a través de proyectos como este, es posible llevar a lo físico personajes y referencias que forman parte de sus intereses y pasiones.

## 7.1. Requerimientos y criterios de diseño del rostro animatrónico

Antes de entrar al detalle de los mecanismos, la carcasa y la estructura base, es necesario establecer qué se esperaba que el rostro animatrónico pudiera hacer y bajo qué condiciones debía funcionar. Esta sección resume los requerimientos y criterios de diseño que guiaron el desarrollo de Jack y sirvieron como referencia para las decisiones posteriores de modelado, selección de componentes, manufactura y ensamblaje.

El diseño del rostro no se limita a reproducir la apariencia de la mascota de la universidad, sino que debía generar expresiones reconocibles, integrarse con la electrónica disponible en el laboratorio y ser lo suficientemente robusto para soportar pruebas continuas. En las subsecciones siguientes se presenta, primero, el objetivo funcional del rostro animatrónico y el tipo de interacción que se buscaba lograr. Luego, los requerimientos asociados a los grados de libertad y a la expresividad, las principales restricciones mecánicas y de manufactura, además de los criterios generales que orientaron los rediseños sucesivos de cada subsistema.

### 7.1.1. Objetivo funcional del rostro animatrónico

El rostro animatrónico tuvo como objetivo principal representar a Jack de forma reconocible y expresiva. Logró transmitir emociones básicas como sorpresa, curiosidad, enojo o alegría mediante movimientos coordinados de ojos, párpados, cejas y mandíbula. No requirió diálogos ni animaciones complejas, ya que la expresividad se basó únicamente en la cinemática del rostro.

En el contexto universitario, Jack se utilizó como recurso demostrativo en actividades y cursos relacionados con STEM. Sirvió tanto como herramienta pedagógica para enseñar diseño mecánico, electrónica, programación y control de movimiento, como para captar el interés de los estudiantes. Mostró que era posible construir personajes inspirados en la cultura popular como los de *Five Nights at Freddy's* a través de proyectos de ingeniería reales.

Desde el punto de vista técnico, los movimientos del rostro fueron repetibles, controlables y suaves. Se diseñaron para ajustarse a las capacidades de los servomotores MG90S, sin exceder su torque seguro (Figura 26). Además, respetó la estética original de Jack, es decir, la cinemática no alteró su silueta característica y los rangos de movimiento resultaron naturales para un dragón estilizado (Figura 27).

El animatrónico no solo se movió, sino que lo hizo con expresividad, precisión y fidelidad al personaje. Esto permitió analizar su funcionamiento y, al mismo tiempo, generar una experiencia atractiva para quienes interactuaron con él.

### 7.1.2. Grados de libertad y expresividad

Para cumplir el objetivo funcional descrito anteriormente, se definió un conjunto mínimo de grados de libertad (GDL) que permitiera generar expresiones claras sin volver el sistema innecesariamente complejo. El rostro se organizó en cuatro subsistemas principales: ojos, párpados, cejas y mandíbula. Cada uno aporta un tipo de movimiento específico a la expresión final. La Figura 28 anexada muestra de forma esquemática la ubicación de estos subsistemas y el sentido de sus movimientos principales.

En la Cuadro 1 se resumen los grados de libertad considerados en el diseño:

**Cuadro 1.** Grados de libertad por subsistema del rostro animatrónico

Subsistema	Movimiento principal	GDL
Ojo derecho	Giro izquierda–derecha ( <i>yaw</i> )	1
Ojo izquierdo	Giro izquierda–derecha ( <i>yaw</i> )	1
Ambos ojos	Movimiento arriba–abajo ( <i>pitch</i> ) compartido	1
Párpados derechos	Apertura/cierre (pestañeo)	1
Párpados izquierdos	Apertura/cierre (pestañeo)	1
Ceja derecha	Subida/bajada	1
Ceja izquierda	Subida/bajada	1
Mandíbula	Apertura/cierre	1
<b>Total</b>		<b>8 GDL</b>

Nota. Cuadro (elaboración propia) que resume los grados de libertad asignados a cada subsistema del rostro animatrónico.

La elección de estos 8 grados de libertad responde a un equilibrio entre expresividad y viabilidad técnica. Por un lado, permite combinar movimientos suficientes para construir expresiones fácilmente reconocibles, por ejemplo:

- **Sorpresa:** ojos abiertos y elevados, párpados bien despejados, cejas altas y mandíbula parcialmente abierta.
- **Enojo:** ojos centrados, párpados más cerrados, cejas descendidas y mandíbula en una posición más tensa o apenas abierta.
- **Curiosidad:** mirada desviada hacia un lado, cejas asimétricas (una más alta que la otra) y mandíbula cerrada.
- **Alegría:** ojos ligeramente elevados, párpados abiertos y cejas levantadas, acompañadas de una pequeña apertura de la mandíbula.

Estas combinaciones de movimientos se implementaron en el prototipo final para generar expresiones faciales reconocibles. En la Figura 11 se muestran algunos ejemplos capturados del animatrónico ya ensamblado.

Por otro lado, mantener un solo grado de libertad para cada conjunto de párpados, para la mandíbula y para el movimiento vertical conjunto de los ojos, reduce el número de servomotores necesarios y simplifica el control. Esto permite trabajar dentro de las capacidades de torque de los servomotores MG90S y de las limitaciones de espacio dentro de la carcasa, sin sacrificar la capacidad del sistema para transmitir las emociones básicas que se buscaban en el diseño de Jack.

**Figura 11.** Ejemplos de expresiones faciales del rostro animatrónico de Jack



Nota. *Collage* fotográfico (elaboración propia) que muestra al animatrónico en diferentes expresiones: riendo, sorprendido, enojado y guiñando un ojo.

### 7.1.3. Restricciones de diseño

El diseño del rostro animatrónico no solo estuvo condicionado por lo que se quería lograr a nivel expresivo, sino también por las limitaciones físicas, de materiales y de manufactura presentes en el laboratorio. Estas restricciones marcaron los márgenes dentro de los cuales se tomaron las decisiones de geometría, distribución de mecanismos y selección de componentes.

Las principales restricciones consideradas fueron:

- **Espacio disponible dentro de la carcasa:** todos los mecanismos de ojos, párpados, cejas y mandíbula debían caber dentro del volumen del rostro sin atravesar la superficie visible ni interferir entre sí. Esto obligó a compactar las piezas, compartir ejes cuando era posible y cuidar la trayectoria de los recorridos para evitar choques internos.
- **Peso máximo de las partes móviles:** la mandíbula y los mecanismos internos debían dimensionarse para no superar el torque que los servomotores MG90S

pueden entregar de forma segura. De acuerdo con la ficha técnica, estos servos proporcionan un par máximo aproximado de 2.2 kg·cm a 4.8 V y 2.5 kg·cm a 6.0 V [31]. En términos simples, esto equivale a que el servo pueda sostener 2.5 kg aplicados a 1 cm del eje (o masas menores a distancias mayores). El torque se calcula de la siguiente manera:

$$\tau = F \cdot r \approx mgr,$$

El peso admisible de cada pieza depende de la distancia entre el eje del servomotor y el centro de masa de la misma. Por ello, se redujeron espesores y se simplificaron geometrías para mantener el producto  $mr$  dentro del margen seguro de par, especialmente en la mandíbula y los elementos que se encuentran más alejados del eje de giro.

- **Materiales disponibles:** el proyecto se desarrolló utilizando PLA para impresión 3D, MDF para piezas planas y estructurales, y perfiles de aluminio 2020 para el esqueleto y tornillería métrica estándar que se consigue en Guatemala. La disponibilidad real de tornillos, tuercas y perfiles condicionó diámetros de agujeros, tipos de uniones y detalles de montaje.
- **Tecnologías de manufactura:** las piezas se fabricaron con impresión 3D FDM en impresoras con un tamaño limitado de cama, corte láser para MDF y herramientas manuales del D-Hive y el laboratorio de mecánica de la universidad (sierras, fresadora, taladros). Esto significó, por ejemplo, dividir piezas grandes en secciones que cupieran en la cama de impresión, diseñar uniones tipo lengüeta–ranura para el MDF y prever tolerancias acordes a la precisión real de estas máquinas.

En conjunto, estas restricciones obligaron a buscar un diseño que fuera compactable, liviano y modular, aprovechando al máximo los materiales y procesos disponibles, sin comprometer la estabilidad del esqueleto ni la expresividad de los movimientos de Jack.

#### 7.1.4. Criterios de rediseño e iteraciones

El desarrollo del rostro animatrónico se apoyó en un ciclo constante de diseño–prueba–ajuste. Cada vez que se fabricaba una versión de los mecanismos o de la carcasa, se documentaban los problemas y se establecían criterios concretos para la siguiente iteración. El objetivo no era solo “corregir errores”, sino ir afinando el sistema para que fuera más robusto, fácil de ensamblar y coherente con las restricciones descritas en las subsecciones anteriores.

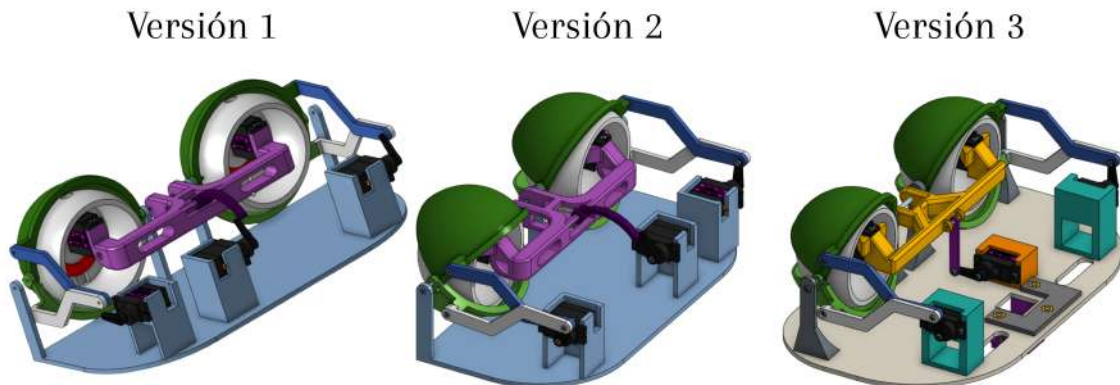
Uno de los lineamientos generales fue que el diseño debía permitir iteraciones rápidas: poder cambiar una pieza, reimprimirla o cortar una nueva sección en MDF sin reconstruir el sistema desde cero. Esto influyó en decisiones como hacer la base de los mecanismos más modular, separar componentes en subensambles y estandarizar tornillería y espesores.

Entre los criterios que guiaron el paso de la versión 1 a la versión 03 de los mecanismos se pueden destacar los siguientes:

- **Disminuir fallas por rotura:** reforzar o rediseñar elementos que se quebraban con facilidad, como las “orejas” que sostienen los párpados, aletas muy delgadas o uniones tangentes a la base que concentraban esfuerzos.
- **Mejorar holguras y evitar roces:** ajustar diámetros de agujeros, alojamientos y ranuras para que tornillos, tuercas y ejes no rozaran otras piezas durante el movimiento, eliminando fricciones que afectaban la suavidad del sistema.
- **Facilitar ensamblaje y sujeción:** rediseñar soportes de servomotores para que los actuadores no se salieran de su lugar, incorporar alojamientos para tuercas y guías de posición, además de simplificar el orden en que se monta cada subconjunto.
- **Ordenar el paso de cables:** prever espacios y perforaciones para el cableado de servomotores y aros de *LEDs*, evitando que queden atrapados entre piezas móviles o que generen desorden dentro de la carcasa.
- **Compatibilizar con el esqueleto en perfiles 2020:** ajustar puntos de anclaje y geometrías de base para que los mecanismos pudieran fijarse de forma segura a la estructura en “H” de aluminio, sin depender de soluciones improvisadas.

Estos criterios se aplicaron de forma recurrente a lo largo del proyecto y sirvieron como filtro para decidir qué cambios incorporar en cada nueva versión. Gracias a este enfoque iterativo, el diseño final de Jack resulta más confiable, mantenible y alineado con el objetivo funcional definido. En la Figura 12 se comparan las versiones 1, 2 y 3 del mecanismo de ojos y párpados, donde se aprecia cómo estos criterios guiaron el rediseño de la geometría, los soportes y la disposición de los servomotores, este es un ejemplo de lo que se realizó en el proyecto completo.

**Figura 12.** Iteraciones del mecanismo de ojos y párpados (versiones 1, 2 y 3)



Nota. Elaboración propia que ilustra la evolución del mecanismo de ojos y párpados a lo largo de las iteraciones de diseño.

### 7.1.5. Integración mecánica–electrónica

Desde el inicio, el diseño del rostro animatrónico se planteó como un sistema integrado, no como una suma de piezas mecánicas por un lado y electrónicas por otro. La ubicación de servomotores, controladores, fuente de poder y PCB condicionó directamente la geometría de la carcasa, el esqueleto en perfiles de aluminio y el cobertor de MDF. De la misma forma, las rutas de cableado y los puntos de conexión influyeron en la posición de orificios, ranuras y soportes internos.

En particular, la integración mecánica–electrónica consideró los siguientes aspectos:

- **Alojamiento para componentes electrónicos:** se definieron volúmenes y puntos de fijación específicos para el PCA9685, la fuente de 5V/20A, la PCB integradora y los propios servomotores. Esto permitió que cada componente tuviera una superficie rígida donde atornillarse y que las conexiones quedaran protegidas dentro del cobertor de MDF.
- **Rutas de cables y espacio para NeoPixels:** los mecanismos y la base se diseñaron dejando pasos claros para el cableado de servomotores y aros de *LEDs* NeoPixel, evitando que los cables quedaran atrapados entre partes móviles o colgando en el interior del rostro. Se reservaron zonas libres detrás de los ojos y bajo la carcasa para agrupar cables y guiarlos hacia la electrónica de control.
- **Estructura base que soporte todo el sistema:** la estructura en “H” de perfiles de aluminio 2020, combinada con el cobertor de MDF, debía soportar simultáneamente el peso de la carcasa, los mecanismos, la fuente y la electrónica. Por ello, los puntos de anclaje de los mecanismos se alinearon con los perfiles y se distribuyeron las masas para mantener el centro de gravedad dentro de la base, evitando vuelcos durante las pruebas.

Gracias a esta integración desde la etapa de diseño, el resultado final facilita el montaje, el mantenimiento y la futura ampliación del sistema, permitiendo acceder a la electrónica sin desarmar toda la parte mecánica y viceversa.

## 7.2. Diseño mecánico del rostro animatrónico

Definidos los requerimientos funcionales y las restricciones de diseño del rostro animatrónico, en esta sección se presenta la solución mecánica adoptada para Jack. El enfoque se centra en el diseño final de la carcasa, los mecanismos internos y la estructura base, entendidos como un solo sistema que debe cumplir con los grados de libertad establecidos, las limitaciones de torque de los servomotores MG90S y el espacio disponible dentro del volumen del rostro.

Aunque el desarrollo pasó por varias versiones intermedias, aquí se describen únicamente las configuraciones consolidadas, es decir, las que resultaron viables de fabricar y ensamblar. Cuando es pertinente, se mencionan de forma breve los ajustes realizados a partir de prototipos previos (por ejemplo, refuerzos, cambios de espesor o reubicación de ejes), pero siempre con el objetivo de explicar por qué la geometría actual resuelve mejor los requerimientos definidos anteriormente.

### 7.2.1. Diseño de la carcasa del rostro

La carcasa del rostro es, en esencia, la “piel” de Jack, esta define cómo se ve por fuera y, al mismo tiempo, delimita el volumen interno donde se esconden todos los mecanismos. Al diseñarla, no solo se buscó que el personaje se reconociera como la versión animatrónica de Jack, sino que también conservara el aire de animatrónico tipo *Five Nights at Freddy's* que se planteó como referencia estética, todo esto dejando suficiente espacio libre para que ojos, párpados, cejas y mandíbula pudieran moverse sin chocar entre sí.

La carcasa principal del rostro, que se puede ver en la Figura 13, se modeló como una única pieza tipo “casco” que cubre toda la cabeza de Jack, como la frente, laterales y zona de mejillas. Este modelo funciona como estructura donde se ocultan servomotores, tornillería y cableado. El interior se vació manteniendo espesores casi constantes en paredes y pómulos, de modo que la pieza fuera lo suficientemente ligera para manipularla y montarla sobre el esqueleto, pero con la rigidez necesaria para no deformarse durante el ensamblaje.

La mandíbula se diseñó como una segunda pieza independiente y más compacta, que se articula bajo esta carcasa principal mediante el mecanismo descrito más adelante.

**Figura 13.** Vista frontal del rostro final de Jack



Nota. Carcasa animatrónica final de Jack. Elaboración propia.

Los detalles externos como los cuernitos, dientes, barba y cejas, se integraron como piezas diferenciadas, pero alineadas con la superficie de la carcasa (Figura 13). Esto permite, reforzar la lectura del personaje como dragón. Los dientes siguen un arco que acompaña la curva de la mandíbula y dejan holguras controladas para que el movimiento de apertura no produzca roces con los dientes de arriba.

### 7.2.2. Diseño del mecanismo de los ojos y párpados

El mecanismo de los ojos y párpados es el responsable principal de la “vida” del rostro, ya que concentra la mayor parte de los movimientos expresivos. Desde el diseño se buscó que los ojos pudieran realizar un giro izquierda–derecha de forma independiente y un movimiento arriba–abajo compartido, mientras que los párpados debían pestañear de manera coordinada o independiente en cada ojo, siguiendo los grados de libertad definidos en la Cuadro 1. La Figura 14 presenta una vista general del conjunto y ubica los componentes principales mencionados en esta subsección. Para una mejor visualización del modelo 3D completo, el mecanismo se encuentra publicado como recurso digital en la plataforma Printables (Anexo [12.1.6]).

#### Globo ocular y soporte de servomotores

Cada ojo se modeló como un globo parcialmente hueco, con un frente esférico donde se aloja el iris y la pupila, además de una parte posterior recortada para liberar espacio al servomotor y al cableado. En la Figura 14 se aprecian los globos oculares, los ejes de rotación internos y el soporte común de servomotores. En el interior de cada globo se dejó un asiento circular para un aro NeoPixel de 12 *LEDs*, que funciona como iris iluminado y un orificio central alineado con el eje del servomotor. El modelo 3D de este globo ocular se encuentra publicado como recurso digital en Printables, para consulta y descarga (Anexo [12.1.6]). De esta forma, el giro izquierda–derecha del ojo se obtiene directamente al accionar el servomotor MG90S fijado al soporte, mientras el globo se atornilla al *horn* del servo.

Los dos servomotores de los ojos se montan sobre un soporte común que mantiene la distancia entre ellos y define el eje de rotación vertical alrededor del cual se realiza el movimiento arriba–abajo compartido. Este soporte incorpora orejas laterales con orificios coaxiales que permiten el paso de un eje rígido; al girar ese eje, todo el conjunto de ojos asciende o desciende como un bloque, sin desplazarse hacia adelante ni hacia los lados. Así se garantiza que los globos oculares se mantengan centrados respecto a las aberturas de la carcasa. El modelo 3D de este soporte central también se documentó y publicó en Printables como parte del conjunto de archivos del proyecto (Anexo [12.1.6]).

## Base estructural del módulo de ojos y párpados

Para integrar el mecanismo al esqueleto de perfiles 2020 se diseñó una base modular (modelo 3D disponible en Printables, Anexo [12.1.6]). En la vista derecha de la Figura 14 se observan la base del mecanismo, las escuadras de acople a perfiles 2020 y las cajas de servomotor. Esta base combina una placa principal pensada para fabricarse en MDF mediante corte láser con piezas 3D impresas que se insertan a presión en ranuras en forma de cruz. La placa incluye:

- Una ranura cuadrada donde se acopla el perfil de aluminio 2020 vertical,
- Tres alojamientos para las cajas de servomotor (dos para párpados y uno para el movimiento “*pitch*” de los ojos),
- Cuatro ranuras frontales para las “orejas” que guían el eje de pestañeo.

Los soportes del eje de los párpados se rediseñaron como piezas más robustas, con un perfil lateral curvo y una base ensanchada para reducir concentraciones de esfuerzo y evitar las roturas observadas en las primeras versiones. En la parte superior se añadieron agujeros laterales donde las cabezas de los tornillos quedan embebidas dentro de la pieza, de modo que no rocen con los párpados durante el movimiento. En la base se incorporaron salientes con orificios pasantes que permiten atornillar los soportes a la placa principal, evitando que se deslicen o se salgan de su posición cuando el mecanismo está en funcionamiento. El modelo 3D completo de estas piezas puede consultarse en la plataforma Printables (Anexo [12.1.6]), lo que facilita visualizar su geometría y su forma de montaje.

Las cajas de servomotor se diseñaron tipo “casita”, es decir, rodean al servomotor MG90S por tres caras y añaden un segundo punto de fijación lateral, de modo que el servo no pueda salirse aunque trabaje cerca de su torque máximo. También se estrechó la ranura de salida de cables para que estos sigan una ruta controlada hacia la parte posterior del módulo. Existen dos variantes de esta base, una versión más baja, utilizada para el servomotor que genera el movimiento arriba-abajo (*pitch*) del conjunto de ojos y una versión más alta destinada a los servomotores del mecanismo de pestañeo. Ambas variantes se señalan en la Figura 14 como cajas de servomotor pequeña y grande. Los modelos 3D correspondientes se encuentran disponibles en Printables (enlaces recopilados en el Anexo [12.1.6]).

## Mecanismo de pestañeo

El pestañeo se resolvió mediante un mecanismo de cuatro barras por cada ojo, accionado por un servomotor dedicado. Los párpados superior e inferior se modelaron como piezas complementarias que comparten ejes de giro en los costados del ojo, con un rango angular aproximado de  $+15^\circ$  y  $-15^\circ$  respecto a la posición neutra. En la Figura 14 se distinguen los párpados superiores e inferiores, así como el mecanismo de

pestañeo que los acciona. Como punto de partida para definir la geometría y el tipo de unión entre párpados y mecanismo se tomó el tutorial de Kevin McAleer sobre diseño de mecanismos de ojos en Fusion 360 [39], y a partir de esa referencia se adaptó la forma al contorno del dragón Jack y a las dimensiones de los servomotores MG90S. Las versiones finales de los párpados superior e inferior se publicaron como modelos 3D descargables, lo que permite inspeccionar su funcionamiento (Anexo [12.1.6]).

Los eslabones de pestañeo conectan el *horn* del servomotor con las extensiones laterales de cada párpado. En los extremos se añadieron alojamientos cilíndricos para que los tornillos trabajen dentro del volumen de la pieza y no sobresalgan, eliminando interferencias con la carcasa y con el resto del mecanismo. Al cortar y posicionar estos eslabones se buscó que, para un giro moderado del servo, el desplazamiento de los párpados cubriera el ojo por completo, permitiendo pasar de una expresión “normal” a un cierre breve de ojos o a un semipestañeo más lento.

### **Eslabón de transmisión vertical**

El movimiento arriba-abajo (*pitch*) conjunto de ambos ojos se logra mediante un eslabón de transmisión vertical que se acopla al soporte central de servomotores. Este eslabón trabaja como una biela: en su extremo inferior se articula sobre un pasador cilíndrico que atraviesa la oreja del soporte, formando una unión tipo pivote con un grado de libertad; en el extremo superior se fija al *horn* del servomotor responsable del movimiento vertical, manteniendo también una articulación rotacional para que el eslabón pueda acompañar el giro del servomotor. En la Figura 14 este componente se señala como eslabón de transmisión vertical. El modelo 3D correspondiente se publicó como recurso descargable en Printables, lo que permite inspeccionarlo en vista 3D y verificar sus dimensiones (Anexo [12.1.6]).

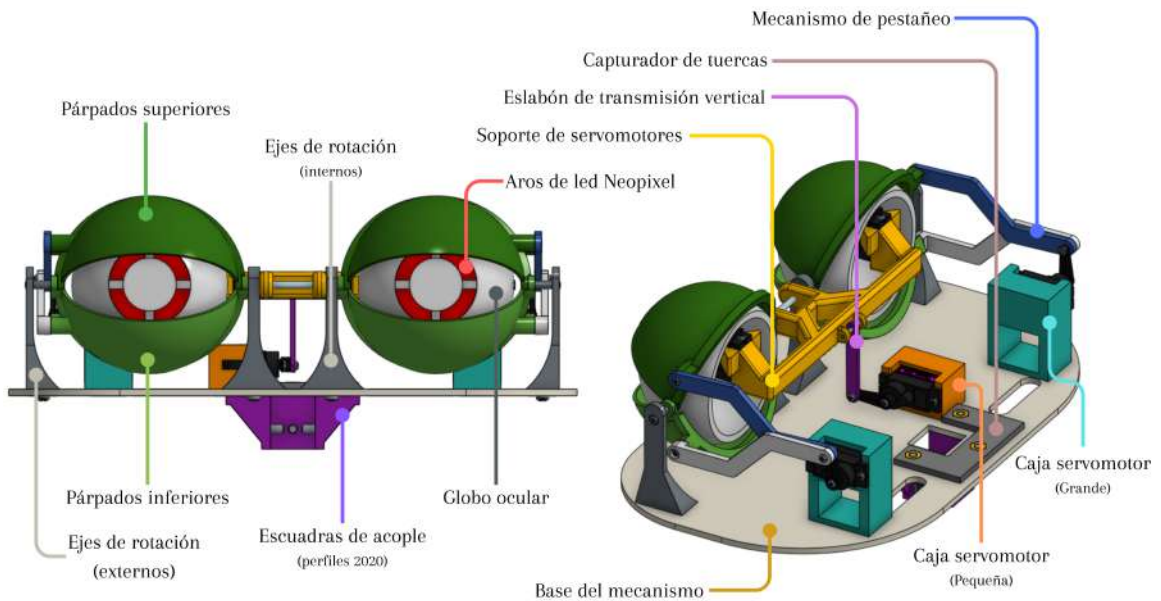
### **Detalles de fijación y captura de tuercas**

Para facilitar el ensamblaje del mecanismo sobre el perfil 2020 vertical, se diseñó una placa de soporte o *capturador de tuercas* que se coloca sobre la base de MDF, alrededor del recorte donde pasa el perfil. Esta placa incluye alojamientos hexagonales para las tuercas, de modo que queden “atrapadas” dentro de la pieza y no sea necesario sujetarlas manualmente al atornillar desde la parte inferior. En la Figura 14 se indica la ubicación de este capturador de tuercas. El modelo 3D de la placa se encuentra disponible en Printables (Anexo [12.1.6]).

La misma idea de captura de tuercas se aplicó en otras partes del mecanismo, en particular en los laterales internos de los párpados (ver modelos 3D listados en el Anexo [12.1.6]). En estas zonas se dejó el contorno de la tuerca modelado por dentro de las piezas, de forma que al insertar la tuerca esta queda alineada y no gira cuando se aprieta el tornillo. Gracias a estos detalles de fijación, el montaje del rostro resulta más rápido y repetible, además se reduce el riesgo de dañar las piezas impresas por

intentar sostener tuercas en espacios reducidos.

**Figura 14.** Conjunto del mecanismo de ojos y párpados con sus componentes principales



Nota. Vista lateral y perspectiva del mecanismo de ojos y párpados, donde se señalan los elementos principales. Elaboración propia.

### 7.2.3. Diseño del mecanismo de la mandíbula

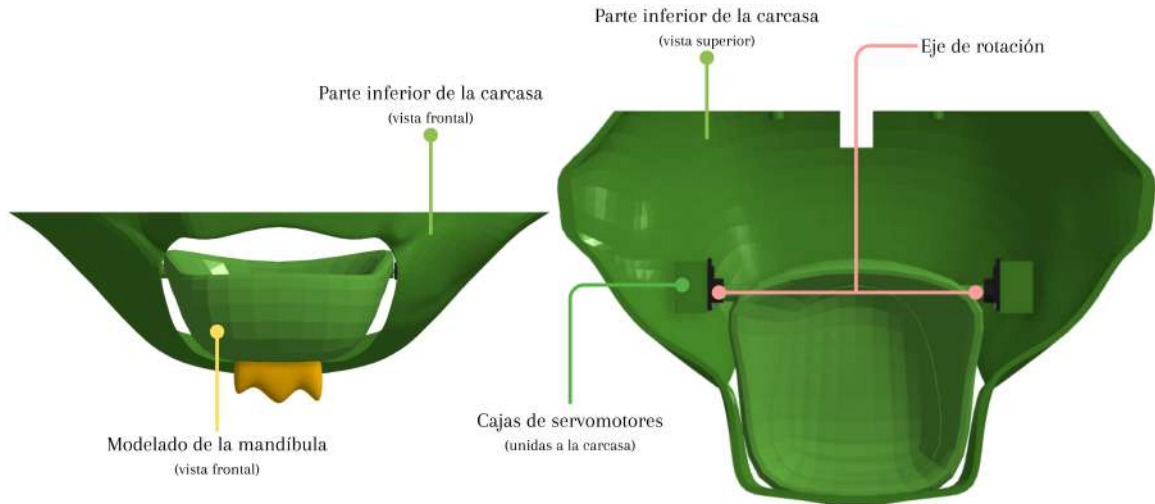
La mandíbula de Jack es la pieza que termina de cerrar la expresión del rostro, ya que permite simular gestos como hablar, reír o mostrar sorpresa. En este proyecto se diseñó con un solo grado de libertad de rotación, de modo que pueda abrirse y cerrarse alrededor de un eje fijo, manteniendo la forma general del hocico y la alineación de los dientes con la carcasa superior, tal como se aprecia en la Figura 15.

La geometría se modeló inicialmente en Blender, siguiendo la silueta de la mascota original y dejando el volumen necesario para alojar los dientes y la “barbita” frontal. A partir de ese modelo se generó un sólido CAD en Autodesk Inventor y Onshape, donde se separó la barbita como pieza independiente y se integró el mecanismo de sujeción. Con el sólido definido se estimaron, mediante el *software* de impresión de Bambu Lab, la cantidad de material y el peso aproximado de la pieza, valores que se utilizan más adelante en la estimación de torque y se resumen en la Cuadro 2. El modelo 3D completo de la mandíbula y su mecanismo de sujeción se encuentra publicado como recurso digital en Printables (Anexo [12.1.6]).

Para mover esta pieza se colocaron dos servomotores MG90S sobre un mismo eje de rotación, ubicados en la parte posterior y superior de la mandíbula. Al compartir

eje, ambos actuadores reparten el esfuerzo necesario para levantar la pieza completa y ayudan a mantener un margen de seguridad frente al torque máximo de cada servo. En la Figura 15, se muestran las cajas de servomotores integradas en la carcasa y el eje alrededor del cual gira la mandíbula.

**Figura 15.** Integración de la mandíbula con la carcasa y la ubicación de los servomotores



Nota. Vistas frontal y superior de la parte inferior de la carcasa, mostrando el modelado de la mandíbula, el eje de rotación y las cajas de servomotores embebidas en la carcasa. Elaboración propia.

### Estimación de torque para la mandíbula

Para verificar que la mandíbula pudiera moverse de forma segura con servomotores MG90S, se hizo una estimación del torque requerido a partir del modelo sólido de la pieza. El *software* de Bambu Lab reportó una masa aproximada de 0.173 kg y un ancho máximo de alrededor de 14.62 cm. Como el eje de giro se ubicó hacia la parte posterior y superior de la mandíbula, se tomó ese ancho como una aproximación del brazo de palanca efectivo entre el eje y la zona más pesada de la pieza.

Con estos datos, el torque necesario para sostener la mandíbula en posición horizontal se calculó a partir de la relación

$$\tau_{\text{mandíbula}} = mgr, \quad (1)$$

donde  $m$  es la masa de la mandíbula,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $r$  la distancia estimada entre el eje de giro y el centro de masa efectivo. Sustituyendo  $m = 0.173$  kg,  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> y  $r = 0.146$  m, se obtiene un torque requerido del

orden de 0.25 N m, que equivale aproximadamente a 2.5 kg cm (usando la conversión: 1 kg cm  $\approx$  0.098 N m).

En la Cuadro 2 se resumen estos parámetros y se comparan con el torque disponible de los servomotores MG90S, considerando que se instalaron dos servos compartiendo el mismo eje de giro.

**Cuadro 2.** Parámetros utilizados para el cálculo de torque de la mandíbula

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa de la mandíbula	$m$	0.173	kg
Ancho máximo de la mandíbula	–	14.62	cm
Brazo de palanca eje–centro de masa	$r$	0.146	m
Gravedad	$g$	9.81	m/s <sup>2</sup>
Torque requerido	$\tau_{\text{mandíbula}}$	$\approx 2.5$	kg cm
Torque por servo MG90S (4.8–6.0 V)	–	2.2–2.5	kg cm
Torque total disponible (2 servos)	–	4.4–5.0	kg cm
Factor de seguridad teórico	–	1.7–2.0	–

*Nota.* Valores aproximados obtenidos a partir del modelo sólido de la mandíbula y de la hoja de datos del servomotor MG90S. Cuadro (elaboración propia).

Aunque en teoría el torque combinado de los dos servomotores (4.4–5.0 kg cm) es mayor que el torque requerido, el valor calculado para  $\tau_{\text{mandíbula}}$  queda muy cerca del límite nominal de un solo MG90S. Con un factor de seguridad teórico entre 1.7 y 2 se habría esperado un comportamiento estable del mecanismo y que la mandíbula se moviera con holgura. Sin embargo, el hecho de que el torque requerido esté tan próximo a la capacidad nominal del servo deja poco margen para pérdidas por fricción, tolerancias de fabricación, peso adicional de tornillería y diferencias entre el torque real y el indicado en la hoja de datos, por lo que el diseño original de la mandíbula termina siendo muy exigente para los MG90S.

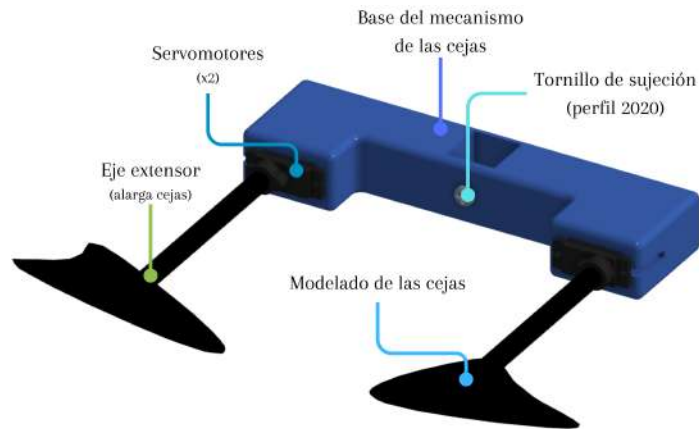
#### 7.2.4. Diseño del mecanismo de las cejas

Las cejas se utilizan para reforzar expresiones, por lo que se diseñó un mecanismo sencillo que permitiera moverlas de forma independiente. Cada ceja se acciona con un servomotor MG90S montado en los extremos de una base rígida, tal como se muestra en la Figura 16. La base se fija directamente al perfil 2020 superior mediante un tornillo de sujeción central, de modo que el conjunto pueda montarse y desmontarse sin afectar el resto del esqueleto.

Sobre el *horn* de cada servomotor se colocó un eje extensor que sobresale hacia el frente y sirve como soporte de la ceja. Estos ejes permiten “alargar” la posición efectiva de las cejas hasta coincidir con el contorno de la carcasa, sin que el servomotor quede visible desde el exterior. En el extremo de cada eje se atornilla el modelado de la ceja, que se imprimió como una pieza ligera y delgada para reducir el momento de inercia y el torque requerido.

Con esta configuración, cada ceja cuenta con un grado de libertad de rotación alrededor de su propio eje, lo que permite levantarla o bajarla según la animación que se programe. Aunque el mecanismo es más simple que el de ojos o la mandíbula, su aporte es clave para matizar las expresiones del rostro y coordinar gestos como “sorpresa” (cejas arriba) o “seriedad” (cejas más bajas), tal como se aprecia en la Figura 16.

**Figura 16.** Mecanismo de las cejas y elementos principales



Nota. Vista del conjunto de cejas que muestra la base del mecanismo, los dos servomotores MG90S, los ejes extensores y el modelado de las cejas, así como el punto de sujeción al perfil 2020. Elaboración propia.

### 7.2.5. Diseño de la base y estructura de soporte

La base del animatrónico funciona como la plataforma que sostiene todo el sistema: el rostro, los mecanismos internos y la electrónica de potencia. Además de soportar el peso, debía mantener el centro de masa dentro de la huella de apoyo para evitar vuelcos durante las demostraciones y, al mismo tiempo, ocultar cables, fuente de alimentación y componentes eléctricos para que el conjunto se viera limpio desde el exterior. El modelo 3D de la base ensamblada se encuentra publicado como recurso digital en Printables (Anexo [12.1.6]), donde se puede explorar la distribución general de perfiles de aluminio y placas de MDF.

Para lograrlo, se combinó una estructura interna de perfiles de aluminio 2020 con una cubierta exterior de MDF tipo “caja”. Los perfiles forman el esqueleto rígido al que se fija el poste vertical que sostiene el rostro de Jack, mientras que las placas de MDF cierran la base por todos los lados y definen el volumen útil donde se aloja la electrónica. El perfil vertical se atornilla a la cubierta superior mediante un recorte central y uniones mecánicas que lo conectan con la estructura de aluminio, de modo que las cargas del rostro se transmiten hacia el suelo a través de este esqueleto, no únicamente por las paredes de MDF.

La cubierta superior de MDF también sirve como tapa de acceso: se puede retirar

para instalar la fuente de 5V, la entrada de corriente, la PCB, el PCA9685 y el resto del cableado. De esta forma, la base no solo cumple una función estructural, sino que organiza el espacio interno, protege los componentes eléctricos y facilita el mantenimiento y el transporte del animatrónico entre actividades.

### **Estructura en “H” con perfiles de aluminio 2020**

La base interna del animatrónico se construyó con perfiles de aluminio 2020 dispuestos en forma de “H”. Esta estructura consta de dos perfiles longitudinales orientados de adelante hacia atrás y un tercer perfil transversal que los une en el centro, actuando como travesaño. Sobre esta armazón se montó la cubierta de MDF, que sirve como soporte visible del rostro. Además, la configuración en “H” permitió distribuir de manera eficiente el peso del conjunto hacia el suelo.

Esta geometría no fue arbitraria, la cabeza de Jack y sus mecanismos internos estaban ligeramente desplazados hacia la parte delantera de la base. Si la estructura hubiera sido más corta en esa dirección, el peso del rostro habría generado una tendencia al vuelco. Al extender los perfiles hacia adelante y hacia atrás, se amplió la huella de apoyo. De esta forma, el centro de masa del animatrónico quedó siempre dentro del área de soporte, lo que garantizó su estabilidad durante el funcionamiento.

### **Escuadras impresas en 3D para la estructura 2020**

Para unir los perfiles 2020 entre sí y fijarlos a la base, se diseñaron escuadras tipo “L” para imprimir en 3D en lugar de usar las comerciales de metal. Se utilizaron dos variantes, una L pequeña para las uniones entre perfiles y una L grande que actúa como soporte adicional en la parte frontal de la base, en caso fuera necesario agregar más contrapeso para soportar la cabeza. Ambas piezas se modelaron con un espesor de pared de 4 mm, de modo que los tornillos y tuercas quedaran bien alojados dentro del plástico y pudieran apretarse sin barrer el material. Los modelos 3D de estas escuadras se publicaron como recursos descargables en Printables (enlaces recopilados en el Anexo [12.1.6]), lo que permite revisar su geometría y la forma en que se acoplan a los perfiles 2020.

### **Cubierta de MDF**

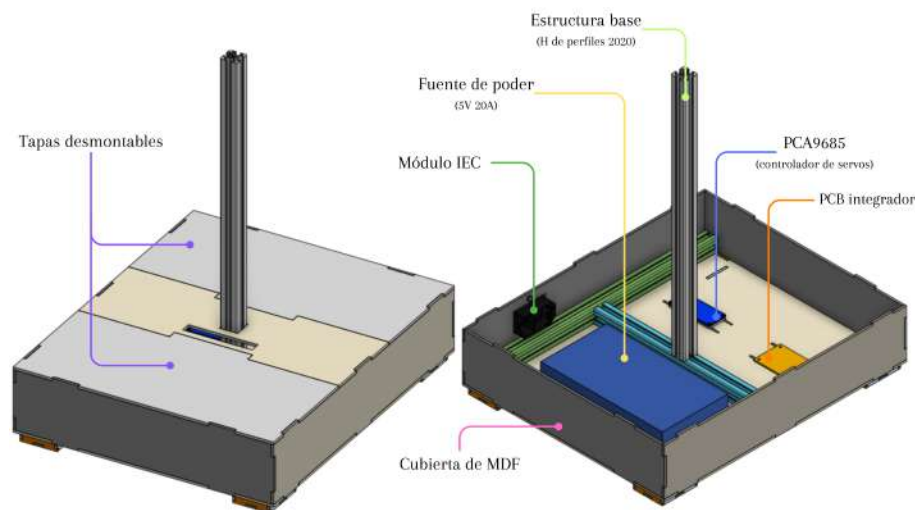
La estructura en “H” de perfiles de aluminio se recubre con una caja de MDF alrededor de la base. Esta oculta la fuente de poder, la electrónica de control y el cableado, de modo que desde afuera solo se perciba un bloque limpio del que sale el poste que sostiene la cabeza de Jack. Las piezas se cortaron en láser a partir de planos 2D, usando planchas de 3 mm disponibles en el laboratorio para equilibrar rigidez y peso.

El ensamblaje se resolvió con un sistema tipo caja, utilizando pestañas y ranuras entre las caras para que las placas se alinearan automáticamente al armarse. La base, las paredes y las tapas se atornillan a la estructura de perfiles 2020, por lo que el MDF funciona como cobertor que encierra el conjunto y ayuda a repartir las cargas hacia los perfiles.

En las tapas y paredes se dejaron los recortes para montar la fuente de poder y ranuras donde se puede insertar la placa PCA9685 y la PCB integradora, lo que facilita el ordenado del cableado y el mantenimiento interno. En la parte posterior se habilitó una abertura rectangular con agujeros de fijación para montar un módulo de entrada de corriente tipo IEC con interruptor, como se muestra en la Figura 36. Este módulo permite conectar el sistema a un enchufe estándar y mantener aislada la zona de la fuente de poder.

Además de cerrar la caja, la cubierta de MDF deja espacio suficiente en su interior para organizar los componentes eléctricos y las rutas de cables. La tapa se puede retirar para acceder a la fuente, a la entrada de corriente y a la PCB, de modo que la base funciona tanto como soporte mecánico como contenedor ordenado para la electrónica que hace posible el movimiento del rostro animatrónico, como se muestra en la Figura 17.

**Figura 17.** Base del animatrónico con cubierta de MDF y distribución de componentes internos



Nota. Vista de la base recubierta con MDF, indicando las tapas desmontables, la estructura en perfiles 2020, la fuente de poder, el módulo IEC, el controlador PCA9685 y la PCB integradora. Elaboración propia.

## 7.3. Fabricación de los componentes mecánicos

Una vez definido el diseño de la carcasa, los mecanismos internos y la base, el siguiente paso fue fabricar cada una de las piezas. En esta sección se explica cómo se hicieron los componentes mecánicos del rostro animatrónico, es decir, qué se imprimió en 3D, qué se cortó en MDF con láser y cómo se preparó la estructura de perfiles de aluminio 2020.

La fabricación se dividió en tres grupos principales. Por un lado se trabajaron las piezas impresas en 3D, como la carcasa, la mandíbula, los mecanismos de ojos, párpados, cejas y varios detalles. Por otro lado se obtuvieron piezas planas de MDF mediante corte láser, entre ellas las placas base y los paneles de la base. Finalmente se prepararon los elementos estructurales comerciales, como los perfiles 2020 y la tornillería. En las subsecciones siguientes se resumen los parámetros generales de impresión, las decisiones que se tomaron al momento de cortar el MDF y la preparación de los perfiles y escuadras, junto con los ajustes y postprocesos básicos que hicieron falta para que todas las partes encajaran correctamente al momento del ensamblaje.

### 7.3.1. Fabricación de piezas impresas en 3D

La mayor parte del proyecto se fabricó con impresión 3D, ya que esto permitió pasar del modelo digital a piezas físicas con buena precisión y con libertad de forma. En esta categoría entran la carcasa del rostro, la mandíbula, los mecanismos de ojos, párpados y cejas, las escuadras para la estructura en perfiles 2020 y varios accesorios pequeños que ayudan al ensamblaje. Todas estas piezas se imprimieron en material PLA utilizando impresoras FDM del MakerLab y el D-Hive, además del *software* de laminado de Bambu Lab para preparar los archivos de impresión.

Para mantener el proceso manejable se usó una configuración general de impresión que sirviera como punto de partida para casi todas las piezas, haciendo ajustes puntuales solo cuando era necesario por tamaño o esfuerzo mecánico. En las subsecciones siguientes se describe primero esa configuración general y luego se comentan algunos detalles específicos de la impresión de la carcasa y la mandíbula, así como de los mecanismos internos y de las piezas auxiliares.

#### Configuración general de impresión

La mayoría de piezas del proyecto se imprimieron en una impresora *Original Prusa i3 MK3S+* del MakerLab, utilizando perfiles de PLA en PrusaSlicer [48], [49]. Algunas piezas decorativas más pequeñas, como los cuernos, la barba y la mandíbula, se fabricaron en impresoras Bambu Lab disponibles en el laboratorio, manteniendo parámetros de impresión similares. La carcasa principal del rostro, por su tamaño, se imprimió en una impresora FDM de gran formato *Elegoo OrangeStorm Giga* del D-Hive [50], que permite trabajar con un volumen de impresión mucho mayor que

las impresoras habituales.

Se partió de un perfil base de PLA y se ajustaron solo algunos parámetros sencillos, de forma que el proceso fuera fácil de repetir. Se buscó un equilibrio entre tiempo de impresión, rigidez de las piezas y facilidad para retirar soportes.

En la Cuadro 3 se resumen los parámetros generales que se usaron como punto de partida para la mayoría de las piezas del proyecto.

**Cuadro 3.** Parámetros generales de impresión 3D

Parámetro	Valor típico	Comentario
Material	PLA	Filamento estándar
Diámetro de boquilla	0.4 mm	Boquilla por defecto
Altura de capa	0.2 mm	Detalle/tiempo
Porcentaje de relleno	20 %	Valor medio
Patrón de relleno	Cuadrícula o similar	Rigidez general
Tipo de soporte	Árbol delgado	Zonas críticas
Adhesión a la cama	Borde sencillo	Mejora la sujeción
Temperatura de boquilla	Según perfil PLA	Valores de perfil
Temperatura de cama	Según perfil PLA	Depende de la impresora

*Nota.* Parámetros de referencia utilizados en el proyecto, basados en los perfiles de PLA recomendados para la *Original Prusa i3 MK3S+* y la impresora de gran formato del D-Hive [49], [50], (elaboración propia).

Cuando una pieza necesitaba soporte se utilizó de forma constante el modo de soporte en forma de árbol, con el estilo de árbol delgado y la opción de añadir soportes solo en regiones críticas. Esta combinación redujo significativamente el tiempo de impresión y la cantidad de material usado y al mismo tiempo hizo más fácil retirar los soportes en zonas con voladizos, como la parte inferior de los párpados o algunos detalles de la mandíbula.

En el caso particular de la carcasa del rostro, el modelo ocupó casi todo el volumen útil de la impresora de gran formato del D-Hive. Aun así se mantuvieron parámetros cercanos a los empleados en el resto del proyecto, con PLA, altura de capa alrededor de 0.2 mm y un relleno cercano al 20 %, para que la carcasa se comportara de forma similar a las demás piezas impresas.

### Impresión de la carcasa, mandíbula y detalles representativos

Dentro del conjunto de piezas impresas en 3D, las que más tiempo y material consumieron fueron la carcasa del rostro y la mandíbula. Estas piezas definen en gran medida la apariencia final del animatrónico y concentran una buena parte del peso total del sistema.

La mandíbula se imprimió en una impresora Bambu Lab del D-Hive [48]. Para reducir la cantidad de soportes se dividió el modelo en dos mitades, de modo que la

cara de corte quedara apoyada directamente sobre la cama.

La carcasa principal del rostro se fabricó en tres partes sobre una impresora de gran formato *Elegoo OrangeStorm Giga* del D-Hive [50]. Imprimir la pieza completa en una sola pieza habría requerido una gran cantidad de soportes y un tiempo de fabricación mucho mayor, por lo que se optó por separarla en parte superior, parte inferior y sección trasera. En la Cuadro 4 se resumen los tiempos y el material consumido en cada una de las impresiones.

**Cuadro 4.** Resumen de impresión de carcasa y mandíbula

Pieza	Impresora	Partes	Material	Tiempo
Mandíbula	Bambu Lab	2	≈ 260 g	≈ 3 h 30 min
Carcasa, parte superior	Elegoo OrangeStorm Giga	1	≈ 900 g	≈ 21 h
Carcasa, parte inferior	Elegoo OrangeStorm Giga	1	≈ 372 g	≈ 8 h 15 min
Carcasa, parte trasera	Elegoo OrangeStorm Giga	1	≈ 346 g	≈ 7 h 22 min

*Nota.* Tiempos y consumos de material aproximados, tomados de los reportes de PrusaSlicer y Bambu Studio al momento de laminar cada pieza. Elaboración propia.

En todos los casos se mantuvieron parámetros coherentes con la configuración general descrita en la Cuadro 3. Las piezas grandes se orientaron de forma que presentaran una cara más plana sobre la cama, lo cual redujo la cantidad de soportes necesarios y aprovechó mejor el material.

Los detalles representativos del rostro, como los cuernos, la barba y otros elementos decorativos, se imprimieron en impresoras Bambu Lab con la misma combinación de PLA, altura de capa de 0.2 mm y relleno del 20 %. Al ser piezas mucho más pequeñas, sus tiempos de impresión y consumo de material fueron claramente menores que los de la carcasa y la mandíbula, pero se cuidó que compartieran las mismas condiciones generales para que su acabado y su rigidez fueran consistentes con el resto del conjunto.

### Impresión de piezas para los mecanismos internos

La mayoría de piezas que forman los mecanismos internos, como soportes de servomotor, eslabones, orejas de párpados, bases de cejas y pequeños adaptadores, se imprimieron en la *Original Prusa i3 MK3S+* del MakerLab [48]. Estas piezas se generaron a lo largo de varias iteraciones de diseño y se mandaron a fabricar por lotes pequeños, conforme se iban ajustando dimensiones, holguras y detalles de montaje.

Debido a esta forma de trabajo, no se llevó un registro pieza por pieza del tiempo de impresión ni de la cantidad exacta de material usado en cada iteración. Sin embargo, tomando como referencia los reportes de laminado de los modelos finales y el número de componentes fabricados, se estima que la versión consolidada de los mecanismos (sin contar prototipos previos) consumió en conjunto menos de 400 g de PLA. En todos los casos se mantuvieron parámetros similares a los de la Cuadro 3, con alturas

de capa de 0.2 mm, relleno del 20 % y soportes tipo árbol únicamente en las zonas críticas.

El hecho de que la fabricación de estas piezas se realizara en el MakerLab, utilizando una configuración de impresión estandarizada, ayuda a que el proyecto pueda reproducirse con relativa facilidad en el futuro, ya que cualquier estudiante puede partir de los mismos archivos STL y de parámetros de impresión muy similares.

### **7.3.2. Fabricación de piezas en MDF mediante corte láser**

Además de las piezas impresas en 3D, el proyecto utilizó varias partes planas en MDF que se fabricaron mediante corte láser. Este material se eligió porque es fácil de trabajar, tiene un espesor muy uniforme y permite obtener formas precisas en poco tiempo, lo que resulta útil para placas base, tapas y paneles estructurales ligeros.

Las piezas se modelaron primero en *CAD* como sólidos o superficies y luego se exportaron a archivos 2D para el *software* de la cortadora. A partir de estos planos se definieron contornos exteriores, ranuras, pestañas de ensamblaje y orificios para tornillos, cuidando que todo coincidiera con las medidas reales de los perfiles de aluminio y de las piezas impresas en 3D. En el laboratorio se trabajó principalmente con planchas de MDF de 3 mm de espesor, por lo que muchas uniones y encastrés se diseñaron pensando en ese valor.

El corte se realizó en la cortadora láser del MakerLab de la Universidad del Valle de Guatemala, usando los parámetros estándar de trabajo para MDF que se manejan en el laboratorio [48]. En lugar de definir parámetros diferentes para cada pieza, se siguieron las convenciones del documento de parámetros de corte del MakerLab [51], donde se indican los colores y grosores correspondientes.

#### **Placa base del mecanismo de los ojos**

La placa base del mecanismo de los ojos se fabricó en MDF de 3 mm mediante corte láser a partir del modelo descrito anteriormente, usando el archivo disponible en Printables (Anexo [12.1.6]). El tiempo de corte fue de aproximadamente 2 minutos, lo que supuso una mejora importante frente a la primera versión de esta base, que había sido impresa en 3D y requería cerca de 3 horas de fabricación. Al pasar la pieza a MDF también fue posible modularizar mejor el mecanismo, separando la placa plana de los soportes impresos en 3D y haciendo más sencillo el proceso de ensamblaje y desensamble del módulo ocular sobre el perfil 2020.

#### **Paneles de la base en MDF**

Los paneles que forman la cubierta tipo caja de la base se cortaron en MDF de 3 mm a partir de los planos 2D descritos en la Sección 1.2. Por el tamaño y la cantidad

de piezas fue necesario usar dos planchas de MDF de 40 cm × 60 cm para completar todo el juego de partes. En total se obtuvieron 25 piezas, de las cuales 9 corresponden a paneles grandes, con longitudes que llegan aproximadamente hasta los 177 mm en la pieza más extensa. La distribución y forma de estos paneles, así como su ensamble con la estructura interna, se puede observar en el recurso digital disponible en Printables (Anexo 12.1.6).

Al agrupar los cortes por plancha y aprovechar al máximo el área disponible, el tiempo total de corte láser para todos los paneles se mantuvo dentro de un rango estimado de 15 a 20 minutos.

### 7.3.3. Preparación de perfiles de aluminio y tornillería

El esqueleto del animatrónico se construyó con perfiles de aluminio 2020 de 1 m de longitud, similares a los que se comercializan en Guatemala para proyectos de CNC e impresoras 3D [52], [53]. Para las uniones y puntos de fijación se utilizó tornillería métrica estándar, tuercas tipo T-nut y tornillos de diferentes longitudes. En el proyecto se emplearon tornillos desde 2 mm de diámetro (M2) hasta 5 mm (M5), con largos aproximados que fueron desde 5 mm para fijaciones cortas hasta 50 mm en el punto donde era necesario atravesar varias piezas.

Estos elementos se adquirieron en ferreterías especializadas en tornillería y materiales de construcción, como La Casa del Tornillo, Novex y Tornillos Basauri [54], [55], [56]. Esto facilitó conseguir medidas específicas y repuestos durante las iteraciones de diseño y montaje.

#### Corte y preparación de perfiles 2020

Para la estructura del animatrónico se partió de dos perfiles de aluminio 2020 de 1 m de longitud. A partir de estos se obtuvieron los tramos necesarios para formar la estructura en “H” de la base y el perfil vertical que sostiene el rostro. Los cortes se realizaron en el salón Construye del D-Hive y luego se alinearon los extremos en el laboratorio de mecánica de la universidad, usando una fresadora para corregir pequeñas torceduras y asegurar que las caras de apoyo quedaran rectas.

En total se obtuvieron cuatro perfiles con las longitudes indicadas en la Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Perfiles de aluminio 2020 utilizados en la estructura

Ubicación en la estructura	Cantidad	Longitud [cm]
Tramos longitudinales de la “H”	2	35
Tramo central de la “H”	1	25
Perfil vertical que sostiene el rostro	1	40

*Nota.* Longitudes medidas después del corte y escuadrado de los extremos en el laboratorio de mecánica.

## Escuadras y soportes impresos en 3D para la estructura

Las escuadras tipo “L” y los soportes para la estructura se imprimieron en PLA en las impresoras *Original Prusa i3 MK3S+* del MakerLab, a partir de los modelos descritos anteriormente (Anexo [12.1.6]). Todas estas piezas se diseñaron pensando en trabajar con tornillos M4 de 10 mm de largo y tuercas tipo T-nut, de modo que pudieran fijarse directamente en las ranuras de los perfiles 2020 sin necesidad de hacer modificaciones adicionales.

La geometría de las escuadras impresas incluye paredes de aproximadamente 4 mm de espesor y alojamientos para que los tornillos y las tuercas quedaran bien asentados dentro del plástico. Esto permitió que las escuadras funcionaran como puntos de apoyo rígidos entre los perfiles de aluminio y, al mismo tiempo, como soportes para otros elementos de la estructura. Más adelante, en la sección de montaje, se describe con detalle cómo se utilizaron estas piezas para unir los perfiles y sostener los mecanismos del rostro animatrónico.

### 7.3.4. Ajustes y postprocesos

Una vez fabricadas todas las piezas del rostro animatrónico, fue necesario hacer algunos ajustes y trabajos de postproceso para que el resultado final se viera más uniforme y cercano al estilo de los animatrónicos en los que se inspiró el proyecto. Estos pasos incluyeron alinear y corregir pequeñas imperfecciones en las uniones, suavizar transiciones entre piezas impresas y superficies planas, además de preparar la carcasa y la mandíbula para recibir un acabado más cercano al de un personaje de *Five Nights at Freddy's*, con un aspecto ligeramente más “robótico” pero todavía reconocible como Jack, tal como se aprecia en la Figura 1.

### Masillado, lijado y acabado de piezas impresas

Para mejorar el acabado superficial y unificar la apariencia del rostro se aplicó masilla plástica automotriz sobre las piezas impresas en 3D. Se utilizó una masilla tipo Jetbond de Sherwin Williams, que trabaja con catalizador. La mezcla masilla-catalizador permitió que el material endureciera rápido y alcanzara la dureza necesaria para poder lijar sin que se despegara del PLA. Este recubrimiento se aplicó en las zonas más visibles, como la carcasa superior e inferior, la mandíbula, los párpados, los ojos, los cuernos, la barba y los bigotes.

Antes de masillar se unieron las piezas que estaban divididas para impresión. En la carcasa se pegaron la parte superior e inferior y en la mandíbula se unieron las dos mitades. Para esto se usó una combinación de *super glue* y una solución de bicarbonato con agua como activador, lo que permitió fijar las uniones casi al instante. Una vez rígidas, las piezas unidas se cubrieron con masilla para ocultar las líneas de separación y dejar el rostro como una sola pieza continua.

Después de aplicar la masilla y dejarla secar se lijó la superficie en varias pasadas usando lijas de diferente grano, con valores comprendidos entre 80 y 600. El objetivo fue eliminar escalones de impresión, suavizar transiciones y dejar una textura uniforme que recordara más a un animatrónico pintado que a una pieza recién salida de la impresora. La Figura 18 resume este proceso, mostrando desde la carcasa recién impresa hasta el masillado y el lijado final.

Sobre esta superficie ya alisada se aplicó una capa de *primer* blanco en aerosol. Esta capa ayudó a sellar la masilla, mejorar la adherencia de la pintura final y cubrir los colores distintos de los filamentos utilizados en los laboratorios. Luego se pintaron las piezas con los colores del personaje, siguiendo la estética original. La carcasa y la mandíbula se pintaron en verde, los cuernos, la barba y los bigotes en amarillo, los dientes y la parte blanca de los ojos en color blanco y los párpados en verde. Para agilizar el proceso se utilizó pintura en aerosol. Finalmente se aplicó un esmalte mate transparente que selló el color y dio al conjunto un acabado más uniforme y cercano al de un animatrónico de parque temático.

Todo este proceso de masillado, lijado y pintado tomó alrededor de cuatro días de trabajo, alternando tareas mientras las piezas secaban entre una etapa y la siguiente.

**Figura 18.** Proceso de masillado y lijado de la carcasa del rostro animatrónico



Nota. Secuencia fotográfica que muestra, de izquierda a derecha, la carcasa recién impresa, la aplicación de masilla plástica automotriz y el lijado posterior antes del acabado de pintura. Elaboración propia.

#### 7.4. Ensamblaje y verificación del rostro animatrónico

Una vez fabricadas todas las piezas del proyecto llega el momento de reunirlo todo en un solo sistema. En esta sección se describe cómo se montaron la base, los mecanismos internos y la carcasa del rostro hasta formar el animatrónico completo, siguiendo un orden de ensamblaje que reduce errores y facilita el acceso a los componentes cuando hace falta hacer ajustes.

El enfoque se centra en el ensamblaje mecánico del rostro y de su estructura de soporte. Se explica cómo se fijaron los mecanismos de ojos, párpados, cejas y mandíbula a la base en perfiles 2020, cómo se integró la cubierta de MDF y cómo se acomodaron los principales elementos de la electrónica dentro de la caja sin entrar al detalle del circuito. Al final de la sección, se resume la verificación inicial de movimiento que se hizo con los servomotores ya conectados de forma básica, para comprobar que los rangos de giro y las trayectorias definidos en el diseño se podían alcanzar sin roces ni interferencias.

#### **7.4.1. Orden general de ensamblaje**

Aunque en la práctica hubo múltiples iteraciones, el montaje final del rostro animatrónico se puede resumir en los siguientes pasos generales:

1. Ensamblaje de los mecanismos individuales.
2. Armado del esqueleto de perfiles de aluminio 2020.
3. Montaje del esqueleto dentro de la cubierta de MDF.
4. Instalación de la electrónica principal en la base.
5. Montaje del módulo de ojos y párpados.
6. Montaje del mecanismo de cejas.
7. Colocación de la carcasa con la mandíbula integrada.
8. Pegado de detalles externos y cierre posterior.

#### **7.4.2. Ensamblaje de la base y estructura 2020**

En esta etapa, se pasó de tener piezas sueltas a un conjunto estructural capaz de soportar el peso del rostro y de la electrónica. Primero se ensambló la “H” con las escuadras impresas en 3D y, después, se colocaron los paneles de MDF y la tapa superior, cuidando que el perfil vertical quedara centrado y alineado con el recorte de la cubierta.

#### **Montaje de la estructura en “H”**

Para formar la estructura interna, se trabajó primero con los cuatro perfiles 2020 ya cortados y perfilados. Se colocaron los dos tramos longitudinales de 35 cm paralelos entre sí y el tramo central de 25 cm en posición transversal, de modo que al unirlos se obtuviera la forma de “H” definida en el capítulo de diseño.

La unión entre estos perfiles se hizo con las escuadras tipo “L” impresas en 3D. En el montaje final de la base, se usaron dos escuadras impresas a cada lado de los tramos longitudinales de la “H” para unirlos con el perfil central de 25 cm, lo que dio rigidez al conjunto y ayudó a mantener las esquinas a 90 grados. Cada escuadra se fijó con tornillos M4 de 10 mm y tuercas tipo T-nut insertadas en las ranuras de los perfiles.

Una vez cerrada la “H” se añadió el perfil vertical de 40 cm que más adelante sostendría el rostro. Este perfil se atornilló al tramo central utilizando escuadras impresas adicionales, también con tornillos M4 y tuercas, de modo que quedara perpendicular al plano de la base. En esta etapa se verificó que el perfil vertical quedara aproximadamente centrado y con la menor inclinación posible, ya que de esa alineación depende que el rostro se vea recto una vez montado.

### **Colocación de paneles de MDF y tapa superior**

Con la estructura en “H” armada se integró dentro de la base de MDF. Primero se colocó la placa inferior de MDF y encima se posicionó la “H”, alineando el perfil central con los recortes previstos en los planos, además los perfiles se atornillaron desde la parte inferior de la base.

A continuación se fueron montando las paredes laterales y los paneles restantes de MDF, usando el sistema de pestañas y ranuras para que las piezas se alinearan casi de forma automática, siempre verificando que quedara espacio suficiente para la fuente de poder, la PCB y el resto de la electrónica, además, se aplicó goma blanca las paredes de la base, de modo que la estructura quedara firmemente sujeta y no pudiera ceder ante algún movimiento inesperado. Por último se colocó la tapa superior, comprobando que el recorte central coincidiera con el perfil vertical de 40 cm.

### **7.4.3. Montaje del mecanismo de ojos y cejas**

El primer conjunto que se montó fue el mecanismo de ojos y párpados, ya que sirve como referencia para la posición del resto de componentes del rostro. Antes de fijarlo al perfil vertical se completó el armado del mecanismo sobre su propia placa de MDF.

Primero se atornillaron las bases de los servomotores a la placa de MDF, usando los agujeros previstos en el diseño para que cada caja de servo quedara en su posición. Luego se armó cada juego de párpados por separado, uniendo el párpado superior e inferior por el lado externo del ojo con un tornillo M2 que funciona como eje local de giro y se ensambló en cada uno el mecanismo de pestañeo con sus eslabones correspondientes. Cuando ambos juegos de párpados estuvieron listos, se usó un tornillo pasante de 50 mm a través de las orejas frontales y de las extensiones de los párpados, de modo que el mismo tornillo trabajara como eje común para los dos lados y para el soporte de los servomotores de los ojos.

Después se colocaron los servomotores en sus alojamientos, cuidando que el *horn* de cada uno quedara orientado de forma que el recorrido útil coincidiera con el movimiento esperado de párpados y globos oculares. Por último se encajó cada aro de *LEDs* NeoPixel dentro del globo ocular correspondiente y se montó cada ojo sobre el eje de su servomotor, dejando los *horns* listos para atornillar y ajustar.

### **Fijación del mecanismo al perfil vertical**

Con el mecanismo ya armado sobre la placa de MDF se procedió a fijarlo al perfil de aluminio 2020 vertical. La placa se colocó de forma que la ranura central abrazara el perfil y quedara apoyada sobre la parte frontal de la estructura. Desde la parte superior se utilizaron tornillos que roscan en la placa de soporte para tuercas descrita en el capítulo de diseño, de manera que las tuercas quedaran atrapadas y no fuera necesario sujetarlas manualmente durante el apriete.

Además se colocaron tres escuadras impresas alrededor del perfil vertical para sostener el mecanismo de los ojos y párpados y asegurarse de que quedara firmemente unido al esqueleto de aluminio. Estas escuadras también se atornillan pasando los tornillos a través de la placa de MDF y roscando en la misma placa de soporte para tuercas que rodea el perfil 2020, de modo que las tuercas quedan encerradas en sus alojamientos y no hay que sujetarlas con la mano. Como refuerzo extra en la parte frontal se añadió una escuadra metálica comercial de las que se utilizan normalmente para sostener repisas, ya que el voladizo del mecanismo de los ojos tendía a inclinarse hacia adelante y una sola “L” impresa no era suficiente para contrarrestar ese efecto.

### **Alineación de los ojos y organización inicial de cables**

Una vez fijado el mecanismo al perfil vertical se realizó la alineación inicial de los ojos. Para ello se llevaron los servomotores a una posición neutra usando el controlador, de modo que los *horns* quedaran aproximadamente en el centro de su recorrido. Con los servos en esa posición se ajustó la orientación de cada globo ocular, girándolo hasta que mirara de frente y quedara centrado respecto a las aberturas de la carcasa. Solo entonces se apretaron los tornillos de los *horns* para fijar la referencia mecánica.

En esta misma etapa se organizó de forma preliminar el cableado del mecanismo. Los cables de los servomotores de ojos y párpados, así como los de los aros NeoPixel, se guiaron hacia abajo siguiendo el perfil 2020, sujetándolos con cinchos plásticos y dejando un pequeño margen de holgura. Con esto el mecanismo quedó listo para conectarse a la electrónica de la base sin que los cables estorbaran el movimiento de los párpados ni el giro de los ojos.

#### 7.4.4. Montaje del mecanismo de las cejas y mandíbula

En esta parte se resume cómo se fijaron las cejas sobre el perfil vertical y cómo se integró la mandíbula con la carcasa.

##### Montaje del mecanismo de las cejas

El soporte de las cejas se colocó sobre la cara frontal del perfil de aluminio 2020 y se fijó con un solo tornillo al centro y una tuerca tipo T-nut dentro de la ranura del perfil. Antes de apretar por completo se ajustó su altura para alinearlo con la futura frente de Jack.

Luego se montaron los servomotores MG90S en los alojamientos laterales del soporte y se guiaron sus cables hacia la parte trasera. Finalmente se enajaron las cejas impresas al *horn* de cada servo, dejando la posición neutra aproximadamente horizontal y a la misma altura en ambos lados, además se realizó una breve prueba de movimiento para verificar que el recorrido fuera libre y sin choques con la carcasa.

##### Montaje de la mandíbula

Para el montaje final la mandíbula ya estaba lijada, pintada y con las dos mitades unidas. El primer paso fue preparar el eje común de giro colocando sobre él los dos servomotores MG90S con sus *horns* en posición neutra.

Con los servos ya montados en el eje se llevaron al interior de la carcasa y se deslizaron en los alojamientos diseñados para ellos. Estos alojamientos tienen uno de sus lados abiertos, lo que permite entrar y sacar el conjunto eje-servos sin necesidad de desarmar otras partes y al mismo tiempo guían la posición para que el eje quede alineado con los orificios laterales de la mandíbula.

Finalmente se movió la mandíbula de forma manual y con pequeños barridos de los servos para comprobar que el recorrido de apertura y cierre fuera libre, sin roces con la carcasa ni con los dientes impresos.

#### 7.4.5. Montaje de la carcasa y detalles externos

##### Colocación de la carcasa sobre la estructura

Con el mecanismo de ojos, párpados y cejas ya montado sobre el perfil vertical, el siguiente paso fue colocar la carcasa del rostro. La carcasa principal (superior e inferior ya unidas) incluye en su parte trasera una ranura del tamaño del perfil 2020, con un tope interno y un pequeño resalte con agujero para tornillo. En la parte inferior

se diseñó otra ranura abierta que permite que el perfil de aluminio se deslice dentro de la pieza.

Para montar el conjunto se hizo deslizar la carcasa desde la parte superior del perfil hasta que la ranura inferior apoyó sobre la tapa de MDF de la base y el tope trasero hizo contacto con el perfil. Una vez en posición se colocó una tuerca tipo T-nut en la ranura del perfil y se atornilló desde arriba, de modo que la cabeza quedara escondida en el interior. Esta fijación, evitó que la carcasa pudiera girar o deslizarse hacia adelante durante el movimiento de la mandíbula.

Antes de cerrar la parte posterior se conectaron los servomotores de la mandíbula al mazo de cables que baja por el perfil vertical y se verificó que hubiera holgura suficiente para que el cableado no se tensara al abrir y cerrar la boca.

### **Montaje de detalles, cuernos, barba y bigotes**

Con la carcasa ya fijada al esqueleto se montaron los detalles externos del rostro. Los dientes formaban parte del mismo modelo de la carcasa y de la mandíbula, por lo que no fue necesario pegarlos por separado, únicamente verificar que no interfirieran con el recorrido de apertura y cierre.

Los cuernos, la barba y los bigotes sí se imprimieron como piezas independientes y se alinearon con las cavidades previstas en el modelo. Para fijarlos se utilizó *super glue* en combinación con la mezcla de agua y bicarbonato usada en otras uniones del proyecto, lo que permitió lograr un pegado rápido y rígido sobre las superficies curvas.

Finalmente se colocó la pieza trasera de la carcasa, que se atornilló siguiendo los agujeros del contorno y funcionó como tapa para ocultar los mecanismos internos y el cableado que recorre la parte posterior del rostro.

### **7.4.6. Verificación inicial con electrónica conectada**

Con la estructura armada y los mecanismos montados se realizó una verificación inicial con la electrónica ya conectada. El objetivo fue comprobar que todos los servomotores recibieran alimentación de forma correcta y que los rangos de movimiento diseñados se pudieran alcanzar sin choques ni esfuerzos excesivos, sin entrar todavía al detalle del circuito ni de la lógica de control.

### **Conexión básica de servomotores, PCA9685 y fuente**

La primera etapa consistió en hacer la conexión básica entre la fuente de 5 V/20 A, el módulo PCA9685 y los servomotores instalados en el rostro. La fuente se fijó en el interior de la base de MDF y se conectó al módulo de entrada de corriente con interruptor montado en la pared posterior. Desde la salida de 5 V de la fuente se llevó

alimentación al PCA9685 y a la PCB integradora, compartiendo la misma referencia de tierra para todos los servomotores.

Los cables de los servos de ojos, párpados, cejas y mandíbula se agruparon siguiendo el perfil vertical de aluminio 2020 y se conectaron a los canales correspondientes del PCA9685. Se cuidó que la orientación de cada conector coincidiera con la distribución de señal, positivo y tierra del módulo, para evitar inversiones accidentales. En la Figura 19 se observa el interior de la base con la electrónica instalada, la tapa de acrílico y el cableado etiquetado. Una vez hechas las conexiones se encendió la fuente y se verificó que el PCA9685 y los servomotores quedaran alimentados sin sobrecalentamientos ni ruidos anómalos.

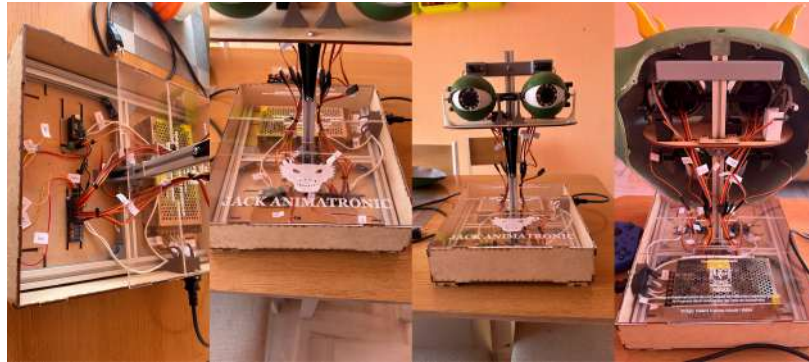
### **Pruebas de movimiento y corrección de roces**

Con la alimentación estable se hicieron pruebas sencillas de movimiento usando barridos lentos en cada grupo de servos. Primero se probaron los ojos y párpados por separado, luego las cejas y finalmente la mandíbula. En cada caso se llevaron los servomotores desde un extremo de su recorrido hasta el otro, observando si aparecían roces con la carcasa, entre piezas impresas o con los dientes.

Cuando se detectó algún contacto indeseado se hicieron ajustes pequeños, como aflojar ligeramente un tornillo, recolocar un *horn* un diente más arriba o más abajo. En paralelo se acotaron algunos rangos de giro desde el control, de manera que los servos no llegaran a los topes mecánicos de las piezas. Después de cada corrección se repitió la prueba hasta obtener movimientos continuos y sin trabas. En la Figura 19 también se muestra el animatrónico completo durante estas pruebas, con el módulo de ojos expuesto y luego con la carcasa montada sobre la estructura.

Al final de esta verificación inicial se confirmó que los ocho grados de libertad del rostro podían moverse de forma coordinada y que la base, los perfiles y la carcasa soportaban el funcionamiento, dejando listo el sistema para las pruebas de control más detalladas en el capítulo de electrónica.

**Figura 19.** Vista general del montaje final del animatrónico y de la organización de la electrónica



Nota. *Collage* fotográfico que muestra, de izquierda a derecha, el interior de la base con la electrónica y el cableado etiquetado, la estructura de perfiles 2020 dentro de la caja de MDF con tapa de acrílico, el módulo de ojos montado sobre el perfil vertical y la parte posterior del completo de Jack instalado sobre la base. Elaboración propia.

---

## Circuitería y componentes electrónicos

---

En este capítulo se describen los elementos electrónicos que permiten que el rostro de Jack cobre vida. Mientras que el capítulo anterior se centró en el diseño mecánico, fabricación y ensamblaje de la estructura, aquí el enfoque está en la circuitería interna, qué componentes se eligieron, cómo se alimentan, de qué manera se comunican entre sí y cómo se organizaron para que el sistema sea seguro, replicable y relativamente sencillo de mantener.

Primero se presentan los requerimientos generales del sistema de control y la arquitectura electrónica utilizada, seguida de la selección de componentes principales (servomotores, aros de *LED* NeoPixel, controlador PCA9685, ESP32 TinyS3, control inalámbrico, módulo de entrada IEC y calibres de cables). A continuación se muestra el circuito integrador montado en protoboard, junto con sus diagramas de bloque, cableado y esquemático. Finalmente se presenta el diseño del PCB integrador y los resultados de las pruebas de circuitería, pensado para ordenar las conexiones y reducir el desorden de cables dentro de la base del animatrónico.

### 8.1. Requerimientos y arquitectura del sistema de control

En esta sección se resumen los requerimientos generales que debe cumplir el sistema de control electrónico de Jack y se justifica la selección de los componentes principales. El diseño debía ser capaz de:

- Alimentar de forma segura a los **9 servomotores MG90S** que accionan ojos, párpados, cejas y mandíbula.

- Controlar **dos aros NeoPixel** que funcionan como iris iluminados, con colores y efectos programables.
- Centralizar el control en una sola placa con **capacidad de comunicación inalámbrica** para manejar a Jack con un control tipo videojuego.
- Mantener todo el sistema trabajando con una **única fuente de 5V y 20A** capaz de suministrar la corriente requerida por servos, NeoPixel y electrónica de control.
- Organizar el cableado de forma ordenada, reduciendo el riesgo de falsos contactos y facilitando el mantenimiento.

A partir de estos requerimientos se definió una arquitectura en la que el **ESP32 TinyS3** actúa como cerebro principal, comunicándose por I2C con el **PCA9685**, que distribuye las señales PWM a los servos. Los aros NeoPixel se conectan directamente al ESP32 mediante una línea de datos compartida y alimentación desde la misma fuente de 5 V. La energía llega al sistema a través de un módulo de entrada IEC con interruptor y fusible, que alimenta una fuente conmutada de 5 V–20 A. Los detalles de cada componente se describen a continuación.

### 8.1.1. Selección de componentes electrónicos

Antes de diseñar el circuito fue necesario seleccionar los componentes que lo integrarán. En términos generales, se eligieron los elementos clave como el controlador para servomotores, el cerebro controlador (placa base), los *LEDs* para simular el iris de los ojos y el sistema Bluetooth. Además, se describe cómo estos componentes interactúan entre sí para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema.

#### Servomotores MG90S

Los servomotores Tower Pro MG90S (Figura 26) son ampliamente utilizados en proyectos de robótica, automatización, modelismo y sistemas educativos debido a su tamaño compacto, facilidad de uso y capacidad para proporcionar movimientos precisos en rangos limitados. En proyectos de animatrónica como el de Jack, estos servos permiten accionar mecanismos complejos, como párpados, mandíbula y cejas, ofreciendo un control confiable del movimiento de cada componente.

Estos servomotores pueden ser controlados mediante diferentes *softwares* y lenguajes de programación, lo que los hace muy versátiles. En este proyecto se eligió la plataforma Arduino, la cual es totalmente compatible con los MG90S, permitiendo programar y sincronizar de manera sencilla los movimientos de los diferentes mecanismos del animatrónico.

## Aros NeoPixel de 12 *LEDs*

Los aros de *LEDs* NeoPixel de 12 *bits* se seleccionaron para simular los iris de los ojos de Jack, ya que ofrecen un control preciso del color y la luminosidad, lo cual es fundamental para lograr un efecto visual llamativo en un proyecto de animatrónica. Cada aro integra 12 *LEDs* direccionables basados en la familia WS2812, conectados internamente en serie (configuración tipo *daisy-chain*), de modo que todos comparten una única línea de datos, lo que simplifica el cableado y la conexión al sistema de control (para más información visitar [57]).

La principal ventaja de utilizar NeoPixel es su capacidad para generar una amplia gama de colores con alta calidad y precisión, lo que permite simular efectos como parpadeos, cambios de color o patrones en los iris, añadiendo mayor dinamismo a la animación. Los NeoPixel se controlan mediante un protocolo de comunicación digital y se integran fácilmente con microcontroladores como el ESP32 TinyS3 utilizando la librería `Adafruit_NeoPixel` para Arduino, disponible en el repositorio oficial de Adafruit en GitHub [58]. Los aros NeoPixel se alimentan directamente desde la placa PCB del circuito integrador, tomando los 5 V y GND del propio ESP32 TinyS3, de modo que comparten la misma referencia de tierra y se evita mezclar su alimentación con la línea que se destina a los servomotores.

## ESP32 TinyS3

El ESP32 TinyS3 es una placa controladora compacta basada en el microcontrolador ESP32-S3, con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada y pensada para proyectos que requieren buena capacidad de procesamiento en un formato reducido [59]. Su tamaño y consumo moderado la hacen adecuada para controlar sistemas como el rostro animatrónico de Jack, donde es necesario coordinar varios servomotores, aros NeoPixel y la comunicación inalámbrica con un control remoto.

Entre sus características principales se encuentran la compatibilidad con el bus I2C y la disponibilidad de múltiples pines de E/S digitales, lo que permite conectar dispositivos como el PCA9685, sensores adicionales o módulos de comunicación usando solo dos líneas de datos. Esto ayuda a mantener un cableado ordenado y a reducir la complejidad del circuito integrador.

En cuanto a la alimentación, el TinyS3 puede energizarse tanto por el conector USB-C como a través de sus pines de entrada de voltaje y tierra. En este proyecto se decidió utilizar su puerto de alimentación integrado desde la PCB (sin depender del USB-C), de modo que la placa se encienda automáticamente cuando se activa la fuente principal de 5 V, simplificando el encendido del sistema dentro de la base del animatrónico.

## Controlador PCA9685

El controlador PWM PCA9685 se utilizó como puente entre el ESP32 TinyS3 y los servomotores MG90S del rostro. En lugar de manejar cada servo directamente desde los pines del microcontrolador, el PCA9685 concentra el control de hasta 16 canales PWM mediante comunicación I2C, lo que permite que el TinyS3 se encargue de la lógica y la conexión inalámbrica, mientras la generación de las señales para los servos queda delegada a este módulo.

En el proyecto se conectaron nueve servomotores al PCA9685, para los ojos (tres servos, dos para el giro *yaw* y uno para el movimiento vertical), párpados (dos servos), cejas (dos servos) y mandíbula (dos servos). El uso de esta placa permitió dejar todos estos actuadores en un solo módulo, con una sola entrada de alimentación de potencia y un solo conector I2C hacia el ESP32 TinyS3, manteniendo el cableado más ordenado dentro de la base del animatrónico.

El PCA9685 se alimenta con dos líneas diferenciadas, una para la lógica y otra para la potencia de los servomotores. En este montaje, la alimentación de lógica ( $V_{CC}$ ) se toma del propio ESP32 TinyS3, compartiendo tierra para asegurar niveles compatibles en el bus I2C, mientras que la alimentación de potencia ( $V_+$ ) proviene de la fuente conmutada de 5 V y 20 A (Figura 10). Cada servomotor MG90S puede llegar a utilizar 0.3–0.4 A bajo carga, de modo que, incluso si varios servos se mueven al mismo tiempo, la corriente total se mantiene dentro de un margen seguro para la fuente, siempre y cuando el cableado hacia el PCA9685 tenga el calibre adecuado y las conexiones estén bien aseguradas.

Para la programación se empleó la librería `Adafruit_PWMServoDriver` para Arduino, disponible en el repositorio oficial de Adafruit en GitHub [60]. Esta librería simplifica la configuración de la frecuencia de trabajo (alrededor de 50 Hz para servomotores) y el ajuste del ciclo útil de cada canal, de modo que desde el código solo fue necesario asignar a cada canal del PCA9685 el servomotor correspondiente (ojos, párpados, cejas o mandíbula) y mapear los ángulos deseados a valores PWM. En la práctica, esto permitió coordinar todos los movimientos del rostro desde el TinyS3 sin saturar sus pines y manteniendo señales PWM estables aunque el microcontrolador estuviera manejando también la comunicación Bluetooth y otras tareas del sistema.

## Extensores para cables de servomotor

Para conectar los servomotores MG90S del rostro con el módulo PCA9685 ubicado en la base se utilizaron extensores para cables de servomotor, similares a los que se emplean en aeromodelismo y robótica. Estos extensores son cables de tres hilos con conectores hembra–macho de 3 pines, compatibles con los conectores estándar de los servos y con los pines del PCA9685, por lo que permiten “alargar” directamente cada canal sin necesidad de soldar ni modificar los cables originales de los servomotores.

Los extensores empleados equivalen a los cables comerciales de extensión para servos, que suelen estar contruidos con tres conductores calibre 22 AWG y conectores tipo JR/Futaba, diseñados para alargar las líneas de alimentación y señal de servomotores de radiocontrol [61]. Este tipo de cable mantiene la codificación de colores habitual, como negro o café para tierra (GND), rojo para alimentación del servo ( $V_{\text{servo}}$ ) y naranja o amarillo para la señal de control, lo que ayuda a evitar errores de conexión durante el montaje.

En el proyecto, estos extensores permitieron llevar los cables desde los servomotores ubicados en los mecanismos del rostro hasta el interior de la base, donde está el PCA9685. Esto facilita el mantenimiento del sistema, si es necesario desmontar la cabeza o reemplazar un servo, basta con desconectar el extensor correspondiente sin alterar el cableado principal del circuito integrador.

### **Control inalámbrico**

Para el control inalámbrico de Jack, se utilizó un control de xbox con tecnología Bluetooth Low Energy (BLE). En el marco teórico, se describió con más detalle el funcionamiento del protocolo BLE y su uso en dispositivos tipo *gamepad*, por lo que en esta sección solo se resume su aplicación práctica dentro del proyecto.

El control se enlazó directamente con el ESP32 TinyS3, que actúa como dispositivo central y se encarga de leer los ejes y botones del mando. Para ello, se empleó la librería *Bluepad32*, que implementa un *host* bluetooth para controladores HID y ofrece ejemplos específicos para placas basadas en ESP32 [62]. A partir de esta librería se asignaron los dos *joystick* y la mayoría de botones a diferentes funciones, control de servomotores del rostro, activación de efectos y pequeños ajustes en tiempo real durante las pruebas, manteniendo así una interacción fluida y sin cables con el animatrónico.

### **Interruptor con entrada IEC y fusible (10 A)**

Para la alimentación del sistema, se utilizó un módulo con entrada IEC C14, interruptor y fusible integrado de 10A (Figura ??). Este componente permitió conectar un cable de corriente estándar sin necesidad de manipular directamente los 110V del tomacorriente. El interruptor facilitó encender o apagar el sistema de manera segura, incluso cuando el cable permanecía conectado, y el fusible actuó como protección; si ocurría una sobrecorriente, se quemaba primero evitando daños en la fuente de poder y el cableado.

## Calibre de cables

Para el cableado del sistema, se utilizaron diferentes calibres de cable según la corriente que debía soportar cada sección, siguiendo los estándares eléctricos utilizados en Guatemala. En la conexión de **110V**, desde el interruptor hasta la fuente de poder, se empleó cable calibre 14, que soportaba hasta unos 15A, suficiente para esta etapa, ya que la fuente utilizada trabajaba con un máximo de 10A en la entrada.

De la fuente hacia el controlador **PCA9685**, encargado de los servomotores, se utilizó cable calibre 18, con capacidad aproximada de 7A. Cada servomotor MG90S consumía alrededor de 0.3–0.4A en carga, por lo que al trabajar simultáneamente nueve servos el consumo máximo se estimaba cercano a 3.5A, dentro del rango seguro para este calibre. Para alimentar al **ESP32 TinyS3** desde la fuente se empleó cable calibre 20, que soportaba hasta 3.5A. El consumo real del microcontrolador era muy bajo (alrededor de 0.5A incluyendo periféricos), por lo que este calibre resultaba más que suficiente.

Finalmente, las conexiones de señales de control y bajo voltaje entre circuitos se realizaron con cables tipo *jumpers*, adecuados para corrientes pequeñas (menores a 0.5A), como las que demandaban las líneas de datos y comunicación I2C. Adicionalmente, es importante mencionar que se utilizó un código de colores en el cableado para mejorar la organización y reducir riesgos durante la instalación o en futuros mantenimientos, siguiendo la normativa común en Guatemala: cable negro para línea (fase), blanco para neutro, y verde para tierra.

## 8.2. Circuito integrador en protoboard

Antes de diseñar la placa PCB definitiva se implementó un primer circuito integrador sobre una placa de pruebas (*protoboard*). Esto permitió verificar en la práctica que todos los componentes podían funcionar juntos, comprobar el orden de conexiones, detectar errores de cableado y medir, de forma aproximada, el consumo del sistema bajo diferentes condiciones de carga.

En esta sección se presentan los diagramas generales del circuito (bloques y cableado), el esquemático y la forma en que se montó físicamente sobre el protoboard.

### 8.2.1. Diagramas del circuito integrador

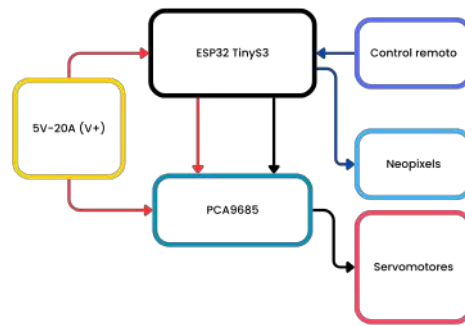
El circuito inicial, que servirá para controlar los mecanismos internos del rostro animatrónico de Jack, se montó primero en un protoboard para realizar pruebas de funcionamiento de todo el sistema. Este enfoque permite verificar la interacción entre los diferentes componentes antes de realizar el ensamblaje final. A continuación se detallan algunos diagramas que ilustran cómo está conectado el sistema completo, brindando una visión clara de la distribución de los componentes y las conexiones

necesarias para garantizar el funcionamiento adecuado de los servomotores, *LEDs* y actuadores.

### Diagrama de bloques

El diagrama de bloques del sistema se presenta en la Figura 20. En este caso se puede ver que la **fuentes de alimentación de 5 V–20 A** es la encargada de dar energía a todos los módulos. El **ESP32 TinyS3** funciona como el cerebro principal del sistema, recibiendo las órdenes del **control remoto inalámbrico**. A su vez, el ESP32 se comunica con la placa **PCA9685**, que se encarga de manejar directamente los **servomotores** y los **anillos de LED NeoPixel**.

**Figura 20.** Diagrama de bloques del sistema de control del rostro animatrónico.



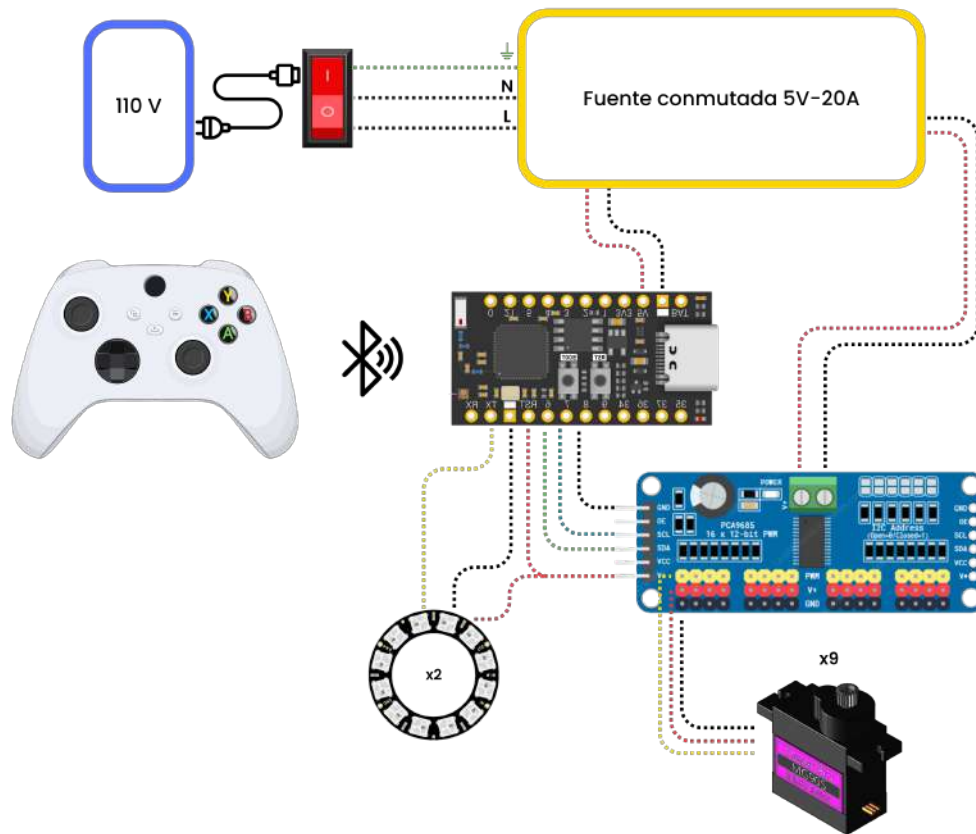
Nota. Diagrama de bloques (elaboración propia) que muestra el flujo de alimentación y señales entre los componentes del rostro animatrónico.

### Diagrama de cableado

En la Figura 21 se muestra el diagrama de cableado del sistema. A diferencia del diagrama de bloques, aquí se representan las conexiones físicas reales entre los componentes, incluyendo alimentación y señales de control. Puede observarse cómo el cable de 110 V del tomacorriente llega al módulo de interruptor con fusible y, a partir de allí, se separa en las tres líneas principales: **línea (L)**, **neutro (N)** y **tierra (PE)**, que se conectan a la fuente conmutada. Desde esta fuente, la salida ya se encuentra regulada a **5 V** y es la que alimenta directamente al ESP32 TinyS3 y al controlador PCA9685.

Es importante notar que el **PCA9685**, además de recibir alimentación desde la fuente, también requiere la referencia de voltaje del ESP32 TinyS3 para su correcto funcionamiento, lo cual se representa en las conexiones del diagrama. Este tipo de esquema es especialmente útil porque refleja cómo debe ensamblarse el sistema en la práctica, reduciendo errores durante el montaje y garantizando que todos los componentes reciban la alimentación adecuada.

**Figura 21.** Diagrama de cableado del sistema de control del rostro animatrónico.



Nota. Diagrama de cableado (elaboración propia) del sistema de control.

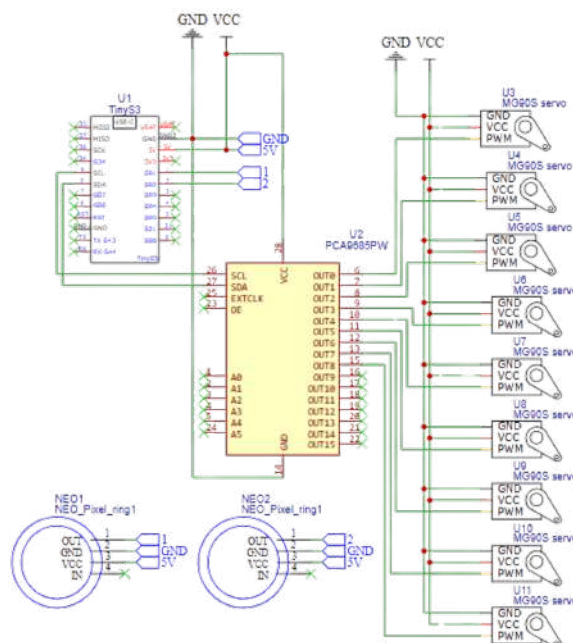
### 8.2.2. Esquemático del circuito integrador

En la Figura 22 se presenta el esquemático del sistema de control del rostro animatrónico. En él se observa el **ESP32 TinyS3** como unidad central de control, encargado de la comunicación con el **módulo PCA9685**, que distribuye las señales PWM hacia los servomotores MG90S.

En total se conectaron nueve servomotores, cada uno con su respectiva entrada de alimentación (VCC y GND) y su línea de señal de control (PWM). Además, se incluyen dos arcos de **LED NeoPixel**, conectados directamente al TinyS3 mediante sus líneas de datos, alimentación y tierra.

A pesar de la cantidad de componentes, el circuito es relativamente sencillo, ya que todos los elementos se organizan de forma clara y se interconectan principalmente mediante la comunicación I2C y las salidas PWM.

**Figura 22.** Esquemático del sistema de control del rostro animatrónico.



Nota. Representación de las conexiones principales de alimentación, control y datos, elaboración propia.

### 8.2.3. Implementación del circuito integrador en placa de pruebas

Una vez definidos el diagrama de bloques, el cableado y el esquemático, el siguiente paso fue montar el circuito integrador sobre una placa de pruebas. En esta etapa se conectaron físicamente la fuente de 5 V, el módulo de entrada IEC con interruptor y fusible, el ESP32 TinyS3, el PCA9685, los servomotores y los aros NeoPixel, siguiendo el orden mostrado en los diagramas anteriores.

Primero se conectó la salida de 5 V de la fuente a dos rieles principales del protoboard, reservando uno para la alimentación del ESP32 y el PCA9685 y otro para la distribución hacia los servomotores. En esta primera versión de pruebas los aros NeoPixel también se alimentaron desde el riel principal de 5 V; más adelante, en el diseño del PCB, su alimentación se tomó directamente del pin de 5 V del TinyS3 para simplificar el cableado alrededor de los ojos. En paralelo se unieron todas las líneas de tierra (GND) para asegurar una referencia común entre los distintos módulos.

Con el circuito ya armado en la placa de pruebas se realizaron ensayos básicos de funcionamiento, se encendió la fuente, se verificó que el ESP32 iniciara correctamente, que el PCA9685 fuera reconocido por comunicación I2C y que los servomotores respondieran a órdenes simples de movimiento. De igual forma se probaron los aros NeoPixel con patrones sencillos de encendido y cambio de color. Estas pruebas permitieron identificar y corregir pequeños errores de cableado (como conectores invertidos

o tierras sin unir) antes de pasar al diseño definitivo de la PCB.

### 8.3. Diseño del PCB del circuito integrador

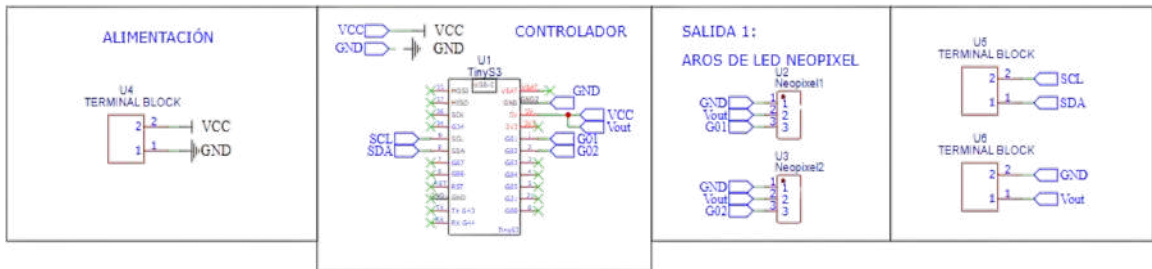
Una vez realizadas las pruebas físicas del circuito en protoboard con resultados satisfactorios, se procedió al diseño del **circuito impreso (PCB)** que serviría como base para el proyecto. El objetivo de este PCB no es reemplazar las placas ya existentes como el **ESP32 TinyS3** o el **PCA9685**, sino integrarlas en una sola tarjeta que facilite las conexiones y elimine la necesidad de un cableado desordenado.

Para el ESP32 TinyS3 se diseñó un espacio tipo “camita”, donde la placa puede ensamblarse directamente sobre el PCB, permitiendo un montaje más limpio y seguro. De igual forma, se incluyeron *terminal blocks* que permiten extraer de manera ordenada las señales necesarias hacia el PCA9685, así como un bloque de entrada exclusivo para la alimentación del ESP32. Finalmente, el PCB incorpora dos grupos de **pines macho de 3 vías** que permiten conectar de forma directa los aros de LED NeoPixel.

#### 8.3.1. Esquemático de la placa PCB

En la Figura 23 se muestra el esquemático de la placa PCB diseñada para el proyecto. En él se representan los componentes descritos anteriormente, organizados de manera que permitan la integración del ESP32 TinyS3, el PCA9685, los *terminal blocks* y los pines para los aros de LED NeoPixel. Este esquemático sirve como base para la fabricación del circuito impreso.

**Figura 23.** Esquemático de la placa PCB del circuito integrador.



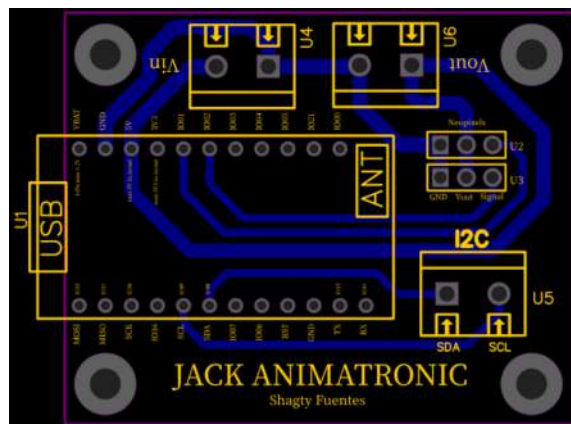
Nota. Vista esquemática de las secciones de alimentación, control y salidas de la PCB integradora, elaboración propia.

### 8.3.2. Diagrama de organización de componentes y ruteo

En la Figura 24 se presenta el diseño final del PCB con la distribución de los componentes y el ruteo de las pistas. Se puede observar la ubicación del **ESP32 TinyS3** en el centro de la placa, pensado como el módulo principal sobre el cual se organizan los demás elementos. En la parte superior se colocaron los **terminal blocks** de entrada y salida, destinados a la alimentación y a las conexiones externas, mientras que en un costado se dispusieron los pines para los **aros de LED NeoPixel**. En la parte inferior derecha se encuentran los conectores dedicados a la comunicación **I2C**, necesarios para enlazar el módulo PCA9685 con el microcontrolador.

El ruteo de las pistas se realizó procurando trayectos cortos y ordenados, con el fin de minimizar interferencias y asegurar una correcta distribución de energía y señales. De esta manera, el PCB no solo cumple la función de integrar los diferentes módulos del sistema, sino que también facilita el montaje y reduce el uso de cables adicionales, generando un ensamble más limpio y confiable.

**Figura 24.** Organización de componentes y ruteo del PCB.



Nota. Vista superior de la placa integradora con el ruteo de pistas y conectores, elaboración propia.

### 8.3.3. Resultados de la implementación de la circuitería y pruebas

La implementación del circuito integrador fue esencial para mantener un orden adecuado en el cableado dentro del espacio destinado a la circuitería. La placa de circuito impreso (PCB) funcionó correctamente durante las pruebas iniciales, lo que permitió que todos los componentes conectados, como el ESP32 TinyS3, el PCA9685 y los servomotores, trabajaran de manera adecuada. En la Figura 37 se observa el PCB fabricado, desde la placa recién grabada hasta la tarjeta ya poblada y conectada dentro del sistema.

Durante las pruebas se verificó que la distribución de los componentes en el PCB era eficiente y que el ruteo de las pistas facilitó el montaje y redujo el uso de cables. Sin

embargo, se presentaron algunos problemas en el empalmado de cables para la fuente de alimentación, ya que los cables de mayor grosor generaron dificultades al momento de conectarlos. Para evitar posibles cortocircuitos fue necesario tener especial cuidado al hacer los empalmes y aplicar aislante a cada uno para garantizar la seguridad del sistema. A pesar de estos pequeños inconvenientes, el sistema de alimentación funcionó correctamente y no se presentaron más problemas durante las pruebas.

## 8.4. Programación y control del rostro animatrónico

Con la circuitería definida y la placa PCB terminada, el último paso fue programar el ESP32 TinyS3 para coordinar los movimientos del rostro y la iluminación de los ojos de Jack. La lógica de control se implementó utilizando la librería `Bluepad32` para comunicarse con el control de Xbox mediante Bluetooth Low Energy [62], la librería `Adafruit_PWMServoDriver` para manejar el módulo PCA9685 [60] y `Adafruit_NeoPixel` para los aros de *LEDs* [58]. Sobre estas bases se construyó un sistema de control por modos que permite tanto el manejo manual del rostro como animaciones automáticas. El código fuente completo del sistema de control se encuentra disponible en un repositorio público en línea [63]. Durante el desarrollo del programa se utilizó también la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT como apoyo para depurar código, proponer estructuras de funciones y reformular algunos fragmentos de lógica de control, manteniendo siempre la revisión y validación manual del comportamiento del sistema [1].

### 8.4.1. Arquitectura del programa y librerías utilizadas

El programa sigue la estructura típica de un proyecto basado en Arduino, una función `setup()` donde se inicializan periféricos y librerías, además de una función `loop()` que se ejecuta de forma continua.

En la etapa de inicialización se realizan las siguientes acciones:

- Configuración de los dos aros NeoPixel (12 *LEDs* cada uno) en los pines 1 y 2 del TinyS3, fijando un brillo medio y apagando los ojos al inicio. El control de estos aros se realiza con la librería `Adafruit_NeoPixel` [58].
- Inicialización del bus I2C y del módulo PCA9685 a 50 Hz, frecuencia típica para servomotores. La librería `Adafruit_PWMServoDriver` se encarga de traducir ángulos a pulsos en microsegundos por canal [60].
- Configuración de `Bluepad32` como *host* Bluetooth para el control de Xbox. Cuando el mando se conecta, se guarda un puntero al controlador y se lleva el rostro a una posición neutra (ojos al centro, párpados en posición media, cejas centradas y mandíbula cerrada) [62].

Además, en el código se define un conjunto de constantes de ángulo para cada mecanismo o movimiento (centro, máximos y mínimos), así como ganancias y *offsets* para calibrar los ojos. Estas constantes se usaron para limitar desde *software* los rangos de movimiento reales que se observaron durante las pruebas mecánicas, de modo que ningún servomotor intente sobrepasar sus topes físicos.

#### 8.4.2. Modos de operación y mapeo del control

La lógica del programa se organiza alrededor de cuatro modos principales:

- **Modo NORMAL** (*modo de control manual*).
- **Modo ENOJO** (expresión fija intimidante).
- **Modo AUTO** (animación automática de “habla” y expresiones).
- **Modo COLOR** (selección interactiva del color de los ojos).

El cambio entre modos se hace con los botones frontales del control de Xbox:

- Botón **B**: activa el **Modo AUTO**.
- Botón **X**: activa el **Modo ENOJO** manual.
- Botón **Y**: regresa al **Modo NORMAL**.
- Botón **A**: entra al **Modo COLOR**.

En el **Modo NORMAL** el control funciona como un “*joystick* de marioneta”:

- El **stick izquierdo** mueve la mirada: eje *X* controla el giro horizontal de los ojos (derecha–izquierda) y el eje *Y* el movimiento vertical compartido.
- Los **gatillos L2 y R2** cierran cada párpado por separado (derecho e izquierdo).
- El **stick derecho** controla la expresión de las cejas en forma de “espejo”: al moverlo, una ceja sube y la otra baja. Los botones **L1** y **R1** tienen prioridad y permiten subir rápidamente la ceja izquierda o derecha, individualmente.
- La **cruceta hacia abajo** abre la mandíbula de forma suave hasta una apertura moderada mientras se mantiene presionada y la cierra al soltarla.
- El botón **Share** puede usarse como un “reset rápido” de luz, volviendo los ojos a un tono cian base.

En el **Modo ENOJO** se fija una expresión más agresiva, los ojos se iluminan en rojo, las cejas adoptan una forma en “^” (ambas hacia abajo al centro) y los párpados quedan ligeramente entrecerrados. En este modo únicamente se permite mover los ojos manualmente con el stick izquierdo, lo que da un efecto de mirada inquieta sin cambiar el gesto general.

El **Modo COLOR** se utiliza exclusivamente para elegir el color base de los aros NeoPixel. En este modo:

- Cada botón (A, B, X, L1, R1, L2, R2) asigna directamente un color predefinido (cian, rojo, verde, blanco, amarillo, rosa, naranja, azul y un tono café miel).
- La cruceta izquierda y derecha recorre un carrusel de colores almacenado en un arreglo, permitiendo probar rápidamente diferentes tonos.
- El color seleccionado se guarda en la variable global `currentEyeColor` y se conserva al regresar a Modo NORMAL con el botón Y.

Finalmente, el **Modo AUTO** combina varias capas de animación para simular que Jack “cobra vida” sin necesidad de mover el control. Este modo se describe con más detalle en la siguiente subsección.

### 8.4.3. Generación de movimientos suaves y animación automática

Para que los movimientos del rostro se sientan más naturales y no robóticos, el código implementa varias técnicas de suavizado y animación:

#### Suavizado de mirada y límites de movimiento

Las lecturas de los *joystick* se procesan primero aplicando una zona muerta (*dead-zone*) alrededor del cero. El mando entrega valores entre  $-512$  y  $+512$  para cada eje, pero cualquier lectura entre  $-70$  y  $+70$  se fuerza a cero. En otras palabras, si el *joystick* está casi al centro, el sistema lo toma como completamente quieto. Esto evita que pequeños ruidos eléctricos o movimientos mínimos de la mano hagan que los ojos estén vibrando todo el tiempo. A partir de ese umbral, los valores se vuelven a estirar de forma lineal para seguir aprovechando casi todo el recorrido útil original  $[-512, 512]$ .

Luego, ese valor se normaliza a un rango entre  $-1$  y  $1$  y se pasa por una función cúbica del tipo siguiente:

$$f(x) = x^3.$$

La idea era hacer el movimiento muy suave cerca del centro y más “rápido” hacia los extremos. Por ejemplo, si el *joystick* está en  $x = 0.2$ , al aplicar la función se obtiene  $0.2^3 = 0.008$ . Es decir, un movimiento pequeño del *joystick* produce un cambio todavía

más pequeño en la mirada. En cambio, si el *joystick* se acerca a los extremos ( $x \approx \pm 1$ ), el resultado se mantuvo cercano a  $\pm 1$ , lo que permite llegar igual a los límites de giro del ojo. Después de esta transformación, el valor se convierte a un ángulo de servo, por ejemplo entre  $45^\circ$  y  $125^\circ$  para el movimiento horizontal y entre  $45^\circ$  y  $135^\circ$  para el movimiento vertical.

En lugar de enviar de golpe este ángulo esperado al servomotor, se usó un suavizado tipo promedio móvil exponencial (EMA). En la práctica es una fórmula que mueve al ojo poco a poco hacia el ángulo deseado:

$$\theta_{\text{nuevo}} = \theta_{\text{actual}} + \alpha (\theta_{\text{objetivo}} - \theta_{\text{actual}}),$$

$\alpha = 0.14$  actúa como “qué tanto se mueve” en cada paso. Con un tiempo de actualización de unos 15 ms por ciclo, el ojo avanza aproximadamente un 14 % de la distancia pendiente cada vez y tarda de 150 a 250 ms (una fracción de segundo) en acomodarse visualmente a una nueva dirección. Esto hace que el movimiento se vea fluido y no a “saltos”. Este mismo procedimiento se aplicó tanto al eje horizontal como al vertical, guardando los valores en variables de punto flotante para no perder precisión.

Sobre estos valores ya suavizados se aplicaron pequeños ajustes de escala y desplazamiento (*offsets*) distintos para el ojo derecho y el izquierdo. Con esto se corrigieron diferencias mecánicas entre ambos mecanismos y se alineó el movimiento vertical con el soporte común. Finalmente, los ángulos calculados se recortaron usando mínimos y máximos definidos para cada servo, por ejemplo, `RIGHT_MIN_X`, `RIGHT_MAX_X`, `VERT_MIN_Y` y `VERT_MAX_Y`. Estos límites se obtuvieron durante las pruebas físicas y aseguraron que, aunque el *joystick* se llevara al máximo, los servomotores no intentaran sobrepasar los topes mecánicos.

## Animación automática en Modo AUTO

En el Modo AUTO, Jack se mueve solo a partir de varias capas sencillas que se actualizan en la función `autoTick()`, la cual se ejecuta todo el tiempo mientras está activo:

- **Habla:** se genera un valor que sube y baja entre 0 y 1 y se usa como “fuerza de voz”. Cuando este valor es alto, la mandíbula se abre más y los ojos bajan un poco, como si Jack estuviera hablando y asintiendo.
- **Mirada:** cada cierto tiempo (entre 0.8 y 1.8 s) se elige una nueva dirección de mirada dentro de un rango seguro y encima se añaden pequeños movimientos rápidos para que los ojos no se queden totalmente quietos.
- **Parpadeo:** los párpados se cierran y abren solos con intervalos al azar entre 1.5 y 5 s. El cierre es rápido y la apertura un poco más lenta, lo que se ve como un pestañeo natural. Si la “voz” es más intensa, los párpados se entrecierran un poco más.

- **Efecto diabólico:** cada 12–24 s se activa un pequeño “golpe” de animación donde los ojos pasan de cian a rojo, las cejas se ponen en gesto de enojo y los párpados se cierran más. Todo se controla con una variable `devilMix` que va suavemente de 0 a 1 y luego vuelve a 0.

Al combinar estas capas, Jack mueve la mirada, pestañea, abre y cierra la boca como si hablara y, de vez en cuando, adopta una expresión más intensa y “diabólica”.

#### 8.4.4. Gestión de iluminación y seguridad en el código

La iluminación de los ojos se controla siempre a través de una función auxiliar que escribe el mismo color en los dos aros NeoPixel y actualiza su estado. Para ciertos efectos, como el “respirar” de la luz en Modo AUTO, se escala el color base mediante un factor entre 0 y 1, calculando nuevos valores de RGB antes de enviarlos a los aros.

En cuanto a seguridad, el programa incorpora varias medidas sencillas pero efectivas:

- Se definen **rangos de ángulos seguros** para cada servomotor y todos los cálculos pasan por funciones de recorte (*clamping*) antes de enviarse al PCA9685.
- La función que mueve la mandíbula de forma suave (`moverMandibulaSuave`) recorre los ángulos paso a paso, evitando golpes bruscos que puedan forzar el mecanismo.
- Los servos de mandíbula se controlan siempre en pares opuestos, aprovechando que comparten el mismo eje para repartir el esfuerzo y mantener el torque dentro del rango seguro definido en el capítulo de diseño mecánico.
- Al desconectar el control inalámbrico se apagan los NeoPixel y no se aceptan nuevas órdenes de movimiento, evitando que el sistema quede en un estado indefinido.

Gracias a esta estructura por modos, al suavizado de movimientos y a las capas de animación automática, el código del TinyS3 permite que el rostro de Jack se controle en tiempo real con un mando de videojuego, pero también que pueda “actuar solo” con expresiones creíbles, manteniendo al mismo tiempo el sistema dentro de límites seguros para los componentes mecánicos y electrónicos.

Además del código fuente, el funcionamiento del rostro animatrónico se documentó en dos videos públicos. En un primer video se muestra a Jack en acción con una vista más cinematográfica, donde se aprecian las animaciones de mirada, parpadeo, mandíbula y cambios de color en los ojos [64]. En un segundo video se presenta una explicación más amplia del proyecto, donde se comentan aspectos del diseño y del sistema de control mientras se muestran algunas tomas del prototipo en funcionamiento [65].

- La cabeza animatrónica logró integrarse de forma funcional, combinando el modelado CAD, la fabricación digital (impresión 3D y corte láser) y la circuitería diseñada en la PCB. Durante las pruebas de movimiento completo, la estructura se mantuvo estable sin holguras críticas, lo que indica que los espesores de pared, uniones atornilladas y soportes internos fueron adecuados para soportar el peso de los mecanismos y la carcasa.
- El sistema de control basado en el ESP32 TinyS3 y el módulo PCA9685 resultó adecuado para manejar de forma simultánea los nueve servomotores del rostro. En las pruebas de secuencias de animación y de control manual no se observaron pérdidas de señal ni “saltos” bruscos entre posiciones, y los movimientos de ojos, párpados, cejas y mandíbula se mantuvieron sincronizados dentro de los rangos de trabajo definidos por el software.
- El mecanismo de la mandíbula cumplió con el movimiento de apertura y cierre, pero evidenció una de las principales limitaciones del diseño. Al trabajar con dos servomotores MG90S opuestos y con una palanca relativamente larga, el sistema funciona cerca del límite de torque en aperturas grandes. Esto se traduce en un movimiento más lento y la necesidad de limitar, desde el código, tanto la velocidad como el ángulo máximo de apertura para evitar esfuerzos excesivos y vibraciones, por lo que no se alcanzó el rango de movimiento planteado en el diseño conceptual.
- Las pruebas físicas mostraron que la estructura en perfiles de aluminio 2020 y el cobertor de MDF proporcionan rigidez suficiente para sostener los mecanismos internos sin deformaciones visibles, pero también que el espacio disponible dentro de la base es reducido. El empalme de cables de mayor calibre para la fuente de 5 V/20 A requirió cuidados adicionales en el orden y aislamiento de las conexiones, lo que evidencia que, para una siguiente versión, sería conveniente rediseñar el trayecto de alimentación o utilizar conectores más compactos para simplificar el montaje.

- La combinación de grados de libertad definida (ojos con dos ejes, párpados independientes, cejas en espejo y mandíbula) permitió generar expresiones faciales que observadores externos reconocieron como gestos de sorpresa, enojo o neutralidad durante las demostraciones internas. Esto confirma que no es necesario un número muy alto de articulaciones ni un acabado hiperrealista para transmitir emociones básicas de forma clara.
- En conjunto, los resultados indican que la metodología iterativa de diseño —prototipos impresos en 3D, ajustes mecánicos, pruebas de movimiento y refinamiento del código de control— fue efectiva para llegar a un prototipo animatrónico que equilibra expresividad, robustez mecánica y viabilidad de manufactura dentro de los recursos disponibles en la Universidad del Valle de Guatemala.

- Mejorar el mecanismo de mandíbula. Las pruebas mostraron que, con la masa actual de la mandíbula y la longitud del brazo de palanca, los servomotores MG90S trabajan cerca de su límite de torque y el movimiento pierde fuerza en ciertas posiciones. Para una siguiente iteración, se recomienda rediseñar la mandíbula reduciendo el espesor y el peso de las paredes, o bien sustituir los MG90S por servomotores de mayor torque y revisar la relación de palancas. Con esto, se podría lograr una apertura más amplia y un cierre más consistente, sin forzar tanto los actuadores.
- Extender el sistema hacia un cuerpo completo. El prototipo actual se limita a la cabeza, pero la arquitectura mecánica y electrónica desarrollada (ESP32 + PCA9685 + servomotores) permite añadir nuevos grados de libertad en cuello, torso y extremidades. Como trabajo futuro, se recomienda diseñar un esqueleto modular donde la cabeza pueda atornillarse e ir incorporando movimientos básicos de giro de torso y brazos, utilizando la misma lógica de control implementada en este proyecto.
- Agregar capacidades de interacción “inteligente”. En la versión actual, Jack se controla mediante un mando de Xbox y sigue animaciones preprogramadas. Para futuros desarrollos se propone integrar reconocimiento de voz, síntesis de habla y un módulo de diálogo basado en modelos de lenguaje, de manera que el animatrónico pueda responder preguntas sencillas, activar expresiones específicas según palabras clave y participar en dinámicas con estudiantes en tiempo real.
- Experimentar con nuevos materiales y acabados para el rostro. La carcasa de MDF e impresión 3D cumple con el objetivo académico, pero ofrece un acabado visual limitado. Como línea de trabajo futuro, se recomienda explorar recubrimientos con espumas flexibles, siliconas o textiles, así como técnicas de pintura y maquillaje que permitan acercarse a una estética más realista, similar a la de animatrónicos comerciales, manteniendo la estructura actual como soporte interno.

- Incorporar más sensores para enriquecer la interacción. Actualmente, el sistema solo recibe órdenes desde el control inalámbrico. Se sugiere añadir sensores de distancia, micrófonos direccionales o cámaras simples para que Jack pueda detectar la presencia y posición de las personas, por ejemplo, girar la mirada cuando alguien se acerca o cambiar de expresión cuando detecta voz en el entorno. Además, podría integrarse un sensor de presencia dedicado (por ejemplo, un detector infrarrojo pasivo o similar) para que el animatrónico permanezca en un estado de reposo de bajo consumo y encienda iluminación, servomotores y animaciones cuando detecte que hay alguien frente a él.

- 
- [1] OpenAI. «ChatGPT.» [Modelo de lenguaje de gran tamaño]. dirección: <https://chat.openai.com/>.
  - [2] C. A. Jenatz, «Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con dieciocho grados de libertad con movimientos suaves,» Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2020.
  - [3] R. G. Hernández López, «Diseño y construcción de cocodrilo animatrónico,» Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2018.
  - [4] R. R. et al, «Diseño de la estructura mecánica perteneciente al animatrónico del dinosaurio Laquintasaura,» 2019.
  - [5] J. Haldón, «Puesta en marcha y programación de un robot animatrónico,» Trabajo Fin de Grado Inédito, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2021.
  - [6] J.-E. Oh y H. Ma, «Enhancing Visitor Experience of Theme Park Attractions: Focusing on Animation and Narrative,» *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, vol. 10, n.º 4, págs. 178-185, 2018.
  - [7] T. Fitzgerald. «Disneyland to Introduce First-Ever Walt Disney Audio-Animatronic Figure.» Publicado en Disney Parks Blog. dirección: <https://disneyparksblog.com/dlr/walt-disney-audio-animatronic/>.
  - [8] J. Sederstrom. «Epic Universe revela a los monstruos realistas que buscan atraparte en Dark Universe.» Publicado en NBC Insider. dirección: <https://www.nbc.com/nbc-insider/epic-universe-dark-universe-monsters-animatronic>.
  - [9] C. A. Hernández Espitia, «Animatrónica: Diseño mecatrónico para el entretenimiento. MIME FACE, un ejemplo de aplicación,» *Ingenium*, vol. 10, n.º 19, págs. 1-11, jul. de 2008, ISSN: 0124-7492. dirección: [https://www.researchgate.net/publication/281596763\\_Animatronica\\_Dise%C3%B1o\\_mecatr%C3%B3nico\\_para\\_el\\_entretenimiento\\_MIME\\_FACE\\_un\\_ejemplo\\_de\\_aplicaci%C3%B3n](https://www.researchgate.net/publication/281596763_Animatronica_Dise%C3%B1o_mecatr%C3%B3nico_para_el_entretenimiento_MIME_FACE_un_ejemplo_de_aplicaci%C3%B3n).
  - [10] The Disney Classics. «The Oldest Audio-Animatronics in Disneyland. » dirección: <https://www.thedisneyclassics.com/blog/audio-animatronics-disneyland>.

- [11] E. R. García. «La industria de la animatrónica y la Inteligencia Artificial, ¿un nuevo boom? »Dirección: [https://www.elespanol.com/omicron/tecnologia/20170806/industria-animatronica-inteligencia-artificial-nuevo-boom/236976893\\_0.html](https://www.elespanol.com/omicron/tecnologia/20170806/industria-animatronica-inteligencia-artificial-nuevo-boom/236976893_0.html).
- [12] Engineering.com, *Mesmer Animatronics Allows Creatives to Build Realistic Humanoid Robots*, Photo courtesy of Engineered Arts, 2023. dirección: <https://www.engineering.com/mesmer-animatronics-allows-creatives-to-build-realistic-humanoid-robots>.
- [13] M. M. Villegas, M. G. Sandoval y P. A. Correa, «Acercamiento a la influencia psicofísica del color en los individuos,» *Cuaderno 159 | Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, págs. 239-249, 2022, ISSN: 1668-0227. dirección: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cdc/article/view/85782>.
- [14] A. J. Ortega, *Fabricación Digital: Introducción al modelado e impresión 3D*, s.f.
- [15] Formlabs, *Precisión, fiabilidad y tolerancia en la impresión 3D*, 2024. dirección: <https://formlabs.com/latam/blog/precision-fiabilidad-tolerancia-impresion-3d/>.
- [16] Soporte ZTL, *Digital Manufacturing Navigation*, 2023. dirección: <https://www.zintilon.com/es/blog/digital-manufacturing-navigation/>.
- [17] D. Imagen. «Cortadora Láser NX-1390. »dirección: <https://dattaimagen.com/producto/cortadora-laser-nx-1390>.
- [18] ADVANCED Motion Controls. «What is a Servo Motor: Definition, Origins, Components, Types & Applications. »dirección: <https://www.a-m-c.com/servomotor/>.
- [19] AutorDelCanal. «TituloDelVideoPWM.» Video de YouTube. dirección: <https://youtu.be/tVqVhiAGtS4>.
- [20] Naylamp Mechatronics. «Tutorial uso de servomotores con Arduino. »dirección: [https://naylampmechatronics.com/blog/33\\_tutorial-uso-de-servomotores-con-arduino.html](https://naylampmechatronics.com/blog/33_tutorial-uso-de-servomotores-con-arduino.html).
- [21] *PCA9685: 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I<sup>2</sup>C-bus LED driver*, Rev. 4, Product data sheet, NXP Semiconductors, abr. de 2015. dirección: <https://www.nxp.com/products/power-drivers/lighting-driver-and-controller-ics/led-drivers/16-channel-12-bit-pwm-fm-plus-ic-bus-led-driver:PCA9685>.
- [22] A. Industries, *16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver - I<sup>2</sup>C interface - PCA9685*, 2025. dirección: [https://www.adafruit.com/product/815?srsId=AfmBOopIbf75JpWFAGnFhh7WiGn\\_wz85XPSmvoELPLJvWB3QDdb6rVmg](https://www.adafruit.com/product/815?srsId=AfmBOopIbf75JpWFAGnFhh7WiGn_wz85XPSmvoELPLJvWB3QDdb6rVmg).
- [23] *I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual*, Rev. 7, UM10204, User manual, NXP Semiconductors, Eindhoven, The Netherlands, oct. de 2021. dirección: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [24] J. Valdez y J. Becker, «Understanding the I<sup>2</sup>C Bus,» Texas Instruments, Dallas, TX, USA, Application Report SLVA704, jun. de 2015. dirección: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>.
- [25] R. Pelayo. «What is I2C? | Protocol Guide.» Microcontroller Tutorials (Teach Me Micro). Updated May 9, 2019. dirección: <https://www.teachmemicro.com/i2c-primer/>.

- [26] C. Gomez, J. Oller y J. Paradells, «Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology,» *Sensors*, vol. 12, n.º 9, págs. 11 734-11 753, 2012. DOI: 10.3390/s120911734. dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/11734>.
- [27] R. Quesada, *Bluepad32: Documentation*, <https://bluepad32.readthedocs.io/>, 2025.
- [28] Analog Devices, Inc. «Switch-Mode Power Supply Basics.» Artículo técnico sobre fundamentos, operación en alta frecuencia, ventajas frente a fuentes lineales y consideraciones de diseño. dirección: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/switch-mode-power-supply-basics.html>.
- [29] TETTSA. «Fuente conmutada 100-120 VAC / 200-240 VAC 5 VDC 20 A. » dirección: <https://tienda.tettsa.gt/producto/fuente-conmutada-100-120vac-200-240vac-5vdc-20amp>.
- [30] *Diario de investigación del proyecto: Diseño e implementación de un rostro animatrónico inspirado en Jack*, [https://uvgtt-my.sharepoint.com/:o:/g/personal/kekellner\\_uvgtt-edu\\_gt/IgBm6oPcVG1DRpEQ5UITi34FAQJo4tjIawG4F7GUkwUz9t0?e=qLKsMn](https://uvgtt-my.sharepoint.com/:o:/g/personal/kekellner_uvgtt-edu_gt/IgBm6oPcVG1DRpEQ5UITi34FAQJo4tjIawG4F7GUkwUz9t0?e=qLKsMn), Cuaderno de notas del proceso de diseño y pruebas. Anexo digital, 2025.
- [31] Tower Pro. «MG90S Metal Gear Micro Servo — Specifications.» Hoja de datos del servomotor MG90S. dirección: <https://www.sainsmart.com/products/mg90s-metal-gear-all-purpose-servo>.
- [32] Autoría propia, *Mecanismo de los ojos V3*, <https://www.printables.com/model/1484057-mecanismo-de-los-ojos-v3>, Modelo 3D del mecanismo de ojos del rostro animatrónico Jack, 2025.
- [33] Autoría propia, *Globo ocular*, <https://www.printables.com/model/1484276-globo-ocular>, Modelo 3D del globo ocular del rostro animatrónico Jack, 2025.
- [34] Autoría propia, *Soporte central de rotación y montaje de servomotores*, <https://www.printables.com/model/1484289-soporte-central-de-rotacion-y-montaje-de-servomotores>, Modelo 3D del soporte central de rotación y montaje de servomotores para el mecanismo de ojos, 2025.
- [35] K. Kellner, *Placa base del mecanismo ocular y de párpados*, <https://www.printables.com/model/1484287-placa-base-del-mecanismo-ocular-y-de-parpados>, Modelo 3D de la placa base del mecanismo ocular y de párpados para el rostro animatrónico Jack., 2025.
- [36] S. Fuentes, *Orejas de soporte para párpados del mecanismo de ojos V3*, <https://www.printables.com/model/1484279-soportes-del-eje-de-los-parpados>, 2025.
- [37] S. Fuentes, *Base pequeña para servomotor del mecanismo de ojos/párpados*, <https://www.printables.com/model/1484284-base-pequena-para-servomotor-mecanismo-de-parpados>, 2025.
- [38] S. Fuentes, *Base grande para servomotor del mecanismo de ojos/párpados*, <https://www.printables.com/model/1484286-base-grande-para-servomotor>, 2025.
- [39] K. McAleer, *Design Your Own Eye Mechanism in Fusion 360*, 2023. dirección: <https://www.youtube.com/live/JbWksdy5i0k?si=19CrnJqN-KAFAUT>.
- [40] S. Fuentes, *Párpados superiores para mecanismo de ojos animatrónicos*, <https://www.printables.com/model/1484120-parpados-superiores>, 2025.

- [41] S. Fuentes, *Párpados inferiores para mecanismo de ojos animatrónicos*, <https://www.printables.com/model/1484124-parpados-inferiores>, 2025.
- [42] S. Fuentes, *Eslabón de transmisión vertical para mecanismo ocular animatrónico*, <https://www.printables.com/model/1484293-eslabon-de-transmision-vertical-para-mecanismo-ocu>, 2025.
- [43] S. Fuentes, *Placa de soporte para tuercas (refuerzo de montaje)*, <https://www.printables.com/model/1484300-placa-de-soporte-para-tuercas-refuerzo-de-montaje>, 2025.
- [44] S. Fuentes, *Mecanismo de la mandíbula del rostro animatrónico de Jack*, <https://www.printables.com/model/1484811-mandibula-del-animatronico-con-union-es-de-mecanismo>, 2025.
- [45] S. Fuentes, *Base completa del animatrónico de Jack*, <https://www.printables.com/model/1484087-base-completa>, 2025.
- [46] S. Fuentes, *Unión tipo L para perfiles 2020*, <https://www.printables.com/model/1484296-union-tipo-l-para-perfiles-2020>, 2025.
- [47] S. Fuentes, *Soporte en L grande para estructura 2020 a base de MDF*, <https://www.printables.com/model/1484298-soporte-en-l-grande-para-estructura-2020-a-base-md>, 2025.
- [48] M. UVG, *Nuestras máquinas*, <https://sites.google.com/view/makerlabuvg/main/nuestras-m%C3%A1quinas>, 2025.
- [49] P. Research, *Impresora 3D Original Prusa i3 MK3S+*, <https://ultra-lab.net/producto/impresora-3d-original-prusa-i3-mk3s/>, Ficha técnica del modelo MK3S+, 2024.
- [50] ELEGOO, *OrangeStorm Giga FDM 3D Printer*, <https://www.elegoo.com/>, Información general de la impresora OrangeStorm Giga, 2024.
- [51] M. UVG, *Parámetros de corte láser para MDF*, [https://drive.google.com/file/d/1JnQxi0t\\_8U2ktcGxIBUxpaW8gFFkwQKr/view](https://drive.google.com/file/d/1JnQxi0t_8U2ktcGxIBUxpaW8gFFkwQKr/view), Documento interno de referencia de parámetros de corte láser del MakerLab.
- [52] E. Ych, *PF-2020T-1 Perfil de aluminio 2020 T-slot 1 metro largo aprox*, <https://electronicarych.com/shop/pf-2020t-1-pf-2020t-1-perfil-de-aluminio-2020-t-slot-1-metro-largo-aprox-12151>, Referencia de disponibilidad de perfiles 2020 en Guatemala.
- [53] C. R&CH, *PF-2020V-1 Perfil de aluminio 2020 V-slot 1 metro largo aprox*, [https://www.construex.gt/exhibidores/corporacion\\_r\\_ch\\_s\\_a/producto/perfil\\_de\\_aluminio\\_1\\_metro\\_cdad\\_de\\_guatemala](https://www.construex.gt/exhibidores/corporacion_r_ch_s_a/producto/perfil_de_aluminio_1_metro_cdad_de_guatemala), Referencia de perfil estructural 2020 disponible en Guatemala.
- [54] La Casa del Tornillo S.A., *Catálogo de productos de La Casa del Tornillo, Guatemala*, <https://www.calameo.com/books/003558349afa571084da1>, Distribuidor de tornillería en Guatemala.
- [55] F. Novex, *Ferretería Novex Guatemala*, [https://www.tecoloco.com.gt/empresas-destacadas/trabajos-en-novex\\_1403.aspx](https://www.tecoloco.com.gt/empresas-destacadas/trabajos-en-novex_1403.aspx), Ferretería dedicada a venta de artículos de construcción y remodelación.

- [56] T. B. S.A., *Tornillos Basauri S.A.* [https://www.construex.gt/exhibidores/tornillos\\_basauri\\_s\\_a](https://www.construex.gt/exhibidores/tornillos_basauri_s_a), Empresa guatemalteca especializada en tornillería y ferretería industrial.
- [57] Adafruit Industries, *NeoPixel Ring – 12 x 5050 RGB LED with Integrated Drivers*, <https://www.adafruit.com/product/1643>.
- [58] Adafruit Industries, *Adafruit NeoPixel Library*, [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_NeoPixel](https://github.com/adafruit/Adafruit_NeoPixel), Arduino library for controlling single-wire LED pixels (NeoPixel, WS2812, etc.)
- [59] U. Maker, *TinyS3 – The Tiny ESP32-S3 Development Board*, <https://esp32s3.com/tinys3.html>, 2023.
- [60] Adafruit Industries, *Adafruit PWM Servo Driver Library*, <https://github.com/adafruit/Adafruit-PWM-Servo-Driver-Library>.
- [61] P. R. bibinitperiod Electronics. «Twisted Servo Extension Cable 12” Male–Female.» Servo extension cable para aplicaciones de radiocontrol y robótica. dirección: <https://www.pololu.com/product/2169>.
- [62] R. Quesada, *Bluepad32 Documentation*, <https://bluepad32.readthedocs.io/>.
- [63] S. Fuentes, *Código fuente del sistema de control del rostro animatrónico Jack*, <https://github.com/SvFuentes19864/jack-rostro-animatronico>, Versión 1.0-tesis utilizada en la memoria de graduación, 2025.
- [64] S. Fuentes, *Jack - rostro animatrónico (video corto de demostración)*, <https://youtube.com/shorts/k0VdzZC6rBE?si=CswmMv5LJttPv0b5>, Video corto de demostración del funcionamiento general del rostro animatrónico Jack, 2025.
- [65] S. Fuentes, *Jack - demostración y explicación del sistema de control*, [https://youtube.com/y0-0wVm8\\_nU](https://youtube.com/y0-0wVm8_nU), Video explicativo donde se describen los modos de operación y se muestran pruebas del sistema, 2025.
- [66] *Five Nights at Freddy’s – Sitio oficial*, <https://www.universalpictures-latam.com/micro/five-nights>, Universal Pictures Latinoamérica. Imagen promocional de la franquicia *Five Nights at Freddy’s*, 2023.
- [67] GrabCAD, *Tower Pro MG90S Micro Servo*, 2018. dirección: <https://grabcad.com/library/tower-pro-mg90s-micro-servo-2>.
- [68] Universidad del Valle de Guatemala, *Jack, mascota oficial de la Universidad del Valle de Guatemala*, Publicación en redes sociales oficiales de la Universidad del Valle de Guatemala, Imagen promocional de la mascota Jack utilizada como referencia visual para el proyecto animatrónico., 2025.
- [69] TETTSA, *JACK AC 3 pines + switch + fusible*, <https://tienda.tettsa.gt/producto/proximamente-jack-ac-3-pines-switch-fusible/>, Imagen de referencia del módulo IEC con interruptor y fusible., 2025.

## CAPÍTULO 12

---

### Anexos

---

En esta sección, se recopila material que apoya el contenido desarrollado en los capítulos principales del trabajo. Los anexos incluyen figuras de referencia visual, modelos tridimensionales y detalles de diseño que permiten apreciar con mayor claridad la geometría de la carcasa, los mecanismos internos del rostro animatrónico y los componentes electrónicos asociados.

Las imágenes que se presentan a continuación no introducen información nueva al desarrollo teórico, pero sí facilitan la interpretación de los resultados de diseño y manufactura, al mostrar vistas adicionales, secuencias de movimiento y elementos tomados como referencia estética o técnica. De esta manera, los anexos sirven como apoyo visual para futuras consultas, réplica del proyecto o ampliaciones del prototipo.

## 12.1. Referencias visuales y modelos base

**Figura 25.** Referencia de estilo FNAF para el rostro



Nota. Imagen de referencia para el tono y la expresión tipo FNAF que se desea incorporar, obtenida de [66], cortesía de Universal Studios.

**Figura 26.** Servomotor MG90s



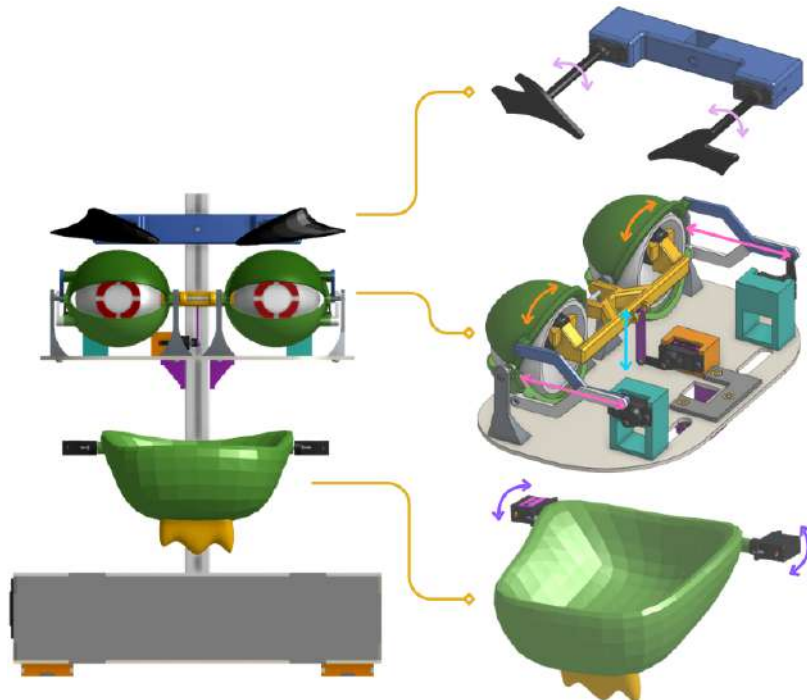
Nota. Modelo 3D del servomotor MG90s, obtenido de la página oficial de GrabCAD [67].

**Figura 27.** Referencia visual de la mascota Jack original



Nota. La mascota original se usa como guía de proporciones y rasgos para la carcasa modelada en Blender. Imagen obtenida de las redes sociales oficiales de la Universidad del Valle de Guatemala [68].

**Figura 28.** Subsistemas principales del rostro animatrónico y sus grados de libertad

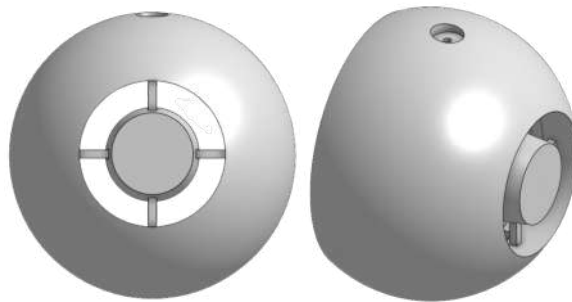


Nota. Esquema de elaboración propia que muestra la base del mecanismo, el módulo de ojos y párpados, el mecanismo de cejas y la mandíbula, junto con la dirección de los movimientos principales asociados a cada subsistema.

### 12.1.1. Mecanismo de los ojos

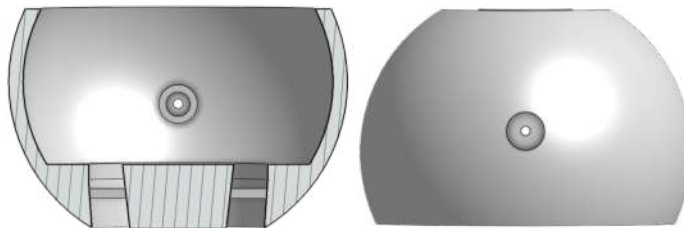
En las siguientes figuras se detalla la geometría del globo ocular, su acoplamiento con el servomotor y el aro NeoPixel, así como los movimientos principales del mecanismo.

**Figura 29.** Globo ocular del mecanismo



Nota. Vista frontal del globo ocular modelado para el mecanismo de ojos, de elaboración propia.

**Figura 30.** Vistas seccionadas superior e inferior del globo ocular



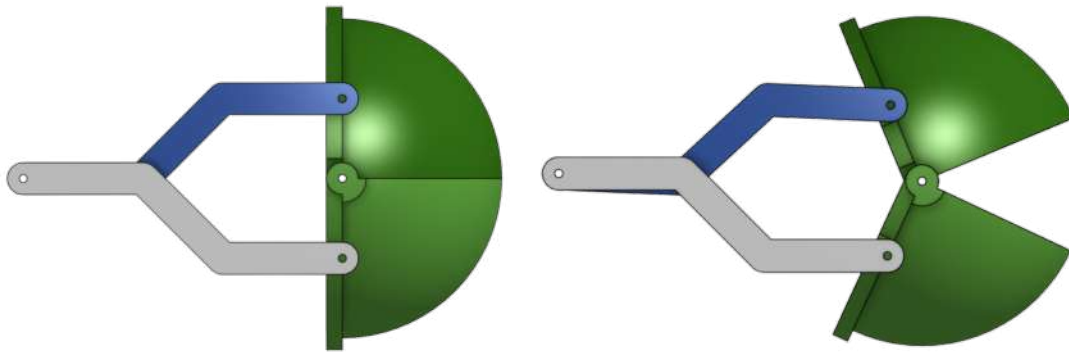
Nota. Vistas seccionadas superior e inferior. El orificio central muestra el paso del eje del servomotor.

**Figura 31.** Ensamble: ojo con servomotor y aro NeoPixel



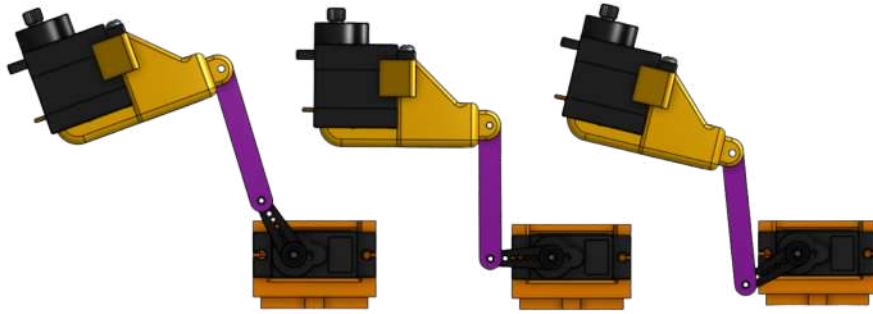
Nota. Ensamble del globo ocular con el servomotor MG90S y el aro NeoPixel, de elaboración propia.

**Figura 32.** Mecanismo de pestañeo 4 barras V1



Nota. Secuencia de apertura y cierre del mecanismo de pestañeo de cuatro barras, imágenes de elaboración propia.

**Figura 33.** Movimiento arriba-abajo del mecanismo ocular accionado por el eslabón vertical



Nota. Secuencia de posiciones inferior y superior del mecanismo de ojos; imágenes de elaboración propia.

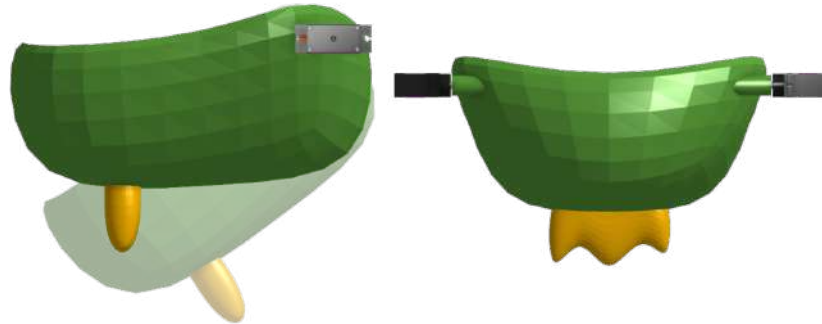
### 12.1.2. Mecanismo de las cejas



**Figura 34.** Mecanismo completo de las cejas del rostro animatrónico de Jack.

Nota. Imagen de elaboración propia.

### 12.1.3. Mecanismo de la mandíbula



**Figura 35.** Mecanismo de la mandíbula del animatrónico de Jack.

Nota. Vista del mecanismo de la mandíbula y ubicación del eje de rotación. Imagen de elaboración propia.

### 12.1.4. Componentes de la base

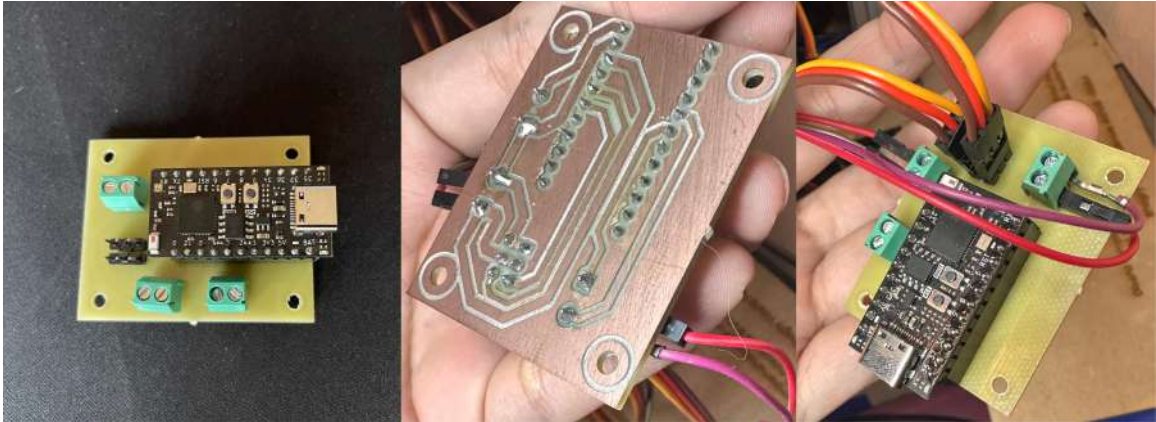


**Figura 36.** Módulo IEC de 3 pines con interruptor y fusible utilizado como entrada de corriente de la base.

Nota. Imagen tomada de [69].

### 12.1.5. PCB del circuito integrador

Figura 37. PCB del circuito integrador en diferentes etapas de fabricación e instalación



Nota. Collage fotográfico de elaboración propia que muestra, de izquierda a derecha, el PCB con el ESP32 TinyS3 y los terminal blocks montados, la cara de cobre después del grabado de pistas y la tarjeta ya cableada e instalada dentro del sistema.

### 12.1.6. Modelos 3D del proyecto publicados en Printables

En este anexo se recopilan los modelos tridimensionales utilizados en el proyecto y publicados en la plataforma *Printables*. En el cuerpo del documento estos recursos se mencionan de forma descriptiva (por ejemplo, “el modelo 3D del globo ocular se encuentra publicado en Printables”), mientras que los enlaces de descarga directos se concentran aquí para facilitar su consulta y réplica del proyecto.

**Cuadro 6.** Modelos 3D del rostro animatrónico de Jack publicados en Printables

<b>Modelo</b>	<b>Enlace de descarga</b>
Mecanismo de los ojos V3	<a href="https://printables.com/model/1484057-mecanismo-de-los-ojos-v3">printables.com/model/1484057-mecanismo-de-los-ojos-v3</a>
Globo ocular	<a href="https://printables.com/model/1484276-globo-ocular">printables.com/model/1484276-globo-ocular</a>
Soporte central de rotación y montaje de servomotores	<a href="https://printables.com/model/1484289-soporte-central-de-rotacion-y-montaje-de-servomoto">printables.com/model/1484289-soporte-central-de-rotacion-y-montaje-de-servomoto</a>
Placa base del mecanismo ocular y de párpados	<a href="https://printables.com/model/1484287-placa-base-del-mecanismo-ocular-y-de-parpados">printables.com/model/1484287-placa-base-del-mecanismo-ocular-y-de-parpados</a>
Orejas de soporte para párpados (mecanismo ojos V3)	<a href="https://printables.com/model/1484279-soportes-del-eje-de-los-parpados">printables.com/model/1484279-soportes-del-eje-de-los-parpados</a>
Base pequeña para servomotor (mecanismo de párpados/ojos)	<a href="https://printables.com/model/1484284-base-pequena-para-servomotor-mecanismo-de-parpados">printables.com/model/1484284-base-pequena-para-servomotor-mecanismo-de-parpados</a>
Base grande para servomotor (mecanismo de párpados/ojos)	<a href="https://printables.com/model/1484286-base-grande-para-servomotor">printables.com/model/1484286-base-grande-para-servomotor</a>
Párpados superiores (mecanismo de ojos animatrónicos)	<a href="https://printables.com/model/1484120-parpados-superiores">printables.com/model/1484120-parpados-superiores</a>
Párpados inferiores (mecanismo de ojos animatrónicos)	<a href="https://printables.com/model/1484124-parpados-inferiores">printables.com/model/1484124-parpados-inferiores</a>
Eslabón de transmisión vertical (mecanismo ocular)	<a href="https://printables.com/model/1484293-eslabon-de-transmision-vertical-para-mecanismo-ocu">printables.com/model/1484293-eslabon-de-transmision-vertical-para-mecanismo-ocu</a>
Placa de soporte para tuercas (refuerzo de montaje)	<a href="https://printables.com/model/1484300-placa-de-soporte-para-tuercas-refuerzo-de-montaje">printables.com/model/1484300-placa-de-soporte-para-tuercas-refuerzo-de-montaje</a>
Mecanismo de las cejas V3	<a href="https://printables.com/model/1484073-mecanismo-de-las-cejas-v3">printables.com/model/1484073-mecanismo-de-las-cejas-v3</a>
Base de servomotores para mecanismo de cejas	<a href="https://printables.com/model/1484308-base-de-servomotores-para-mecanismo-de-cejas">printables.com/model/1484308-base-de-servomotores-para-mecanismo-de-cejas</a>
Cejas del animatrónico de Jack (izquierda y derecha)	<a href="https://printables.com/model/1484311-cejas-del-animatronico-piezas-izquierda-y-derecha">printables.com/model/1484311-cejas-del-animatronico-piezas-izquierda-y-derecha</a>
Mecanismo de la mandíbula del rostro animatrónico	<a href="https://printables.com/model/1484811-mandibula-del-animatronico-con-union-es-de-mecanism">printables.com/model/1484811-mandibula-del-animatronico-con-union-es-de-mecanism</a>
Base completa del animatrónico de Jack	<a href="https://printables.com/model/1484087-base-completa">printables.com/model/1484087-base-completa</a>
Unión tipo L para perfiles 2020	<a href="https://printables.com/model/1484296-union-tipo-l-para-perfiles-2020">printables.com/model/1484296-union-tipo-l-para-perfiles-2020</a>
Soporte en L grande para estructura 2020 a base de MDF	<a href="https://printables.com/model/1484298-soporte-en-l-grande-para-estructura-2020-a-base-md">printables.com/model/1484298-soporte-en-l-grande-para-estructura-2020-a-base-md</a>

*Nota.* Enlaces recopilados de los modelos publicados por la autora en la plataforma Printables.

## 12.2. Diario de investigación del proyecto Jack

El diario completo del proceso de diseño, fabricación, pruebas e iteraciones del rostro animatrónico de Jack se encuentra disponible como cuaderno digital de OneNote en el siguiente enlace:

[https://uvgg-t-my.sharepoint.com/:o:/g/personal/kekellner\\_uv-g-edu-gt/IgBm6oPcVG1DRpEQ5UITi34FAQJo4tjIawG4F7GUkwUz9t0?e=qLKsMn](https://uvgg-t-my.sharepoint.com/:o:/g/personal/kekellner_uv-g-edu-gt/IgBm6oPcVG1DRpEQ5UITi34FAQJo4tjIawG4F7GUkwUz9t0?e=qLKsMn)

Este archivo forma parte de los anexos digitales que acompañan al presente documento y sirve como registro detallado del proceso de trabajo.