

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Sistema Embebido Inteligente para Monitoreo de Niveles de Estrés y
Comunicación PECS en Niños con TEA

INGE-2838

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería Mecatrónica

Presentado por:

Mario Alejandro Estrada Ayala

Marina Alexandra Pérez Alvarado

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedicamos este proyecto a nuestros padres y a toda nuestra familia, por ser nuestro pilar en cada etapa de esta carrera. Su amor, apoyo constante y confianza en nosotros hicieron posible este logro.

Mario Estrada & Marina Pérez

Agradecimientos

Nuestros más sinceros agradecimientos al PhD. Marcelo Fajardo, tutor de tesis y coordinador de carrera, por su valiosa guía, compromiso y dedicación a lo largo de este proceso. Su acompañamiento fue fundamental para el desarrollo de este proyecto.

También agradecemos al MSc. Jonathan León, docente de la materia integradora, por sus aportes académicos y el constante apoyo brindado durante la ejecución del trabajo.

Finalmente, expresamos nuestra gratitud a RAMEL, por habernos facilitado los materiales necesarios para llevar a cabo esta tesis, haciendo posible la aplicación práctica de nuestros conocimientos.

Mario Estrada & Marina Pérez

Declaración Expresa

Nosotros Mario Alejandro Estrada Ayala y Marina Alexandra Pérez Alvarado acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

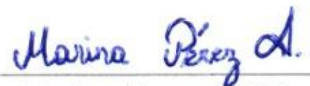
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 2 de junio del 2025.



Mario Alejandro Estrada
Ayala



Marina Alexandra Pérez
Alvarado

Evaluadores

Jonathan Roberto León Torres, M.Sc.

Profesor de materia

Fajardo Pruna Marcelo Rodolfo, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

El Trastorno del Espectro Autista (TEA) representa un reto significativo en la comunicación y la regulación emocional infantil, particularmente en niños con limitaciones verbales. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un dispositivo que integre un sistema de comunicación aumentativa mediante pictogramas físicos y un módulo de monitoreo de niveles de estrés basado en visión por computadora e inteligencia artificial. La hipótesis sostiene que la integración de tecnologías embebidas con algoritmos de análisis emocional permite incrementar la autonomía comunicativa, a la vez que optimiza la intervención temprana en entornos familiares y educativos. El desarrollo se llevó a cabo mediante una metodología de diseño iterativo que incluyó modelado y fabricación aditiva en 3D, implementación de tarjetas PECS con tecnología RFID, empleo de una unidad de procesamiento Jetson Orin Nano, un microcontrolador ESP32 y modelos de reconocimiento multimodal de emociones. Los resultados confirmaron la funcionalidad del prototipo en la detección de expresiones faciales, gestos asociados al estrés y construcción de mensajes estructurados a partir de pictogramas. Se concluye que el sistema constituye una alternativa viable, accesible y eficaz para fortalecer la comunicación como el bienestar emocional de niños con TEA.

Palabras Clave: Monitoreo emocional, Interacción niño-dispositivo, Análisis multimodal, Comunicación aumentativa y alternativa, Tecnología inclusiva.

Abstract

Autism Spectrum Disorder (ASD) poses a significant challenge to child communication and emotional regulation, particularly in those with verbal limitations. This project aims to develop a device that integrates an augmentative communication system through physical pictograms with a stress monitoring module based on computer vision and artificial intelligence. The hypothesis states that combining embedded technologies with emotional analysis algorithms enhances communicative autonomy while improving the effectiveness of early intervention in family and educational contexts. The system was developed through an iterative design methodology that encompassed 3D modeling and additive manufacturing, implementation of PECS cards with RFID technology, use of a Jetson Orin Nano processing unit, an ESP32 microcontroller, and multimodal emotion recognition models. Results confirmed the prototype's capability to detect facial expressions, identify stress-related gestures, and generate structured messages from pictograms. It is concluded that the system represents a viable, accessible, and effective alternative to strengthen communication and promote the emotional well-being of children with ASD.

Keywords: *Emotional monitoring, Child-Device Interaction, Multimodal analysis, Augmentative and Alternative Communication, Inclusive technology.*

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	<i>II</i>
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	IX
Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas	XIII
Índice de planos	XIV
Capítulo 1.....	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del Problema	4
1.2 Justificación del Problema	6
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Marco teórico	9
1.4.1 Perspectiva educativa y constructivista	9
1.4.2 Trastorno del Espectro Autista.....	10
1.4.3 Sistema PECS como modelo estructurado de CAA	12
1.4.4 Robótica social y tecnologías para apoyo emocional en niños con TEA	17
1.4.5 Visión por computadora e inteligencia artificial para análisis emocional	20
1.4.6 Integración tecnológica en entornos de apoyo	23
1.4.7 Estrés en niños con TEA.....	24
1.4.8 Tecnologías y análisis emocional	25
1.4.9 Realidad aumentada personalizada para PECS.....	26
1.4.10 Aplicación L-PECS.....	27
1.4.11 Dispositivos embebidos y robótica aplicada - Caso robot JARI.....	30

1.4.12	Análisis crítico y vacíos identificados	32
Capítulo 2.....		34
2.	Metodología	35
2.1	Procedimiento general de diseño.....	36
2.2	Generación de alternativas y matriz de decisión	37
2.3	Diseño conceptual del producto	38
2.4	Diseño mecánico	41
2.4.1	Criterios de diseño y estética formal.....	42
2.4.2	Dimensiones y ergonomía.....	42
2.4.3	Selección de materiales.....	44
2.4.4	Desarrollo del diseño y validación.....	47
2.4.5	Fabricación del prototipo	47
2.5	Diseño electrónico.....	48
2.5.1	Unidad de procesamiento embebido.....	48
2.5.2	Subsistemas de entrada	50
2.5.3	Subsistemas de salida.....	51
2.5.4	Validación preliminar del diseño	52
2.6	Diseño de programación.....	52
2.6.1	Módulo A - Análisis de emociones faciales	53
2.6.2	Módulo B - Análisis de gestos corporales	59
Capítulo 3.....		68
3.	Resultados y análisis.....	69
3.1	Resultados del diseño mecánico.....	69
3.1.1	Dimensiones y peso global	69
3.1.2	Estimación de masa y tiempos de fabricación	70
3.1.3	Masa de los componentes electrónicos	71
3.1.4	Distribución de componentes internos.....	71

3.1.5	Análisis estructural (FEA en Inventor)	73
3.1.6	Aspectos estéticos	75
3.2	Resultados del diseño electrónico	76
3.2.1	Costos estimados del prototipo	79
3.3	Resultados de la interfaz animada y sensorial.....	80
3.3.1	Producción de audios y voces seleccionadas	80
3.3.2	Categorías de audios implementadas	81
3.3.3	Diseño gráfico y animación facial	82
3.4	Resultados de programación	83
3.4.1	Resultados del Módulo A – Reconocimiento de emociones faciales	83
3.4.2	Resultados del Módulo B – Gestos corporales y posturas.....	85
3.4.3	Resultados del Módulo C – Flujo óptico y movimientos repetitivos.....	88
3.4.4	Sistema Final.....	91
3.4.5	Resultados del sistema de comunicación PECS-RFID	95
Capítulo 4.....		97
4.	Conclusiones y recomendaciones	98
4.1	Conclusiones	98
4.2	Recomendaciones.....	99
Referencias.....		101
Apéndices.....		108

Abreviaturas

3D	Three-Dimensional
ABA	Applied Behavior Analysis
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AIDC	Automatic Identification and Data Capture
AEGIS	Augmented-reality Expression Guided Interpretation System
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
ARASAAC	Centro Aragonés para la Comunicación Aumentativa y Alternativa
ASD	Autism Spectrum Disorder
AVG	Average
CAD	Computer-Aided Design
CNN	Convolutional Neural Network
CPAT	Computerized Progressive Attentional Training
CPU	Central Processing Unit
CREMA-D	Crowd-Sourced Emotional Multimodal Actors Dataset
cuDNN	CUDA Deep Neural Network library
DSM-5	Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition
DREAM	Development of Robot-Enhanced therapy for children with Autism Spectrum Disorders
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite Element Analysis
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
FS	Factor of Safety

GPIO	General-Purpose Input/Output
GPU	Graphics Processing Unit
HD	High Definition
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IA	Inteligencia Artificial
ICD-11	International Classification of Diseases, 11th Revision
I2C	Inter-Integrated Circuit
IPS	In-Plane Switching (Tecnología de Pantalla LCD)
JSON	JavaScript Object Notation
LCD	Liquid Crystal Display
L-PECS	Learning Picture Exchange Communication System (Aplicación Móvil)
LSTM	Long Short-Term Memory
MTCNN	Multi-task Cascaded Convolutional Neural Network
O-Net	Output Network (etapa de MTCNN)
OMS	Organización Mundial de la Salud
P-Net	Proposal Network (etapa de MTCNN)
PECS	Picture Exchange Communication System
PETG	Polietileno Tereftalato Glicolizado
PLA	Ácido Poliláctico
PSS	Perceived Stress Scale (Escala de Estrés Percibido)
RAMEL	The Robotics, Automation & Mechatronics Engineering Laboratory
RGB	Red, Green, Blue (modelo de color)
R-Net	Refine Network (etapa de MTCNN)
RFID	Radio Frequency Identification

SAAC	Sistemas Aumentativos y Alternativos de Comunicación
SGD	Speech-Generating Device
SPI	Serial Peripheral Interface
TAC	Tests de Acción del Usuario
TAA	Teacher Training and Attention in Autism
TEA	Trastorno del Espectro Autista
TER+	Toronto Emotional Speech Set Plus
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TUA	Test de Usabilidad de Accesibilidad
TUI	Test de Interfaz de Usuario
UID	Unique Identifier
USB	Universal Serial Bus
USD	United States Dollar
UTF-8	Unicode Transformation Format – 8 bits
UTS	Ultimate Tensile Strength

Simbología

A	Amperio
Cm	Centímetro
°C	Grado Celsius
δ	Desplazamiento
E	Módulo de Young (Elasticidad)
G	Gramo
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
GPa	Gigapascal
H	Hora
kg	Kilogramo
kgf	Kilogramo-fuerza
m	Metro
mA	Miliamperio
MB	Megabyte
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
min	Minuto
MPa	Megapascal
N	Newton
s	Segundo
σ_1	Primera Tensión Principal
σ_3	Tercera Tensión Principal
σ_y	Esfuerzo de fluencia

V	Voltio
W	Watt
N	Coeficiente de Poisson

Índice de figuras

Figura 1.1 Sistemas aumentativos y alternativos de comunicación.....	11
Figura 1.2. Picture exchange communication system.....	13
Figura 1.3 Ejemplos de pictogramas usados en el sistema PECS.....	15
Figura 1.4 Pictogramas usados en el contexto escolar.....	15
Figura 1.5 Estandarización de los pictogramas.....	16
Figura 1.6 Robot Kaspar interactuando con un niño con TEA.....	18
Figura 1.7 Ejemplificación de la combinación de visión por computadora e IA	20
Figura 1.8 Enfoque técnico para detectar estados emocionales.....	22
Figura 1.9 Inexpresividad de los niños con TEA.....	25
Figura 1.10 Capas funcionales de L-PECS.....	28
Figura 1.11 Aspectos del sistema considerados para el estudio	29
Figura 1.12 Robot Jari.....	30
Figura 2.1 Requerimientos de diseño.....	35
Figura 2.2 Diagrama de flujo de la metodología	36
Figura 2.3 Propuestas de solución	37
Figura 2.4 Criterios de evaluación.....	38
Figura 2.5 Diseño conceptual del prototipo	39
Figura 2.6 Interacción con el sistema	39
Figura 2.7 Detección de niveles de estrés	40
Figura 2.8 Diseño conceptual de expresiones.....	41
Figura 2.9 Arquitectura del sistema	41
Figura 2.10 Etapas del diseño mecánico.....	42
Figura 2.11 Estaturas por edad con escala comparativa del dispositivo.....	43
Figura 2.12 Diseño y validación mecánica.....	47
Figura 2.13 Flujograma de fabricación.....	48
Figura 2.14 Etapas de diseño electrónico	48
Figura 2.15 Periféricos de entrada	50
Figura 2.16 Periféricos de salida.....	51
Figura 2.17 Validación preliminar del diseño electrónico.....	52
Figura 2.18 Flujograma del sistema integrado de detección de estrés.....	53
Figura 2.19 Estrategias de integración de Deepface	54
Figura 2.20 Arquitectura de red MTCNN.....	55

Figura 2.21 Preprocesamiento de dataset - Módulo A	57
Figura 2.22 Flujograma del módulo A.....	58
Figura 2.23 Procesamiento dataset - Módulo B.....	61
Figura 2.24 Flujograma del módulo B.....	62
Figura 2.25 Flujograma del módulo C	65
Figura 2.26 Flujograma del sistema de comunicación PECS-RFID.....	66
Figura 3.1 Plano conjunto del Moodi	70
Figura 3.2 Vista explosionada del prototipo	72
Figura 3.3 Primera versión cromática del Moodi	76
Figura 3.4 Segunda versión cromática del Moodi	76
Figura 3.5 Plano electrónico del Moodi.....	78
Figura 3.6 Enfoque de modularidad propuesto para el proyecto	79
Figura 3.7 Categorías temáticas de los audios	81
Figura 3.8 Rostros iniciales del Moodi.....	82
Figura 3.9 Pruebas del reconocimiento de emociones faciales.....	84
Figura 3.10 Gráficas de precisión y pérdida del módulo B	85
Figura 3.11 Matriz de confusión del módulo B	86
Figura 3.12 Pruebas del reconocimiento de gestos corporales y posturas.....	87
Figura 3.13 Segmentación con Detectron2.....	88
Figura 3.14 Figuras de entrada para un BILSTM.....	88
Figura 3.15 Gráficas de precisión y pérdida del módulo C	89
Figura 3.16 Matriz de confusión del módulo C	90
Figura 3.17 Predicción de las clases del módulo C	90
Figura 3.18 Evolución temporal del nivel global de estrés.....	92
Figura 3.19 Sesión corta seleccionada de prueba	93
Figura 3.20 Sesión larga seleccionada de prueba	94
Figura 3.21 Validación cualitativa del módulo C	94
Figura 3.22 Validación experimental PECS-RFID.....	95
Figura 3.23 Tiempo de respuesta por intento con la comunicación PECS-RFID	96

Índice de tablas

Tabla 2.1 Matriz de decisión.....	38
Tabla 2.2 Propiedades generales de los materiales candidatos.....	44
Tabla 2.3 Variación de S_y y UTS según el porcentaje de relleno	46
Tabla 2.4 Requerimientos de la unidad de procesamiento	49
Tabla 2.5 Herramientas requeridas módulo A	55
Tabla 2.6 Descripción técnica del flujograma del módulo A	58
Tabla 2.7 Herramientas requeridas en el módulo B.....	59
Tabla 2.8 Arquitecturas evaluadas para el módulo B	63
Tabla 2.9 Herramientas requeridas en el módulo C.....	64
Tabla 2.10 Descripción técnica del flujograma del módulo C.....	65
Tabla 3.1 Valores aproximados de la masa de las piezas de CAD	70
Tabla 3.2 Valores de la masa de los componentes electrónicos	71
Tabla 3.3 Lista de piezas requeridas para el ensamble del prototipo.....	72
Tabla 3.4 Resultados del análisis estructural 30 N	73
Tabla 3.5 Resultados del análisis estructural 2000N	75
Tabla 3.6 Selección de componentes electrónicos.....	77
Tabla 3.7 Detalle de los costos del prototipo	79
Tabla 3.8 Resultado de las animaciones	83
Tabla 3.9 Métricas resultantes del módulo B.....	86
Tabla 3.10 Métricas resultantes del módulo C.....	89
Tabla 3.11 Esquema de ponderación y clasificación multimodal.....	91

Índice de planos

PLANO 1	Plano de conjunto
PLANO 2	Vista explosionada del prototipo
PLANO 3	Variantes cromáticas del prototipo
PLANO 4	Carcasa frontal
PLANO 5	Carcasa posterior
PLANO 6	Botones del prototipo
PLANO 7	Botón direccional y acople RFID
PLANO 8	Sujetadores de los botones
PLANO 9	Pie del prototipo
PLANO 10	Brazo del prototipo
PLANO 11	Apoyo Jetson Orin Nano
PLANO 12	Tapa de los componentes
PLANO 13	Conexiones electrónicas

Capítulo 1

1. Introducción

El Trastorno del Espectro Autista (TEA) representa un desafío significativo y creciente en el ámbito social, familiar y educativo debido a su alta incidencia y la complejidad de los problemas comunicativos y emocionales que genera. Los niños diagnosticados con TEA suelen enfrentar dificultades significativas para expresar claramente sus emociones y necesidades básicas, situación que se agrava especialmente en aquellos que poseen limitaciones en la verbalización. Esta barrera comunicativa no solo afecta negativamente el bienestar emocional del niño, manifestándose a menudo en altos niveles de frustración, ansiedad y comportamientos desafiantes, sino que también dificulta enormemente la intervención oportuna por parte de padres, cuidadores y profesionales de apoyo, quienes suelen depender únicamente de observaciones externas poco precisas.

En contextos terapéuticos y educativos, esta falta de acceso directo y objetivo al estado emocional del niño con TEA limita considerablemente la efectividad de las intervenciones. Los terapeutas y educadores frecuentemente deben inferir el estado emocional de estos niños basándose exclusivamente en comportamientos observables, lo que resulta en interpretaciones a menudo subjetivas e imprecisas. A nivel familiar, esta situación incrementa notablemente el estrés de los cuidadores, particularmente cuando no se encuentran presentes físicamente y desconocen cómo se siente realmente el niño en un momento determinado.

Actualmente, si bien existen diversos métodos alternativos de comunicación como el sistema Picture Exchange Communication System (PECS), estas soluciones presentan limitaciones sustanciales. Por ejemplo, el sistema PECS tradicional demanda un acompañamiento constante del adulto y no ofrece mecanismos integrados que permitan la interpretación automática y objetiva del contexto emocional del usuario. Además, muchas de las soluciones tecnológicas existentes son costosas, complicadas y no están adaptadas

específicamente para su uso por niños pequeños con TEA, lo que limita su accesibilidad y aplicación efectiva en contextos cotidianos.

Ante esta realidad, es imperativo desarrollar soluciones tecnológicas que respondan de forma integral a las necesidades comunicativas y emocionales específicas de los niños con TEA, ofreciendo herramientas que combinen facilidad de uso, autonomía comunicativa, monitoreo emocional objetivo y diseño adaptado a las preferencias como características sensoriales de los usuarios. Esta investigación se enmarca precisamente en la búsqueda de resolver estos retos mediante un enfoque interdisciplinario, integrando tecnologías consolidadas como identificación y captura de datos (AIDC), procesamiento embebido, visión por computadora e inteligencia artificial.

El presente trabajo propone el desarrollo de un dispositivo portátil innovador, diseñado específicamente para mejorar la autonomía comunicativa y emocional de niños con TEA. Este sistema utilizará tarjetas físicas vinculadas a pictogramas mediante un mecanismo de identificación automática, permitiendo a los usuarios comunicar sus necesidades de manera sencilla e intuitiva. Asimismo, contará con una cámara integrada que, mediante visión e inteligencia artificiales avanzada, evaluará continuamente el estado emocional del niño, proporcionando información objetiva y relevante a los cuidadores.

El diseño de este dispositivo está inspirado en personajes infantiles con el objetivo explícito de fomentar una conexión emocional inmediata y aceptación espontánea por parte de los niños usuarios. La selección de un diseño lúdico busca superar la resistencia habitual hacia dispositivos clínicos o tecnológicos convencionales, facilitando una interacción natural y emocionalmente positiva.

La pertinencia y urgencia de esta investigación radican en las brechas aún existentes entre las tecnologías actuales y las necesidades reales como cotidianas de los niños con TEA y sus familias. Al abordar específicamente las limitaciones identificadas en autonomía comunicativa,

monitoreo emocional efectivo y diseño atractivo, esta propuesta tiene el potencial de generar un impacto significativo en la calidad de vida tanto de los niños afectados como de sus entornos familiares y educativos.

1.1 Descripción del Problema

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los niños con TEA presentan desafíos significativos en su desarrollo emocional y comunicacional, siendo especialmente compleja la expresión clara y directa de sus emociones o necesidades [1]. Esta barrera comunicativa, especialmente en niños con limitada o nula verbalización, puede generar altos niveles de frustración, ansiedad o conductas desafiantes provocando episodios no solo afectan su bienestar, sino que también dificultan la intervención oportuna por parte de quienes los rodean, ya que los signos de estrés o malestar muchas veces no se manifiestan de forma evidente ni son fácilmente interpretables por padres, cuidadores o terapeutas [2].

A esto se suma el hecho de que muchas familias no disponen de los recursos económicos, técnicos o formativos necesarios para acceder a soluciones tecnológicas especializadas. Asimismo, los espacios en los que los niños con TEA se desenvuelven cotidianamente, como centros educativos o terapéuticos, no siempre cuentan con conexión estable a internet o personal capacitado para manejar herramientas digitales avanzadas; además, la seguridad y la usabilidad se presentan como factores críticos; los dispositivos deben ser físicamente seguros, resistentes al uso infantil y comprensibles tanto para los niños como para los adultos que los acompañan, lo que impone limitaciones relevantes sobre la viabilidad de muchas propuestas actuales. Estas barreras económicas, técnicas y formativas continúan siendo factores decisivos que restringen la adopción efectiva de tecnologías de asistencia, incluso cuando las soluciones disponibles muestran un alto potencial teórico [3].

En contextos terapéuticos, educativos y familiares, los adultos a cargo suelen enfrentarse a situaciones en las que deben inferir el estado emocional del niño únicamente a

partir de comportamientos observables, lo cual no siempre resulta preciso; esta falta de acceso directo a información emocional compromete la eficacia de las intervenciones, ya que impide adaptar adecuadamente el enfoque a las necesidades internas del niño. Como lo evidencian Cheng et al. (2022), las intervenciones implementadas por padres, quienes pueden actuar como mediadores emocionales más cercanos, logran mejoras significativas en conductas desadaptativas ($g = 0.519$), comunicación ($g = 0.545$) y habilidades sociales ($g = 0.603$), lo que resalta la importancia de contar con mecanismos que permitan interpretar correctamente el estado emocional del niño para brindar una atención más oportuna, empática y personalizada [4]. A nivel familiar, esta dificultad comunicativa incrementa de manera considerable el estrés en los cuidadores; Shahbaz et al., reportaron niveles significativamente altos de estrés en padres de niños con TEA, con una puntuación promedio de 35.4 en madres y 28.7 en padres en la escala estrés percibido (PSS). Además, se evidenció una correlación estadísticamente significativa entre el nivel de estrés y la severidad del autismo ($p < 0.05$), lo que refuerza la relación entre las limitaciones comunicativas del menor y el impacto emocional sostenido en su entorno cercano [5].

Esta situación se ve agravada por la escasa disponibilidad de herramientas accesibles, adaptadas y diseñadas desde una perspectiva centrada en las necesidades reales del niño. Muchas soluciones tecnológicas actuales son costosas, complejas o no están pensadas para niños pequeños, lo que reduce su aplicabilidad. Por otro lado, si bien existen métodos alternativos de comunicación como el sistema PECS en su versión tradicional estos requieren acompañamiento constante, y no integran mecanismos que faciliten la comprensión del contexto emocional del niño por parte del entorno adulto [6].

Ante la dificultad o imposibilidad que presentan los niños con TEA de verbalizar con claridad sus emociones o necesidades, resulta esencial contar con medios que permitan captar y representar de forma objetiva el estado emocional sin depender del lenguaje oral. La

interpretación adecuada de señales no verbales, como expresiones faciales, gestos, posturas o comportamientos atípicos, se vuelve crítica para anticipar situaciones de malestar. Reconocer a tiempo manifestaciones como muecas, retraimiento o cambios conductuales sutiles puede marcar la diferencia entre intervenir de forma temprana o permitir que el malestar escale hacia episodios de mayor complejidad [7], [8]; en paralelo, constituye también un aspecto crucial, que los medios de comunicación alternativos puestos a disposición del niño sean intuitivos, motivadores y acordes a su nivel de desarrollo, de modo que fomenten la participación activa y reduzcan la frustración asociada a las dificultades expresivas.

1.2 Justificación del Problema

El TEA representa una condición del neurodesarrollo que plantea desafíos significativos en la comunicación, la expresión emocional y la interacción social, especialmente en la población infantil. En Ecuador, según datos del Ministerio de Salud Pública (MSP) correspondientes al año 2016, se diagnosticaron 1266 casos dentro del espectro autista, distribuidos entre autismo infantil (792 casos), autismo atípico (254), síndrome de Asperger¹ (205) y síndrome de Rett ²(15) [9]. Esto refleja no solo una cifra extremadamente baja a nivel nacional, sino también una prevalencia limitada del diagnóstico formal. En el país existen 3.344.947 niños menores de 12 años, si se proyecta la proporción observada en los datos del MSP [10], donde el 62,56 % de los casos correspondió a autismo infantil, se estima que al menos 20 926 niños podrían presentar esta condición, enfrentando dificultades para expresarse.

Esta barrera comunicativa genera frustración, crisis emocionales y problemas de conducta, afectando tanto su bienestar como la dinámica familiar, educativa y terapéutica. Este problema adquiere particular relevancia en los niños con TEA no verbales, un grupo

¹ Trastorno caracterizado por alteraciones en la interacción social y patrones conductuales restringidos, repetitivos, sin retraso significativo en el lenguaje ni en el desarrollo cognitivo.

² Trastorno neurológico del desarrollo, de origen genético (mutaciones en el gen MECP2), que se caracteriza por la regresión progresiva de habilidades motoras y comunicativas.

especialmente vulnerable que no desarrolla un lenguaje funcional. Se estima que entre el 25 % y el 35 % de los niños con trastorno del espectro autista permanecen mínimamente verbales o completamente no verbales, lo que limita de forma significativa su capacidad para expresar emociones, establecer vínculos y participar activamente en entornos inclusivos [11]. A su vez, los cuidadores y profesionales enfrentan incertidumbre constante al no contar con herramientas eficaces y accesibles para comprender el estado emocional del niño. Esta brecha dificulta una intervención oportuna y adecuada, provocando un desgaste emocional en padres y terapeutas, así como un rezago en el progreso del menor. Este problema adquiere una dimensión adicional cuando los cuidadores no están presentes; la comunicación remota y tecnologías portátiles que monitorean señales fisiológicas, que permiten alertar a los cuidadores sobre niveles elevados de estrés en tiempo real, se presentan como herramientas valiosas [12].

Existen vacíos importantes en el acceso a herramientas tecnológicas adaptadas a las necesidades de esta población, y muchas de las soluciones actuales son costosas, poco escalables o no diseñadas para un uso autónomo por parte del niño. Por lo tanto, investigar y desarrollar alternativas más empáticas y accesibles se convierte en una prioridad, especialmente en países en vías de desarrollo como Ecuador.

Además, el problema es susceptible de observación, análisis y medición objetiva, ya que involucra variables cuantificables como la frecuencia de episodios de frustración, el nivel de estrés en el niño, la eficacia en la comunicación no verbal y la carga emocional percibida por los cuidadores. Esto permite validar de forma científica los avances que se logren en este campo y establecer mejoras tangibles en el tratamiento de niños con TEA.

Desde el punto de vista institucional, el interés por abordar esta problemática responde a la necesidad de fomentar soluciones innovadoras en salud mental y neurodiversidad, mediante la colaboración interdisciplinaria entre psicología, ingeniería y diseño; el

compromiso nace de la empatía y la convicción de que todo niño merece ser comprendido, incluso cuando no puede expresarse con palabras.

Finalmente, el problema es viable de abordar con los recursos disponibles, bases teóricas y tecnológicas suficientes, herramientas de desarrollo accesibles y un entorno institucional dispuesto a acompañar la implementación de soluciones. La investigación y desarrollo de alternativas enfocadas en este problema puede generar un impacto positivo, duradero y medible en la vida de muchas familias, y aportar nuevo conocimiento al campo de la tecnología aplicada a la inclusión.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Desarrollar un sistema portátil de comunicación aumentativa y alternativa basado en tecnologías de identificación automática de pictogramas físicos y monitoreo emocional mediante visión e inteligencia artificial, con un diseño lúdico, para mejorar la autonomía comunicativa y emocional en niños con TEA.

1.3.2 *Objetivos específicos*

1. Analizar alternativas tecnológicas de identificación automática, plataformas embebidas, visión por computadora e inteligencia artificial, con el fin de seleccionar los componentes adecuados para el desarrollo de un dispositivo funcional y adaptado a niños con TEA.
2. Ejecutar un sistema de monitoreo emocional mediante cámaras y algoritmos de visión e inteligencia artificial para evaluar continuamente el estado emocional del niño, identificando situaciones de estrés o frustración.
3. Desarrollar un diseño físico, que sea atractivo, amigable y adaptado a las características sensoriales y emocionales de los niños con TEA, promoviendo una mayor aceptación y uso espontáneo del dispositivo.

1.4 Marco teórico

El enfoque de este trabajo es esencialmente tecnológico-aplicado, ya que parte de la identificación de una necesidad concreta, mejorar la comunicación y monitoreo emocional en niños con TEA mediante herramientas tecnológicas accesibles y adaptadas.

En este caso, el sistema propuesto se basa en tecnologías consolidadas como el reconocimiento facial, el uso de *Optical Flow* para analizar expresiones dinámicas, los sistemas AIDC y el modelo PECS, ampliamente validado en contextos terapéuticos. Investigaciones internacionales respaldan esta perspectiva, como los estudios de Scassellati et al., quienes demuestran el valor de los robots sociales y dispositivos interactivos en el apoyo a terapias para niños con TEA, integrando visión por computadora y estimulación multisensorial [13].

1.4.1 Perspectiva educativa y constructivista

Aunque el núcleo del proyecto es tecnológico, su impacto se proyecta en el ámbito educativo y comunicativo, por lo que puede vincularse a una perspectiva constructivista del aprendizaje. Esta perspectiva, representada por autores como Piaget y Vygotsky, sostiene que el conocimiento se construye activamente mediante la interacción del sujeto con su entorno, especialmente cuando existen mediadores que facilitan dicho proceso [14].

En el contexto del TEA, donde existen desafíos en la comprensión y expresión emocional, la tecnología puede cumplir el rol de mediador, brindando un canal de comunicación visual, auditivo y físico, adaptado a las necesidades sensoriales del niño. El sistema propuesto, al utilizar tarjetas PECS físicas con respuesta visual y auditiva inmediata, permite al niño construir mensajes, expresar necesidades e intenciones comunicativas de forma autónoma, fortaleciendo su autoestima y participación.

Este tipo de interacción favorece el desarrollo de habilidades cognitivas y sociales, no solo por la función directa del dispositivo, sino por la forma en que se convierte en un puente entre el niño y su entorno. Según Boesch et al., los sistemas de comunicación visual basados

en interacción contextualizada pueden mejorar significativamente la intencionalidad comunicativa en niños con TEA, especialmente si se integran con retroalimentación emocional [15].

1.4.2 Trastorno del Espectro Autista

El TEA es una condición del neurodesarrollo que afecta la comunicación, la interacción social y la flexibilidad de comportamiento. Según la quinta edición del Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales (DSM-5), el TEA se caracteriza por déficits persistentes en la comunicación social y en la interacción social, junto con patrones restrictivos y repetitivos de comportamiento, intereses o actividades [16]. La Clasificación Internacional de Enfermedades en su undécima versión (ICD-11), adoptada por la Organización Mundial de la Salud, también reconoce el TEA como un espectro, haciendo énfasis en la variabilidad de manifestaciones y necesidades de apoyo [17].

En las últimas dos décadas, la prevalencia del TEA ha mostrado una tendencia creciente a nivel global. Según estimaciones recientes de la OMS, 1 de cada 100 niños se encuentra dentro del espectro autista [18]. Esta evolución ha impulsado una mayor inversión en investigación, inclusión educativa y el desarrollo de herramientas de apoyo, particularmente enfocadas en la comunicación funcional y el fortalecimiento de las habilidades socioemocionales; la Unión Europea a través del programa Erasmus+, financiaron proyectos como *Teacher Training and Attention in Autism* (TTAA), responsable del desarrollo de *Computerized Progressive Attentional Training* (CPAT), una aplicación de juego interactivo gratuito diseñado para que niños con TEA entrenen habilidades atencionales [19] y proyectos como DiGiTool que capacita a docentes de educación primaria y secundaria para implementar Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) inclusivas [20].

Una de las principales dificultades observadas en niños con TEA es la ausencia o alteración significativa del lenguaje verbal. Incluso aquellos niños que desarrollan la capacidad

de hablar pueden presentar limitaciones importantes en la pragmática del lenguaje, es decir, en su uso funcional dentro de contextos sociales. A esto se suman alteraciones en la comunicación no verbal, como la expresión facial, el contacto visual, la gestualidad y la reciprocidad emocional [21]. Estas dificultades comprometen la capacidad del niño para expresar necesidades, se ha demostrado que los déficits en el lenguaje pragmático en niños con TEA están asociados con una mayor incidencia de comportamientos problemáticos, dificultades en la relación con sus pares y aislamiento social prolongado [22].

En respuesta a estas barreras, el uso de sistemas aumentativos y alternativos de comunicación (SAAC) ha sido ampliamente promovido por instituciones europeas especializadas en educación inclusiva. Dichos sistemas, que incluyen desde gestos hasta tecnologías de alta complejidad, buscan compensar las dificultades comunicativas y brindar al niño canales alternativos de expresión. Dentro de los SAAC, el sistema PECS ha sido uno de los más utilizados y validados, especialmente en contextos europeos donde se han implementado adaptaciones culturales y lingüísticas específicas [23].

Figura 1.1

Sistemas aumentativos y alternativos de comunicación



Nota: Se evidencia el uso de las SAAC adaptadas a diversos grupos de niños.

Estudios liderados por el *University College London* y la *University of Manchester* han demostrado que la implementación temprana de PECS puede mejorar significativamente las

habilidades de petición, atención conjunta y reducción de conductas disruptivas en niños con TEA [24]. Además, la evidencia recogida por *Autism Europe* y otras organizaciones continentales respalda la importancia de incluir herramientas visuales estructuradas como parte de un enfoque integral de apoyo, especialmente en contextos escolares y terapéuticos [25]. No obstante, este tipo de evidencia aún es escasa en América Latina y, particularmente, en Ecuador; un estudio realizado en entornos pediátricos reveló que el conocimiento sobre las prácticas de detección temprana del TEA sigue siendo limitado, una situación común en países de ingresos bajos y medios [26]. Esta falta de respaldo empírico local y la ausencia de protocolos sistemáticos de cribado dificultan la identificación oportuna y el acceso a intervenciones eficaces en las etapas más críticas del desarrollo.

1.4.3 *Sistema PECS como modelo estructurado de CAA*

La Comunicación Aumentativa y Alternativa (CAA) comprende un conjunto de estrategias, sistemas y herramientas diseñadas para compensar temporal o permanentemente las dificultades de comunicación en personas con discapacidades. La CAA no busca reemplazar el habla, sino complementarla y potenciarla, facilitando el acceso a la interacción social, el aprendizaje y la expresión emocional [27]. En el contexto del TEA, donde las alteraciones del lenguaje pragmático y expresivo son frecuentes, la CAA cumple un rol esencial para promover la inclusión y la autonomía comunicativa donde se distinguen sistemas sin ayuda (como gestos y señas) y con ayuda (como tableros de pictogramas, dispositivos generadores de voz o aplicaciones digitales).

El *Picture Exchange Communication System* (PECS), introducido por Bondy y Frost en 1990, se inscribe dentro de esta última categoría, utilizando estímulos visuales para establecer un sistema estructurado de intercambio comunicativo, el usuario aprende a entregar una imagen de un objeto o acción deseada a un interlocutor como medio para expresar una intención comunicativa. Su base conceptual radica en el condicionamiento operante, el análisis

conductual aplicado (ABA) y la motivación intrínseca, busca fomentar la comunicación funcional mediante Este sistema se estructura en seis fases progresivas que inician con el intercambio básico de imágenes y evolucionan hacia la construcción de frases, uso espontáneo, respuestas a preguntas y comentarios funcionales. Una de sus características clave es que no requiere habilidades lingüísticas previas, lo que lo convierte en una herramienta accesible para personas no verbales o con lenguaje limitado, centrándose no solo en el desarrollo del habla, sino en establecer una vía de comunicación eficaz y autónoma desde etapas tempranas [28].

Figura 1.2.

Picture exchange communication system



Numerosos estudios han respaldado la eficacia del PECS como sistema de comunicación funcional. Una revisión sistemática realizada por Flippin, Reszka y Watson, que abarcó múltiples ensayos controlados, concluyó que el uso de PECS produce mejoras significativas en la iniciación comunicativa, el uso de símbolos visuales y, en algunos casos, incluso en la producción del habla [29]. De manera complementaria, Boesch et al. [15] exploraron la efectividad del PECS frente a otras aplicaciones de comunicación aumentativa, encontrando que su uso puede facilitar interacciones más naturales y contextualmente apropiadas, especialmente cuando se implementa con fidelidad y entrenamiento adecuado.

Desde el contexto europeo, diversas investigaciones han reforzado la validez del PECS, tanto en niños como en adultos con discapacidades comunicativas. Un ejemplo destacado es el trabajo de Hughes-Lika y Chiesa, quienes realizaron una revisión exhaustiva sobre la aplicación del sistema PECS en adultos sin comunicación funcional; concluyendo que el PECS puede mantenerse como una herramienta efectiva incluso fuera del entorno escolar, siempre que existan apoyos continuos y mediadores capacitados [30].

Otro estudio europeo relevante es el de Simeoli et al., que comparó la efectividad del PECS con la de dispositivos generadores de voz (SGD, por sus siglas en inglés) en niños con TEA. La investigación reveló que, si bien ambos sistemas mostraron beneficios en la expresión de necesidades, el PECS fue más efectivo en la iniciación comunicativa temprana y en el fortalecimiento del contacto visual y la atención conjunta, elementos esenciales en el desarrollo de habilidades sociales [31].

Un aspecto fundamental que refuerza el valor del PECS es la cantidad de estudios centrados en su aplicación con niños en edad temprana. En una investigación desarrollada por Gordon et al., realizada en varios centros escolares del Reino Unido, se evaluó la implementación del PECS en niños con TEA de entre 4 y 10 años; los resultados mostraron mejoras significativas en las habilidades de petición, el uso espontáneo de símbolos y la reducción de comportamientos disruptivos [32]. Este estudio subraya que la efectividad del sistema es especialmente alta cuando se introduce en las primeras etapas del desarrollo, lo cual coincide con la tendencia europea de intervención temprana como factor clave en la atención a la diversidad.

En relación con la estructura del sistema, el PECS no es una colección arbitraria de imágenes, sino que sigue una organización lógica basada en contextos funcionales. Los pictogramas utilizados se clasifican generalmente en categorías como objetos de uso cotidiano,

alimentos, acciones, personas, lugares y emociones. Esta clasificación permite que los usuarios encuentren de manera intuitiva la imagen que representa lo que desean comunicar.

Figura 1.3

Ejemplos de pictogramas usados en el sistema PECS



Asimismo, existen conjuntos organizados de pictogramas diseñados para contextos específicos como el entorno escolar, tal como se muestra en la Figura 1.4.

Figura 1.4

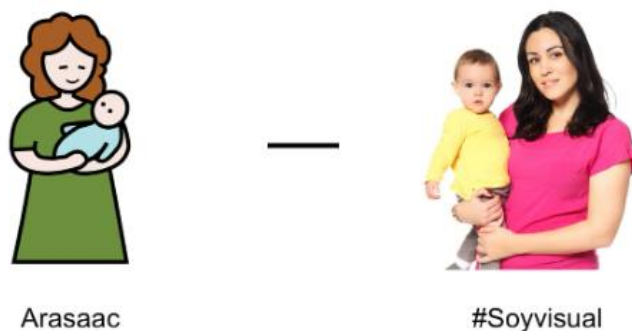
Pictogramas usados en el contexto escolar



En muchos casos, especialmente en aplicaciones europeas, los pictogramas son diseñados con base en estándares internacionales como los de ARASAAC (Centro Aragonés para la Comunicación Aumentativa y Alternativa), ampliamente difundido en el ámbito europeo por su enfoque accesible, coherente y visualmente claro [33].

Figura 1.5

Estandarización de los pictogramas



Nota: Algunos recursos permiten asociar los pictogramas a imágenes reales para facilitar la generalización del significado.

A pesar de estos beneficios ampliamente documentados, investigaciones como la de Bakhtiarvand et al. también han señalado ciertas limitaciones en la implementación del PECS. Entre ellas se encuentran la necesidad de formación específica de los mediadores (padres, docentes, terapeutas), la dificultad para generalizar las habilidades comunicativas a contextos no estructurados, y la tendencia a depender excesivamente del apoyo visual en etapas avanzadas si no se promueve la transición hacia el habla o sistemas mixtos [34]. A pesar de estas limitaciones, múltiples estudios coinciden en que la intervención temprana, el entrenamiento intensivo y la fidelidad en la aplicación del protocolo son claves para maximizar los beneficios del PECS [29], [31].

1.4.4 Robótica social y tecnologías para apoyo emocional en niños con TEA

La robótica social es un campo de la ingeniería que se enfoca en el diseño e implementación de robots capaces de interactuar con las personas en contextos sociales, emocionales y educativos. A diferencia de la robótica industrial, cuya finalidad es la automatización de tareas técnicas, la robótica social busca promover la comunicación, la cooperación y la empatía entre humanos y robots. Estos sistemas incorporan elementos de inteligencia artificial, procesamiento del lenguaje natural, sensores afectivos y expresividad física (como gestos, voz y rostro) para establecer interacciones significativas y adaptativas [35].

En el caso de los niños con TEA, la robótica social ha demostrado ser una herramienta altamente efectiva para el desarrollo de habilidades comunicativas, emocionales y sociales. Uno de los principales motivos de su eficacia es que los robots sociales ofrecen una interacción predecible, estructurada y emocionalmente neutra, lo que facilita la participación de niños con TEA que suelen experimentar ansiedad o sobrecarga sensorial ante la complejidad de las interacciones humanas [36].

Diversos estudios europeos han documentado la utilidad de estos sistemas en entornos educativos y terapéuticos. Un ejemplo es el emblemático Kaspar, un robot humanoide diseñado por la *University of Hertfordshire* (Reino Unido), específicamente para niños con autismo. Kaspar es capaz de expresar emociones simples, mantener contacto visual, realizar movimientos suaves y emitir frases cortas, lo que le permite facilitar actividades como juegos de imitación, reconocimiento emocional y toma de turnos. En una serie de estudios longitudinales, se observó que la interacción regular con Kaspar incrementó la atención conjunta, la empatía básica y la intención comunicativa en niños de entre 4 y 10 años [37].

Figura 1.6

Robot Kaspar interactuando con un niño con TEA



Otro caso destacado es QTrobot, desarrollado por LuxAI (Luxemburgo), que combina expresiones faciales digitales, voz sintetizada y brazos articulados. Este robot ha sido evaluado en contextos terapéuticos en Francia, Bélgica, Alemania y otros países de la UE, y los resultados muestran mejoras notables en la atención sostenida, la respuesta a instrucciones verbales y la tolerancia a situaciones sociales nuevas. En estudios comparativos, QTrobot demostró ser incluso más efectivo que tabletas o materiales visuales planos, gracias a su presencia física tridimensional y su capacidad para modelar emociones de manera clara [38].

De forma complementaria a los modelos humanoides, existen robots cuyo diseño apuesta por lo zoomórfico o abstracto, buscando reducir la sobrecarga sensorial mediante formas suaves y expresiones emocionales simples. Un ejemplo representativo es JARI, que presenta una apariencia zoomórfica ambigua, acompañada de accesorios sensoriales cuidadosamente seleccionados. Este enfoque de diseño favorece una interpretación intuitiva de las emociones por parte del niño, facilita interacciones prolongadas y fomenta respuestas emocionales positivas como el contacto visual y los gestos sociales [39]. En una línea similar, el robot Moxie adopta una estética claramente artificial pero amigable, con una cabeza en forma

de lágrima, pantalla animada y una voz generada mediante técnicas de aprendizaje automático. Su apariencia evita el fenómeno del *uncanny valley*, proporcionando una experiencia visual cálida y no intimidante. Este diseño ha demostrado reducir la ansiedad en niños con alta sensibilidad emocional, promoviendo una interacción activa mediante misiones narrativas estructuradas que estimulan el compromiso emocional y el aprendizaje [40]. Por otro lado, el robot terapéutico Paro, con forma de cría de foca, aporta una experiencia principalmente táctil. Aunque no fue diseñado específicamente para el TEA, su textura suave y su comportamiento afectivo favorecen la creación de vínculos emocionales calmantes. Este caso evidencia cómo las características físicas, como la forma, el tacto y la expresividad, pueden influir significativamente en la aceptación y eficacia terapéutica de los dispositivos tecnológicos en entornos clínicos [41].

También es relevante mencionar el proyecto europeo *DREAM (Development of Robot-Enhanced therapy for children with Autism spectrum disorders)*, financiado por el programa Horizonte 2020 de la Comisión Europea. Esta iniciativa promovió la implementación de robots sociales en terapias clínicas reales y desarrolló una arquitectura de IA capaz de adaptar el comportamiento del robot a las reacciones del niño en tiempo real. El proyecto concluyó que los robots pueden actuar como mediadores entre el terapeuta y el niño, facilitando la participación y reduciendo el rechazo inicial a la terapia tradicional [42].

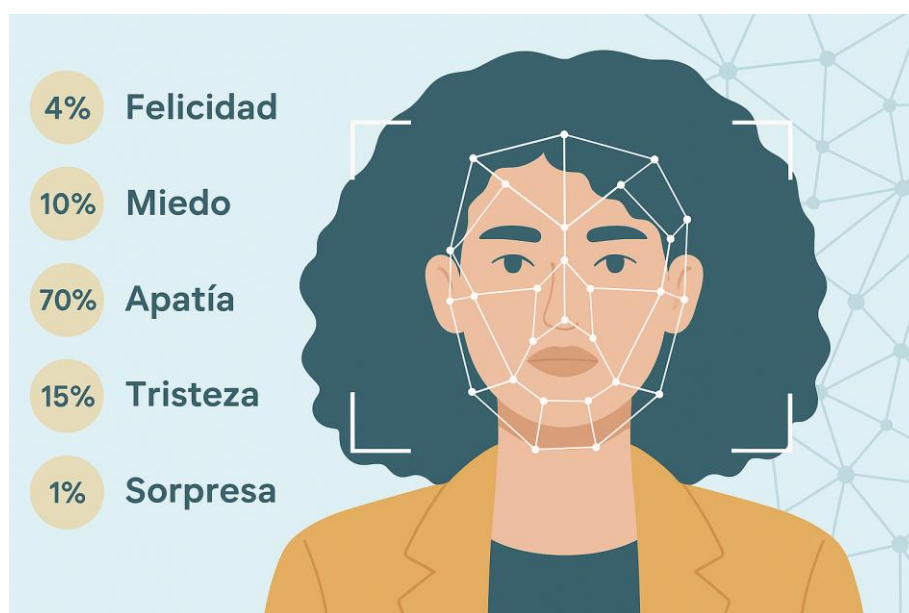
En general, los beneficios observados en la literatura incluyen: incremento del contacto visual, mejora de la atención conjunta, aumento de la motivación para participar, reducción de conductas disruptivas, y facilitación del reconocimiento emocional. Un aspecto clave en el éxito de estas interacciones es el diseño físico del robot: las expresiones faciales amigables, la voz suave, el tamaño no intimidante y la coherencia entre gestos y emociones son elementos que marcan una diferencia significativa [36], [37].

1.4.5 *Visión por computadora e inteligencia artificial para análisis emocional*

En los últimos años, la combinación de visión por computadora e inteligencia artificial ha abierto nuevas posibilidades en el análisis de emociones humanas, particularmente en contextos de salud mental y educación especial. Esta sinergia permite la recolección y procesamiento automático de señales visuales como expresiones faciales, microexpresiones, movimiento ocular y posturas corporales, las cuales pueden ser utilizadas para inferir estados emocionales de forma no invasiva y en tiempo real [43].

Figura 1.7

Ejemplificación de la combinación de visión por computadora e IA



El uso de sistemas inteligentes para el reconocimiento emocional representa una herramienta poderosa para el acompañamiento terapéutico y la personalización de intervenciones. Investigaciones han mostrado que los niños con TEA presentan patrones diferenciados en la expresión facial de emociones, lo que complica la interpretación por parte de educadores o cuidadores. Ante esta situación, los sistemas de visión por computadora ofrecen una alternativa objetiva, automatizada y consistente [44].

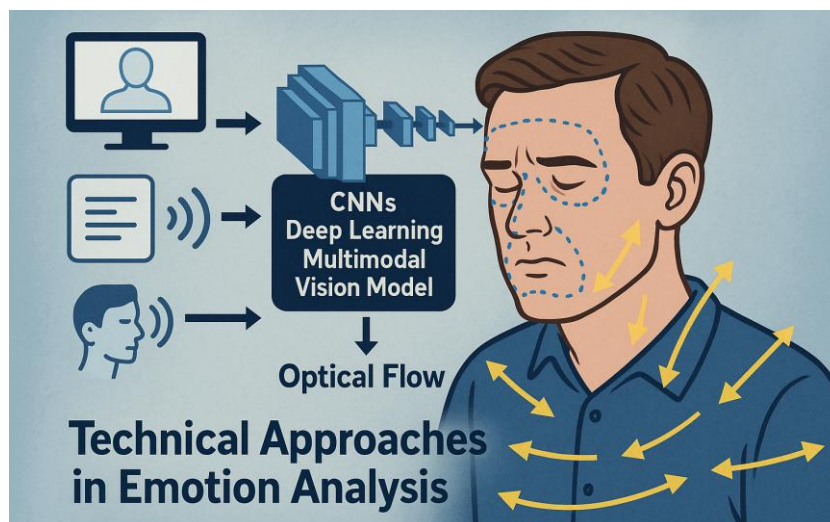
Desde el ámbito europeo, se han desarrollado iniciativas de alto impacto que integran estas tecnologías en entornos clínicos y educativos. Por ejemplo, el proyecto *ASC-Inclusion*,

financiado por la Comisión Europea, combinó visión por computadora, reconocimiento de voz y análisis corporal para crear una plataforma interactiva destinada a enseñar habilidades emocionales a niños con TEA. Mediante el análisis automático de las expresiones faciales y el tono de voz del niño, el sistema podía adaptar dinámicamente las actividades, mejorando la implicación emocional y la comprensión de los sentimientos propios y ajenos [45].

La Universidad de Cambridge y el *Autism Research Centre*, donde se ha desarrollado un software basado en *deep learning* capaz de detectar emociones básicas (alegría, tristeza, miedo, etc.) en grabaciones de video de niños con TEA. Este sistema fue validado con base en datasets clínicos y mostró un alto grado de precisión en el reconocimiento emocional incluso en niños con expresividad reducida. Esta tecnología ha sido integrada experimentalmente en tabletas y dispositivos móviles como parte de programas piloto en escuelas europeas [46].

En cuanto a los enfoques técnicos, los sistemas modernos de análisis emocional se basan en arquitecturas de redes neuronales convolucionales (CNNs), aprendizaje profundo y modelos de visión multimodal, que combinan entrada visual, auditiva y contextual para aumentar la precisión. Además, se han incorporado algoritmos de flujo óptico para analizar el movimiento facial y corporal, permitiendo detectar cambios sutiles que indican estados como ansiedad, estrés o aburrimiento [47].

La literatura coincide en que el uso ético, transparente y seguro de estas tecnologías es fundamental, especialmente cuando se trabaja con poblaciones vulnerables como la infancia con TEA. Por ello, las estrategias de implementación deben garantizar la protección de la privacidad, la minimización de riesgos y el consentimiento informado por parte de los cuidadores [48].

Figura 1.8*Enfoque técnico para detectar estados emocionales*

El proyecto EMBOA (robot terapéutico con reconocimiento emocional), el uso del reconocimiento emocional mediante visión por computadora, integra cámaras en robots sociales para analizar expresiones faciales en tiempo real. Su principal objetivo es establecer un "bucle afectivo", es decir, una interacción emocional continua y adaptativa durante las sesiones terapéuticas. Estudios derivados de EMBOA reportan una precisión global del 88,3 % en el reconocimiento automático de emociones mediante visión por computadora en contextos terapéuticos con niños con TEA. Emociones como la felicidad y la tristeza alcanzan niveles de precisión superiores al 90 %, mientras que otras expresiones como ira, sorpresa y miedo superan sistemáticamente el 85 %, lo que evidencia una fiabilidad elevada en escenarios estructurados y controlados [49].

Otro sistema relevante es AEGIS (*Augmented-reality Expression Guided Interpretation System*), el cual utiliza realidad aumentada junto con redes neuronales convolucionales para detectar emociones faciales en tiempo real. AEGIS proporciona apoyo visual inmediato a personas con TEA durante interacciones sociales, facilitando su interpretación emocional. Aunque no se detallan cifras específicas sobre su precisión, se ha reportado como fiable y altamente integrable en dispositivos como tabletas o gafas inteligentes [50]. Asimismo, el

sistema *Superpower Glass*, desarrollado inicialmente para *Google Glass* por el equipo de Catalin Voss, permite analizar en tiempo real las emociones de personas cercanas al usuario y ofrece retroalimentación visual inmediata mediante símbolos o mensajes en pantalla. Evaluaciones clínicas en entornos domésticos y terapéuticos han confirmado mejoras significativas en habilidades sociales y atención conjunta en niños con TEA, pese a que los estudios no reportan niveles exactos de precisión. No obstante, los resultados destacan un impacto terapéutico positivo en situaciones reales del día a día [51].

A pesar del potencial demostrado, estos sistemas presentan limitaciones importantes. La mayoría se centran exclusivamente en emociones básicas, requieren calibración individualizada debido a las variaciones expresivas propias del TEA, y suelen carecer de mecanismos de integración con plataformas de comunicación remota que permitan alertar a padres o cuidadores sobre cambios emocionales relevantes en tiempo real.

1.4.6 Integración tecnológica en entornos de apoyo

El diseño e implementación de tecnologías accesibles es un componente central en la creación de soluciones inclusivas para personas con TEA. En este contexto, los sistemas embebidos, dispositivos computacionales especializados integrados en el entorno físico, ofrecen una plataforma eficaz para desarrollar soluciones adaptadas, autónomas y de bajo consumo energético. Estos sistemas permiten la ejecución local de algoritmos, el manejo de sensores y actuadores, y la interacción directa con el usuario, sin requerir conexión permanente a internet o infraestructuras complejas [52].

Los dispositivos embebidos han sido ampliamente utilizados en el desarrollo de herramientas asistivas para personas con necesidades especiales, incluyendo ayudas visuales, sistemas de comunicación aumentativa, mecanismos de monitoreo fisiológico y juguetes interactivos. Su ventaja principal radica en su portabilidad, bajo costo, personalización y capacidad de operar en tiempo real. Tecnologías como Raspberry Pi, Arduino, NVIDIA Jetson

Nano y otros sistemas compactos son frecuentemente utilizados en entornos educativos y clínicos por su flexibilidad y escalabilidad [53].

Se han desarrollado múltiples iniciativas que integran sistemas embebidos en soluciones inclusivas para niños con TEA. El proyecto "AutiPlan", originado en los Países Bajos, propone dispositivos portátiles con pantallas táctiles para ayudar a los niños a organizar sus rutinas diarias mediante pictogramas. Otro caso relevante es el de "*Pictogram Room*", una iniciativa española desarrollada por investigadores de la Universidad de Valencia, que utiliza sistemas embebidos combinados con sensores de movimiento para permitir que los niños interactúen con entornos virtuales a través del reconocimiento corporal, promoviendo la adquisición de habilidades motrices y cognitivas [54].

Un componente crucial en estos sistemas es la accesibilidad, entendida como el diseño de soluciones que puedan ser utilizadas de forma efectiva por personas con distintas capacidades. En el caso de los niños con TEA, esto implica considerar factores como la simplicidad de la interfaz, el uso de estímulos visuales claros, la posibilidad de personalización, la retroalimentación multisensorial (visual, sonora, táctil) y la adaptabilidad a las necesidades individuales. El diseño universal y centrado en el usuario es una práctica ampliamente respaldada en la literatura europea para asegurar que la tecnología no represente una barrera, sino un facilitador del desarrollo [52].

1.4.7 Estrés en niños con TEA

Los niños con TEA suelen presentar dificultades tanto en la expresión emocional como en la autorregulación. Conceptualmente, el estado emocional puede definirse como una combinación de componentes fisiológicos, conductuales y cognitivos que reflejan la respuesta ante estímulos internos o externos. En el caso del TEA, estos estados pueden no manifestarse mediante patrones típicos, lo que complica su interpretación por parte de cuidadores y profesionales [55].

La expresividad facial, contacto visual, tono de voz, movimientos repetitivos, y patrones de atención, son elementos esenciales para la detección de estados emocionales. Desde un punto de vista conceptual, la dificultad para expresar el estrés de forma convencional, como a través del llanto, gestos o verbalizaciones, implica que se deban considerar indicadores alternativos, como la expresividad facial atípica, conductas repetitivas, cambios en el tono de voz, contacto visual evasivo, o alteraciones en el patrón de atención. Estos elementos se vuelven vitales no solo para la comprensión del estado emocional, sino también para el diseño de sistemas tecnológicos que puedan detectarlos e interpretarlos adecuadamente.

Figura 1.9

Inexpresividad de los niños con TEA



1.4.8 Tecnologías y análisis emocional

La visión por computadora es un campo de la inteligencia artificial que permite a los dispositivos interpretar información visual proveniente del entorno [56]. Aplicada al análisis emocional, esta tecnología posibilita la detección automática de expresiones faciales y microexpresiones, que han sido validadas como indicadores de estados emocionales en estudios con población infantil. Mediante algoritmos de detección y clasificación, es posible inferir niveles de estrés o estados de ánimo, lo cual permite adaptar dinámicamente el comportamiento de dispositivos tecnológicos en función del usuario.

La inteligencia artificial en entornos educativos y clínicos se orienta hacia la personalización de intervenciones, la adaptación del entorno a las necesidades del usuario y la recolección de datos para apoyar la toma de decisiones terapéuticas. Modelos como redes neuronales convolucionales o clasificadores basados en aprendizaje supervisado son comúnmente empleados para interpretar señales visuales o fisiológicas en tiempo real. Estos modelos se entrenan con datos etiquetados para reconocer patrones específicos, como expresiones asociadas al estrés, proporcionando una base empírica para adaptar respuestas tecnológicas.

Por otra parte, los sistemas embebidos son plataformas computacionales diseñadas para ejecutar tareas específicas dentro de un entorno determinado. Integran hardware y software en un solo dispositivo que puede interactuar con sensores, cámaras, pantallas y módulos de comunicación [52]. En aplicaciones inclusivas, estos sistemas permiten desarrollar soluciones portátiles, de bajo consumo, accesibles y adaptables. La accesibilidad tecnológica implica no solo la facilidad de uso, sino también la capacidad de adaptarse a las capacidades sensoriales, cognitivas y motoras del usuario final.

1.4.9 Realidad aumentada personalizada para PECS

Khoirunnisa et al. examinó el efecto de un sistema PECS digital personalizado con realidad aumentada en niños con TEA enfocado en mejorar habilidades de respuesta y comentarios³. La intervención consistió en sesiones de 20 a 30 minutos usando una aplicación AR basada en PECS y un libro marcador que activaba objetos 3D y tarjetas digitales en pantalla, obteniendo resultados estadísticamente significativos.

- Las habilidades para responder preguntas mejoraron hasta en un 83%, con tamaños de efecto (Cohen's d) entre 1.76 y 2.47 según el participante.

³ El estudio se realizó en NASOM, Melaka, Malasia, con una muestra de cuatro participantes entre 7 y 12 años, con distintos niveles de habilidad comunicativa.

- Las habilidades para emitir comentarios relevantes aumentaron en un 122%, con promedios de comentarios relevantes pasando de 3 (SD = 0.89) a 6.67 (SD = 2.25) y un valor de $p = 0.00272$.

El estudio demuestra que la personalización del contenido en función del nivel comunicativo del niño potencia el aprendizaje, permitiendo progresar desde frases de dos palabras hasta oraciones completas. Además, la AR facilitó una experiencia visual e interactiva que aumentó la motivación, participación y retención de habilidades [57].

Desde una perspectiva más amplia, Koumpouros (2024) presentó una revisión sistemática de 49 estudios entre 2013 y 2023 sobre el uso de AR en intervenciones para personas con TEA. Los resultados indican beneficios consistentes en áreas como interacción social, comunicación verbal y rendimiento académico, especialmente cuando se emplean dispositivos como smartphones, *tablets* o gafas inteligentes en entornos escolares [58].

1.4.10 *Aplicación L-PECS*

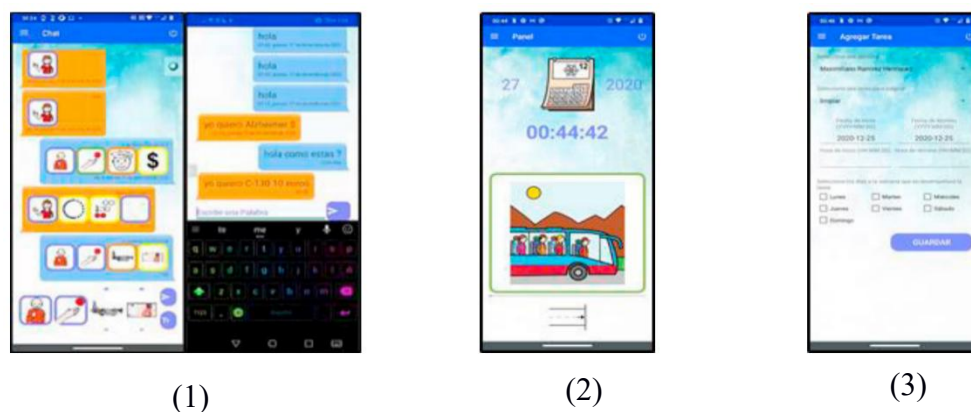
La digitalización de las SAAC ha permitido el desarrollo de herramientas tecnológicas orientadas a mejorar la inclusión de personas con TEA en entornos educativos y laborales. Una de estas herramientas es L-PECS, una aplicación móvil diseñada para implementar el protocolo PECS de forma digital, especialmente adaptada para contextos de trabajo inclusivos y escenarios de formación profesional.

El estudio desarrollado por Lagos et al., presentan una aproximación sistemática a la creación y validación de L-PECS, tomando en cuenta tanto el diseño de interacción como la aplicabilidad real en personas adultas con TEA. Este enfoque busca transformar la estructura física del PECS tradicional en una experiencia digital accesible, predictiva y adaptable. En todo caso, L-PECS fue desarrollada en Chile en el año 2020 para dispositivos Android (versión mínima 4.0), y se sustenta en tres capas funcionales principales:

1. Capa de comunicación: permite la interacción en tiempo real entre dos dispositivos. El primer dispositivo (*Smartphone-1*), operado por una persona con TEA, utiliza pictogramas para construir oraciones, asistido por inteligencia artificial que predice secuencias comunicativas. El segundo dispositivo (*Smartphone-2*) traduce esos mensajes al lenguaje escrito convencional.
2. Capa de actividades: posibilita la programación de tareas secuenciales con seguimiento temporal, permitiendo al usuario seguir instrucciones organizadas cronológicamente dentro de su jornada laboral.
3. Capa de gestión y monitoreo: da al profesional de apoyo la capacidad de asignar, modificar y supervisar actividades, además de incorporar nuevos pictogramas personalizados desde una base centralizada.

Figura 1.10

Capas funcionales de L-PECS



El estudio se estructuró en torno a una prueba experimental que involucró a 20 usuarios con diagnósticos variados de TEA, cuyas edades oscilaban entre los 16 y los 40 años. Se evaluaron tres aspectos clave del sistema:

Figura 1.11

Aspectos del sistema considerados para el estudio

TUI (Tests de Interfaz de Usuario)	Organización visual, claridad, uso de colores, pictogramas y coherencia gráfica.
TAC (Tests de Acción del Usuario)	Tiempo en segundos para realizar tareas como ingreso a la aplicación o envío de mensajes.
TUA (Tests de Usabilidad y Accesibilidad)	Evaluación del tamaño de interfaz táctil, condiciones de iluminación y presentación de información. Presentar de forma gráfica.

Los datos fueron recolectados mediante cuestionarios estructurados, análisis de interacción y observación directa del uso de la aplicación; los resultados mostraron que la mayoría de los participantes obtuvo calificaciones altas en cuanto a usabilidad e interacción. Por ejemplo, en los apartados de accesibilidad (TUA), la mayoría calificó con 9 o 10 puntos en aspectos como claridad visual y facilidad para seleccionar pictogramas. Sin embargo, se identificaron desafíos técnicos en tareas como la identificación del botón de inicio de sesión (test 1-B) y el tiempo para desglosar actividades (test 3-B), lo cual fue atribuido a problemas de diseño en la navegación inicial.

El estudio evidenció que L-PECS mejora la persistencia de la información comunicacional, reduce la dependencia de materiales físicos y favorece la autonomía del usuario al momento de expresar necesidades y seguir instrucciones. Además, su arquitectura modular facilita la adaptación a distintos perfiles sensoriales y niveles de alfabetización.

También se identificaron oportunidades de mejora, como la necesidad de una interfaz más intuitiva y la posible integración futura con asistentes virtuales como Siri, Google Home o dispositivos como Robot Pepper, con el fin de automatizar aún más la supervisión remota de actividades [55].

1.4.11 Dispositivos embebidos y robótica aplicada - Caso robot JARI

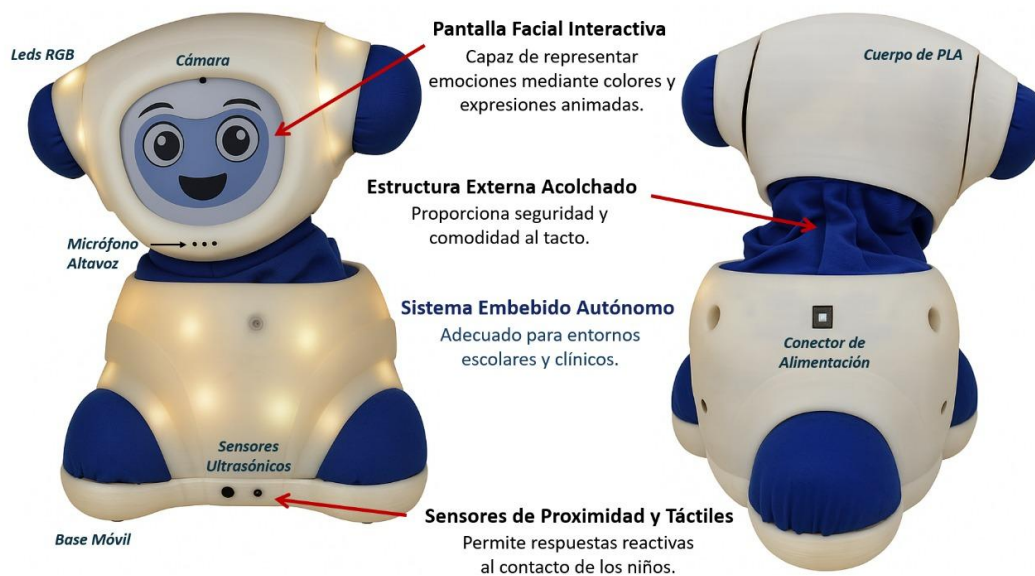
La robótica social ha emergido como una herramienta prometedora para el apoyo emocional y comunicativo en niños con TEA. En particular, el desarrollo de dispositivos embebidos con forma de muñeco interactivo, como el robot JARI, ha mostrado un impacto significativo en la mejora de la interacción emocional y social.

Uno de los estudios más representativos en el contexto europeo es el desarrollado por Madrid Ruiz et al., donde se evalúa la eficacia del robot JARI en escenarios escolares con niños españoles de entre 6 y 8 años con diagnóstico de TEA.

JARI (acrónimo de “Juguete Asistencial Robótico Interactivo”) es un robot blando de diseño amigable y apariencia antropomórfica simplificada. Entre sus características más destacadas se encuentran:

Figura 1.12

Robot Jari



El estudio se estructuró en dos escenarios de intervención que permitieron evaluar la interacción de los niños con el robot desde una perspectiva tanto conductual como observacional. El primer escenario, estableció una dinámica de interacción individual entre cada niño y el robot, para analizar su capacidad de identificación de expresiones emocionales,

preferencias respecto a las emociones representadas y los colores asociados, así como comportamientos espontáneos que emergían durante la sesión. Se observaron diversas respuestas visuales, gestos físicos, expresiones faciales y conductas proxémicas, como el acercamiento voluntario hacia el robot; muchos niños tocaron con curiosidad y afecto distintas partes del dispositivo, como la cabeza, el cuerpo o la pantalla, y algunos incluso lo abrazaron, besaron o expresaron alegría saltando durante la actividad, evidenciando un nivel significativo de implicación emocional.

En el segundo escenario, se aplicaron cuestionarios posteriores a la interacción y se realizaron observaciones sistemáticas por parte de docentes y terapeutas. Los profesionales destacaron un elevado nivel de motivación y compromiso emocional en los niños, así como una notable claridad en la expresión de las emociones por parte del robot, gracias al uso complementario de pictogramas y colores. Estos elementos facilitaron la comprensión emocional por parte de los usuarios y fortalecieron la percepción del robot como una herramienta eficaz y complementaria en contextos terapéuticos y educativos orientados a la infancia con TEA.

Se registró una alta tasa de reconocimiento emocional correcto, con excepción de algunas dificultades puntuales en la identificación de emociones complejas como el miedo; la emoción más reconocida y preferida por los niños fue la felicidad, frecuentemente asociada al color amarillo. En cuanto a las expresiones observadas, la sonrisa fue la más común, mientras que el gesto de tocar el robot fue el más repetido; conductas afectivas como abrazos, besos y risas espontáneas reflejaron una conexión emocional natural entre los niños y el dispositivo. Además, muchos expresaron explícitamente su deseo de volver a interactuar con el robot, describiéndolo como "divertido" y similar a una mascota [39]; estas respuestas sugieren que JARI no solo facilitó el reconocimiento emocional, sino que también promovió una conexión social espontánea, lo cual constituye un aspecto clave en el abordaje terapéutico del TEA.

1.4.12 *Análisis crítico y vacíos identificados*

A lo largo de la revisión realizada sobre tecnologías destinadas a apoyar a las CAAs y el reconocimiento emocional en niños con TEA, se identifican diversas fortalezas y áreas de mejora en las soluciones actuales. Aunque los desarrollos tecnológicos recientes han contribuido significativamente a la facilitación de la comunicación y reconocimiento emocional, persisten desafíos importantes y necesidades aún no completamente satisfechas.

Una limitación crítica de las herramientas actuales es la continua necesidad de supervisión adulta, lo cual restringe la autonomía real de los usuarios. Si bien muchos dispositivos permiten cierta independencia inicial, aún requieren el apoyo constante de un adulto, especialmente para actividades comunicativas complejas o avanzadas. Esta dependencia limita considerablemente la posibilidad de que los niños desarrollen una verdadera independencia comunicativa y emocional, restringiendo además la generalización de habilidades a contextos cotidianos.

Otra carencia destacada es la limitada incorporación de sistemas de monitoreo emocional en tiempo real integrados en las herramientas existentes. Aunque se ha avanzado en el reconocimiento facial de emociones básicas, todavía no es común que estos sistemas interactúen automáticamente con cuidadores o terapeutas. Esta falta de comunicación directa limita la capacidad de respuesta inmediata ante situaciones críticas, como episodios de estrés o frustración elevados, disminuyendo la efectividad general del soporte emocional proporcionado.

Además, muchos dispositivos actuales presentan una apariencia excesivamente clínica o tecnológica, lo que puede provocar incomodidad o rechazo por parte de los niños. La evidencia revisada demuestra claramente que los diseños más aceptados y eficaces en términos de uso autónomo son aquellos que integran formas amigables, colores suaves y personajes con

características infantiles reconocibles, promoviendo así una interacción emocionalmente positiva y espontánea.

Frente a estas limitaciones, la presente investigación se enfoca en desarrollar una solución tecnológica integral que responda específicamente a estas necesidades no resueltas. En primer lugar, la aplicación de tecnologías de identificación automática en pictogramas físicos se orienta a promover una interacción autónoma, intuitiva y eficiente, disminuyendo de manera significativa la necesidad de supervisión adulta.

En segundo lugar, la incorporación de una cámara con visión e inteligencia artificiales permitirá realizar un monitoreo continuo del estado emocional del niño, identificando niveles de estrés de manera objetiva y rápida. Esto brindará información crucial para que los cuidadores puedan intervenir oportunamente en situaciones potencialmente problemáticas.

Por último, el diseño propuesto está orientado a aprovechar así las ventajas identificadas en otros dispositivos exitosos que utilizan diseños lúdicos y amigables. Esta decisión estratégica tiene como objetivo fundamental mejorar la aceptación y empatía hacia el dispositivo, alentando una interacción más natural y efectiva por parte de los niños.

Estas decisiones buscan de manera específica atender las brechas identificadas en autonomía comunicativa, monitoreo emocional eficiente y diseño empático, ofreciendo una propuesta tecnológica más completa y eficaz para mejorar la calidad de vida de los niños con TEA y su entorno inmediato.

Capítulo 2

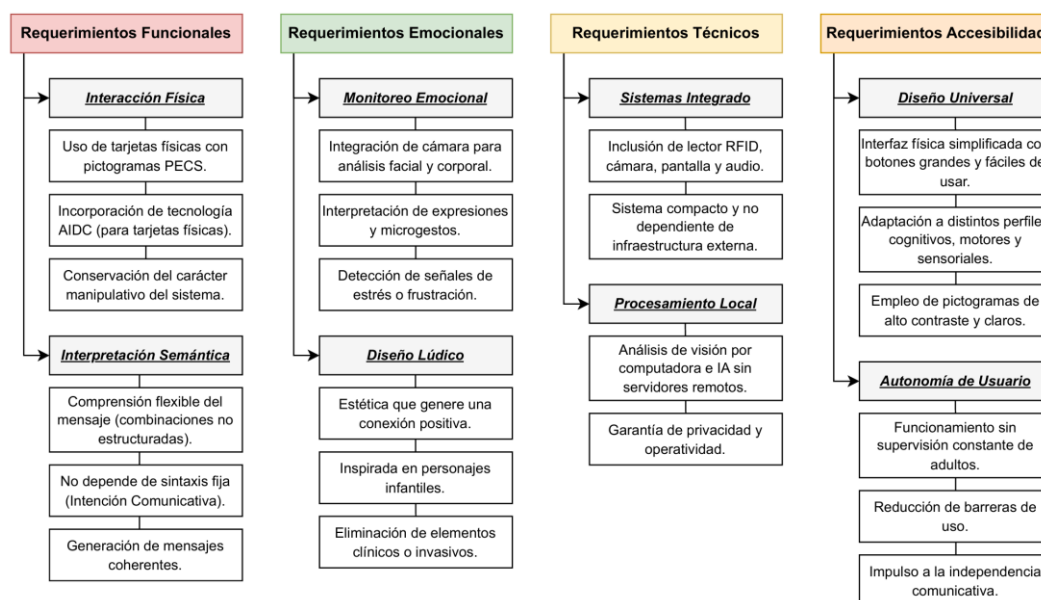
2. Metodología

El proceso de diseño se fundamentó en una revisión exhaustiva del contexto comunicativo, emocional y sensorial de niños con TEA, especialmente aquellos que presentan limitaciones significativas en el lenguaje verbal o que son completamente no verbales. Esta revisión incluyó literatura científica actual, estudios clínicos y experiencias en contextos educativos, y permitió identificar las principales barreras que enfrentan estos niños para expresar sus necesidades y mantener interacciones significativas.

Paralelamente, se analizaron soluciones tecnológicas existentes, dispositivos de apoyo emocional y herramientas de monitoreo basadas en inteligencia artificial, identificando sus limitaciones en términos de accesibilidad, autonomía de uso y complejidad operativa. En consecuencia, se identificaron cuatro categorías de requerimientos: funcionales, emocionales, técnicos y de accesibilidad, resumidas en la Figura 2.1. Estas categorías sirvieron como base tanto para la formulación de alternativas de solución como para la toma de decisiones de diseño, asegurando la coherencia del desarrollo con las necesidades reales de la población objetivo.

Figura 2.1

Requerimientos de diseño

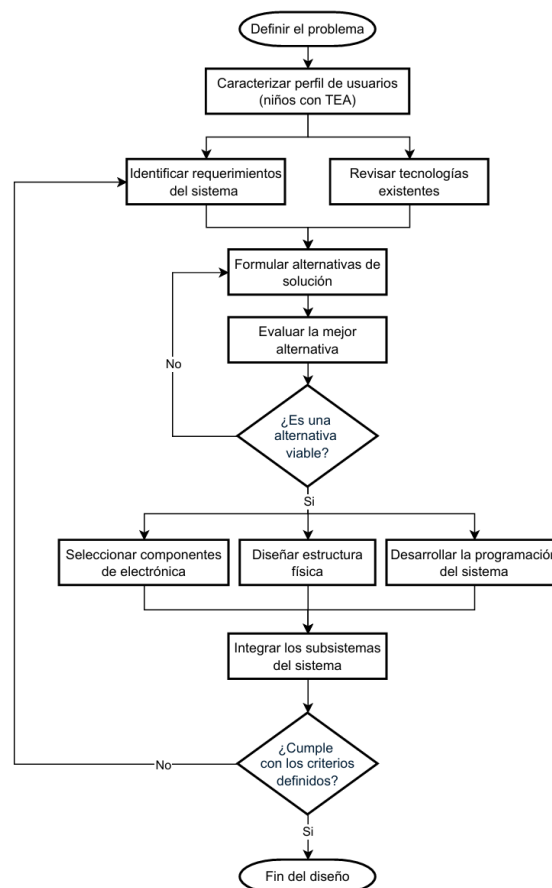


2.1 Procedimiento general de diseño

El desarrollo del sistema se estructuró en una secuencia de etapas metodológicas orientadas a mantener la coherencia entre los requerimientos planteados y las decisiones de diseño adoptadas. Esta secuencia, representada en la Figura 2.2, abarca desde la formulación y evaluación de alternativas hasta la validación funcional del prototipo.

Figura 2.2

Diagrama de flujo de la metodología



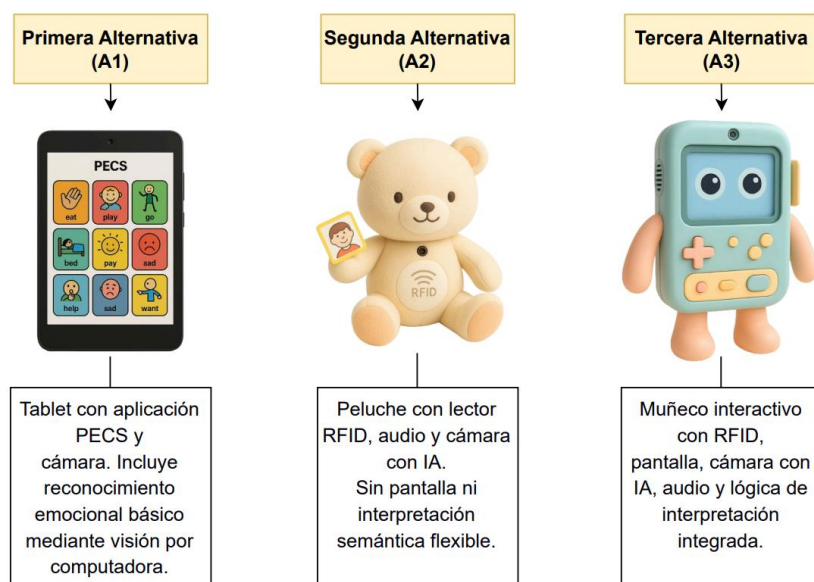
Tras la selección de la propuesta más adecuada mediante una matriz de decisión, el desarrollo posterior del sistema se estructuró en tres ejes de diseño: mecánico, electrónico y de programación. Finalmente, los subsistemas fueron integrados en un prototipo funcional y sometidos a una validación preliminar. El proceso fue iterativo, permitiendo ajustes cuando los resultados no cumplían con los parámetros definidos del sistema.

2.2 Generación de alternativas y matriz de decisión

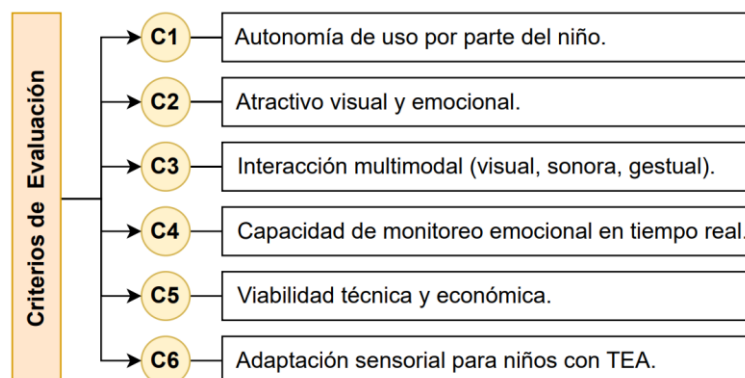
Con base en los requerimientos identificados durante la fase de diagnóstico, se desarrollaron tres alternativas de solución, cada una con diferentes niveles de integración tecnológica y complejidad operativa. Estas propuestas buscan explorar diversas configuraciones de interacción entre tecnologías físicas y digitales, evaluando su capacidad para responder a las necesidades de comunicación aumentativa, monitoreo emocional y aceptación por parte del usuario. La Figura 2.3 presenta una visión general de las tres alternativas planteadas, ordenadas según su grado de sofisticación e integración funcional.

Figura 2.3

Propuestas de solución



Las alternativas van desde soluciones basadas únicamente en software hasta dispositivos físicos interactivos con funcionalidades embebidas. Para comparar su viabilidad de manera objetiva, se establecieron seis criterios de evaluación que permiten valorar no solo la complejidad técnica, sino también su adecuación al contexto real de uso. Estos criterios se resumen de forma esquemática en la Figura 2.4, mientras que la Tabla 2.1 presenta la matriz de decisión con la calificación asignada a cada alternativa en una escala de 1 (muy bajo) a 5 (excelente).

Figura 2.4*Criterios de evaluación*

La evaluación permitió identificar la alternativa A3 como la opción más adecuada, al lograr un equilibrio sólido entre funcionalidad técnica, accesibilidad sensorial y adecuación emocional. A diferencia de las otras propuestas que presentaban limitaciones en la interacción multimodal y adaptación sensorial para sus usuarios, A3 destacó por su integración coherente con los requerimientos establecidos en las etapas previas. La selección no se basó únicamente en su nivel tecnológico, sino también en su potencial en usabilidad y aceptación por parte de niños con TEA.

Tabla 2.1*Matriz de decisión*

Alternativa	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
A1	3	2	2	4	4	2	17
A2	4	4	3	4	4	3	23
A3	5	5	5	5	4	5	29

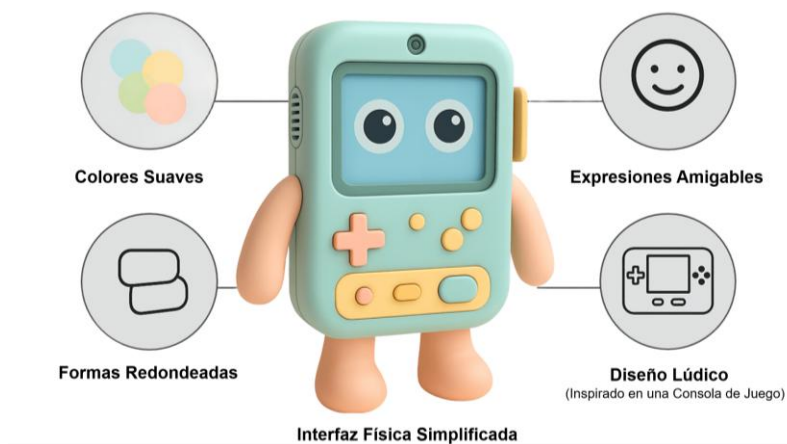
2.3 Diseño conceptual del producto

La solución seleccionada se estructuró como un dispositivo compacto, lúdico e interactivo, orientado a apoyar la comunicación aumentativa y la interpretación emocional en niños con TEA. Su diseño físico, inspirado en la estética de una consola de juego, emplea formas redondeadas, colores suaves y expresiones amigables, buscando una conexión afectiva

inmediata, promover el uso autónomo y reducir la resistencia que suelen generar dispositivos de aspecto clínico.

Figura 2.5

Diseño conceptual del prototipo



Desde el punto de vista funcional, el usuario interactúa mediante tarjetas físicas con tecnología RFID, cada una asociada a un pictograma del sistema PECS. Al pasar estas tarjetas por el lector, la secuencia se transmite automáticamente a un cuidador mediante mensajería instantánea. La interpretación del mensaje se basa en un modelo de inteligencia artificial con semántica flexible, capaz de reorganizar y traducir la intención comunicativa incluso cuando la estructura del mensaje no sigue una gramática formal, respetando así la variabilidad del desarrollo lingüístico en el espectro autista.

Figura 2.6

Interacción con el sistema



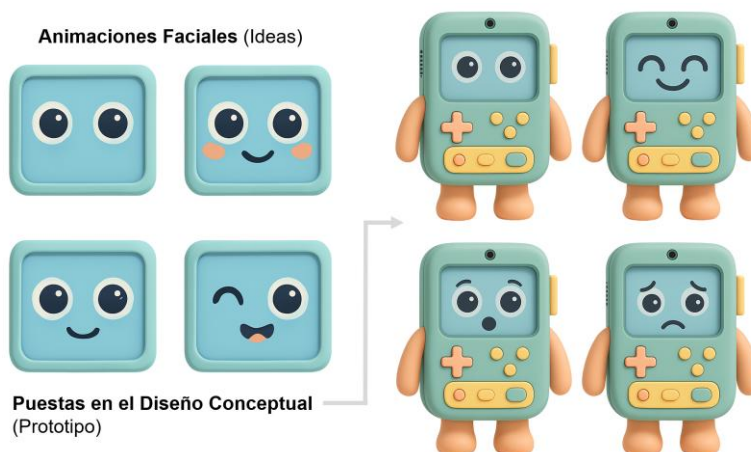
El dispositivo también incorpora una cámara integrada para detectar señales emocionales no verbales a través de visión por computadora. Esta funcionalidad permite estimar estados emocionales relevantes mediante el análisis de expresiones faciales y patrones de movimiento. En caso de identificar alteraciones, el sistema puede enviar alertas automáticas o resúmenes periódicos al entorno cuidador, generando una vía indirecta pero significativa de comunicación emocional.

Figura 2.7

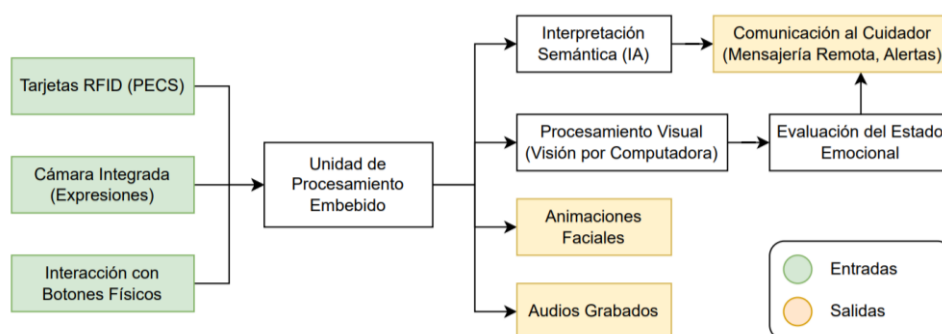
Detección de niveles de estrés



Como complemento, se incluye un modo de interacción estructurada basado en la secuencia “entrada–modelado–respuesta”, que utiliza audios grabados y animaciones faciales. El niño puede elegir entre diferentes tipos de voces y tonos de retroalimentación (como voz animada o calmada), ajustándose a su perfil sensorial y emocional. Esta personalización busca fortalecer el vínculo afectivo y fomentar una experiencia de aprendizaje positiva.

Figura 2.8*Diseño conceptual de expresiones*

La arquitectura del sistema se organiza en torno a cinco componentes funcionales: entrada mediante RFID, procesamiento visual, lógica de interpretación semántica, visualización y conectividad. Estos elementos actúan de forma integrada para ofrecer un entorno interactivo, accesible y empático. La Figura 2.9 presenta el diagrama de bloques del sistema, ilustrando el flujo desde la activación de tarjetas hasta la interpretación emocional y notificación al cuidador.

Figura 2.9*Arquitectura del sistema*

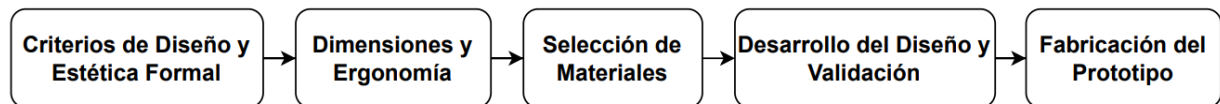
2.4 Diseño mecánico

El diseño mecánico del dispositivo se estructuró como un proceso orientado a definir una carcasa funcional, ergonómica y estéticamente adecuada para niños con TEA. Tal como se muestra en la Figura 2.10, el flujo metodológico parte de criterios formales, avanza con la

selección de materiales adecuados y el modelado 3D en *software* CAD, incluye una etapa de validación estructural y culmina con la fabricación del prototipo físico mediante impresión 3D por *Fused Deposition Modeling* (FDM).

Figura 2.10

Etapas del diseño mecánico



2.4.1 Criterios de diseño y estética formal

El diseño físico del dispositivo fue guiado por criterios que priorizan la seguridad en la manipulación, la claridad visual de la interfaz y la facilidad de integración sensorial, con especial atención a las particularidades perceptivas de niños con TEA. La geometría general fue definida con proporciones compactas y bordes redondeados, evitando aristas o salientes que pudieran causar incomodidad o riesgo durante el uso. Se adoptó una morfología continua, con superficies suaves y transiciones sin rupturas, para favorecer el contacto táctil y permitir que el dispositivo pueda ser manipulado sin riesgo alguno para sus usuarios.

A nivel funcional, la disposición de los elementos externos pantalla, botones físicos, zonas de contacto fue pensada para ser visualmente accesible y predecible, evitando sobrecarga visual o estructuras complejas. Estos principios no solo optimizan la experiencia de uso, sino que también permiten adaptar el diseño a distintos entornos (escolar, doméstico o terapéutico) sin generar rechazo o fatiga visual.

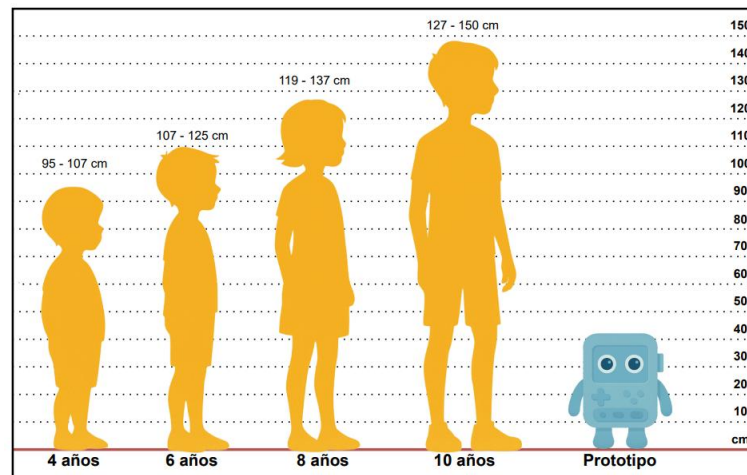
2.4.2 Dimensiones y ergonomía

El planteamiento dimensional del dispositivo consideró tanto las restricciones volumétricas internas impuestas por los componentes electrónicos como las condiciones ergonómicas externas necesarias para una manipulación cómoda por parte de niños en etapa

preescolar y escolar temprana. Para ello, se tomó como referencia el rango de estaturas promedio entre 1.00 m y 1.50 m, correspondiente a niños de cuatro hasta los diez años [59].

Figura 2.11

Estaturas por edad con escala comparativa del dispositivo



A partir de esta referencia, se estimó que únicamente el cuerpo del dispositivo debía mantenerse dentro de un volumen aproximado de $30 \times 20 \times 6$ cm, lo cual garantiza suficiente espacio para alojar la pantalla, el lector RFID, la cámara, el sistema de procesamiento, la batería y el cableado, sin comprometer su portabilidad. Estas dimensiones también favorecen su manipulación sobre el regazo o una superficie plana, permitiendo que el niño lo sostenga o interactúe con él sin generar esfuerzo excesivo (abrazarlo o apoyarlo en el regazo con comodidad).

La disposición frontal de la pantalla se definió para lograr una orientación visual directa, facilitando la lectura del contenido sin forzar la postura cervical. Asimismo, el diseño del cuerpo envolvente se ajustó para lograr una distribución uniforme del volumen y del centro de masa, reduciendo la percepción de peso y favoreciendo la estabilidad cuando el dispositivo está en reposo.

2.4.3 Selección de materiales

La selección de materiales para la carcasa y componentes externos del prototipo se fundamentó en criterios estructurales, térmicos, sensoriales y económicos, considerando su uso intensivo por parte de niños en contextos educativos o terapéuticos. Se priorizó la compatibilidad con impresión 3D por tecnología FDM y se buscó un equilibrio entre resistencia al impacto, estabilidad dimensional, facilidad de procesamiento y acabado superficial amigable al tacto.

Se analizaron tres termoplásticos de uso común en fabricación aditiva: ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y tereftalato de polietileno glicolizado (PETG). La Tabla 2.2 presenta sus propiedades físicas y térmicas intrínsecas, independientes del porcentaje de relleno o patrón de impresión [60] – [62].

Tabla 2.2

Propiedades generales de los materiales candidatos

Propiedad del Material	PLA	ABS	PETG
Densidad (g/cm ³)	1.29	1.07	1.27
Módulo de Young (GPa)	3.80	2.30	3.00
Coefficiente de Poisson	0.35	0.37	0.38
Elongación a la rotura (%)	11.8	22	83
Temp. de reblandecimiento (°C)	55	98	70
Facilidad de impresión (FDM)	Muy alta	Media	Alta
Resistencia al impacto	Baja	Media	Alta
Adhesión entre capas	Media	Alta	Media
Flexibilidad	Baja	Media	Media
Costo estimado por rollo (1 kg)	\$15–20	\$20–30	\$22–30

Aunque el PLA ofrece excelente facilidad de impresión y bajo costo, se descartó como opción estructural debido a su baja tenacidad, fragilidad ante cargas repetitivas y deformación

térmica por encima de los 60 °C. Estas limitaciones lo hacen inadecuado para un dispositivo sujeto a manipulación frecuente, impactos accidentales y condiciones variables de uso.

En contraste, tanto ABS como PETG demostraron propiedades más equilibradas. ABS destaca por su resistencia al impacto, estabilidad térmica (manteniendo integridad hasta 100 °C) y rigidez adecuada, aunque su impresión requiere cama caliente y ventilación controlada. PETG, por su parte, ofrece un compromiso intermedio entre flexibilidad, resistencia a la tracción y facilidad de procesamiento, con un acabado superficial suave y sensorialmente agradable, aunque con una temperatura de reblandecimiento inferior (70 °C) respecto al ABS.

Dado que las propiedades mecánicas efectivas dependen del porcentaje de relleno y del patrón de impresión, se incorporó un segundo análisis centrado en el rendimiento estructural según configuraciones típicas de impresión. La Tabla 2.3 resume los valores de resistencia máxima a tracción (UTS) obtenidos experimentalmente en función del *infill* [60], junto con un rango estimado del límite elástico (S_y) calculado como fracción del UTS a partir de compilaciones de *handbooks* de polímeros [63]. Para la estimación de S_y se consideró el comportamiento característico de cada polímero:

- **PLA (frágil, elongación a la rotura ≈ 11.8 %):** $S_y \approx \text{UTS}$, ya que diversos estudios muestran fractura abrupta sin deformación plástica apreciable [60], [64].
- **ABS (moderadamente dúctil, elongación ≈ 22 %):** S_y cercano al UTS ($\approx 0.8\text{--}0.9 \cdot \text{UTS}$), coherente con su limitada fluencia antes de la fractura.
- **PETG (altamente dúctil, elongación ≈ 83 %):** S_y más alejado del UTS ($\approx 0.6\text{--}0.8 \cdot \text{UTS}$), reflejando una amplia zona plástica y gran capacidad de deformación antes de la rotura.

Tabla 2.3*Variación de S_y y UTS según el porcentaje de relleno*

Material	% Infill	UTS [MPa]	S_y Estimado [MPa]	Patrón de Relleno
PLA	15%	20	≈ 20	Triangular ($0^\circ, \pm 60^\circ$)
	50%	≈ 22	≈ 22	Triangular
	75%	≈ 28	≈ 28	Triangular
	100%	≈ 32	≈ 32	Sólido ($\pm 45^\circ$)
ABS	15%	≈ 14	11.2-12.9	Triangular
	50%	≈ 20	16-18	Triangular
	75%	≈ 22	17.6-19.8	Triangular
	100%	≈ 37	29.6-33.33	Sólido ($\pm 45^\circ$)
PETG	15%	≈ 17	10.2-13.6	Triangular
	50%	≈ 20	12-16	Triangular
	75%	≈ 37	22.2-29.6	Triangular
	100%	≈ 51	30.6-40.8	Sólido ($\pm 45^\circ$)

Finalmente, se determinó que la carcasa principal del dispositivo y los componentes de interacción directa con el usuario, como los botones, se fabriquen en PETG con *infill* intermedio (15–50 %), aprovechando su ductilidad, la buena resistencia al impacto frente a caídas o golpes del muñeco, el acabado superficial agradable y la mayor inocuidad frente al contacto oral ocasional. Por otra parte, se asignó el uso de ABS con un relleno igual o superior al 50 % en los brazos y pies del prototipo, donde la rigidez estructural resulta esencial para la función de soporte de los pies, y al mismo tiempo se requiere tenacidad en los brazos ante posible manipulación brusca, aunque no sean móviles. Estas piezas, sin embargo, se recubrirán con silicona de grado alimenticio, a fin de mitigar la exposición potencial a compuestos nocivos del ABS y proporcionar una textura más segura como comfortable. De esta forma, la selección

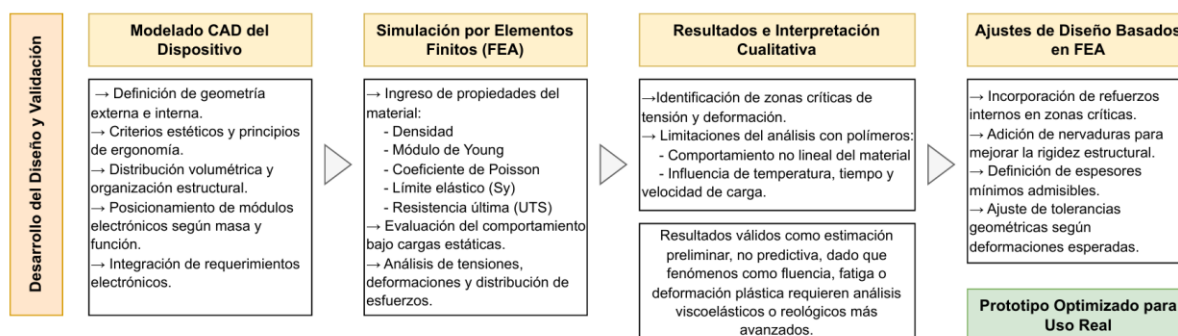
combinada de materiales atiende simultáneamente a los criterios estructurales, sensoriales y de seguridad infantil establecidos para el proyecto.

2.4.4 *Desarrollo del diseño y validación*

El desarrollo del diseño mecánico se estructuró en tres etapas: modelado tridimensional, análisis estructural y ajuste del prototipo. El modelo CAD se elaboró considerando aspectos estéticos, ergonómicos y funcionales, con especial atención a la integración electrónica y la organización volumétrica interna. A continuación, se aplicaron simulaciones por elementos finitos (FEA) para estimar el comportamiento estructural bajo cargas estáticas. Estos resultados, interpretados con criterio debido a la naturaleza no lineal de los polímeros, guiaron decisiones sobre refuerzos, espesores y tolerancias. El flujo general del proceso se resume en el siguiente esquema.

Figura 2.12

Diseño y validación mecánica



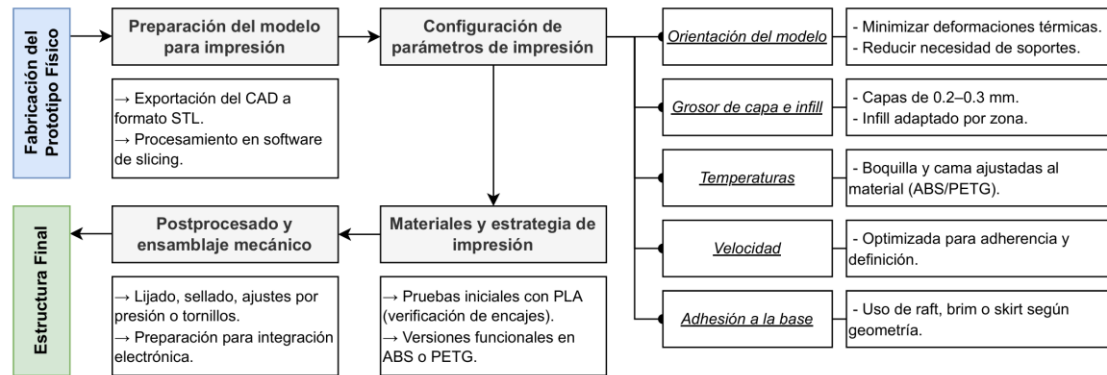
2.4.5 *Fabricación del prototipo*

Tras la validación del modelo CAD, se procederá a la fabricación del prototipo mediante impresión 3D por tecnología FDM, elegida por su bajo costo, versatilidad y compatibilidad con materiales técnicos. El modelo será preparado mediante *software* de *slicing*, ajustando parámetros como orientación, capas, temperatura y adherencia según el material y la geometría. Se prevén pruebas preliminares con PLA y versiones funcionales con ABS o PETG.

El proceso concluye con postprocesado y ensamblaje, buscando una estructura robusta, estable y segura para la integración electrónica.

Figura 2.13

Flujograma de fabricación

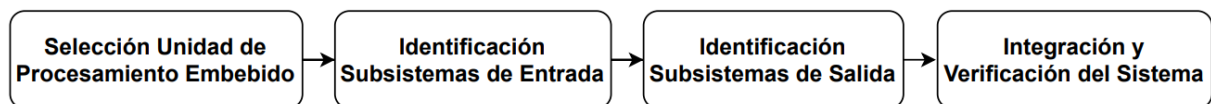


2.5 Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema se abordó como un proceso progresivo orientado a definir una arquitectura embebida eficiente, segura y adecuada para la interacción infantil. Como se muestra en la Figura 2.14, el enfoque metodológico parte de la selección de la unidad de procesamiento, seguido por la identificación de subsistemas de entrada y salida, hasta alcanzar la integración y verificación del sistema.

Figura 2.14

Etapas de diseño electrónico



2.5.1 Unidad de procesamiento embebido

El sistema propuesto requiere una unidad de procesamiento embebido capaz de integrar de forma eficiente los módulos de visión por computadora y comunicación aumentativa basada en pictogramas. Esta unidad debe ejecutar de manera autónoma los modelos previamente entrenados, capturar y procesar datos en tiempo real, y gestionar múltiples entradas y salidas

físicas para la interacción con el usuario, abordando tanto el análisis secuencial de gestos como la interpretación dinámica de secuencias pictográficas y la activación de respuestas adaptativas.

Dada la complejidad computacional que implica la ejecución local de modelos como deepseek-r1-0528-qwen3-8b (5 GB) y redes *Long Short-Term Memory* (LSTM), la unidad de procesamiento embebido debe contar con capacidad de inferencia acelerada por GPU, manejo eficiente de memoria y compatibilidad con *frameworks* actuales de visión y lenguaje. Estas especificaciones, junto con los requerimientos de interacción física y operación autónoma, se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4

Requerimientos de la unidad de procesamiento

Componente Funcional	Requerimientos
Procesamiento general	CPU multinúcleo, RAM ≥ 8 GB, almacenamiento expandible (≥ 32 GB)
Aceleración por hardware	GPU compatible con CUDA/cuDNN para inferencia optimizada (visión y modelos de lenguaje)
Visión por computadora	Soporte para bibliotecas OpenCV, DeepFace, MediaPipe, procesamiento de video en tiempo real
Soporte IA local	Ejecución de modelos LSTM, clasificación multiclase, y procesamiento de lenguaje natural
Periféricos e I/O	Interfaces GPIO, USB, I2C/SPI para conexión de sensores, cámaras, lectores y pantallas
Conectividad	Conectividad local (Wi-Fi), sin requerir acceso a internet para la operación
Entorno software	Compatibilidad con TensorFlow/Keras 2.19+, DeepFace 0.0.93, Flask API, NumPy, etc.

Asimismo, la arquitectura debe prever la integración fluida de sensores, cámaras y dispositivos de salida visual o táctil, y permitir la comunicación interna mediante protocolos estandarizados y APIs locales. El entorno de operación debe ser autosuficiente y sin dependencia de servicios en la nube, lo que implica disponibilidad de servicios ligeros para el

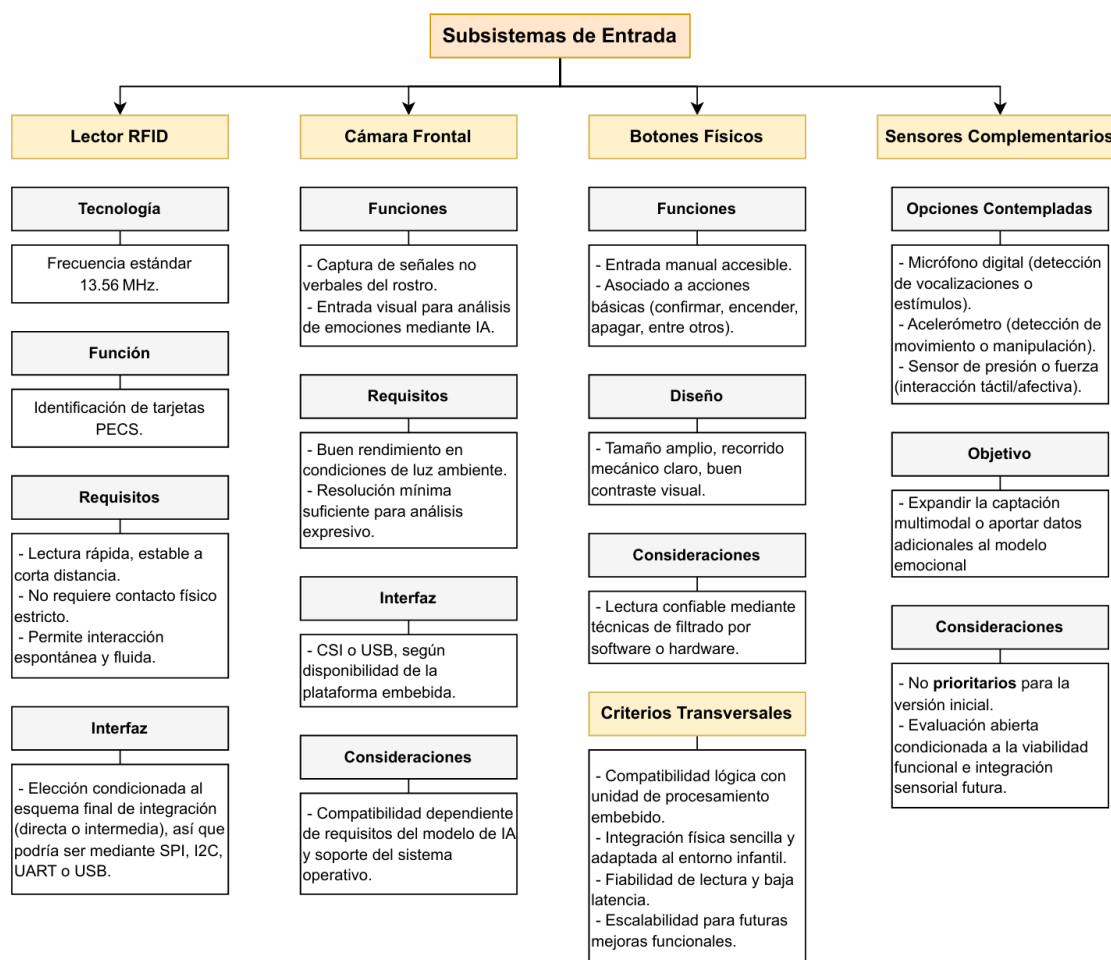
despliegue de interfaces *REST*, ejecución en entornos Python aislados y compatibilidad con bibliotecas de percepción como análisis en tiempo real.

2.5.2 Subsistemas de entrada

El diseño de los subsistemas de entrada se orientó a garantizar una interacción intuitiva y la captación de señales significativas por parte del usuario. Se definieron canales físicos y visuales que permiten tanto la emisión de intenciones comunicativas como la detección de estados emocionales. La configuración incluye componentes seleccionados por su confiabilidad, compatibilidad y adecuación al entorno infantil, con posibilidad de expansión sensorial futura según necesidades funcionales. La arquitectura funcional resultante se resume gráficamente a continuación:

Figura 2.15

Periféricos de entrada

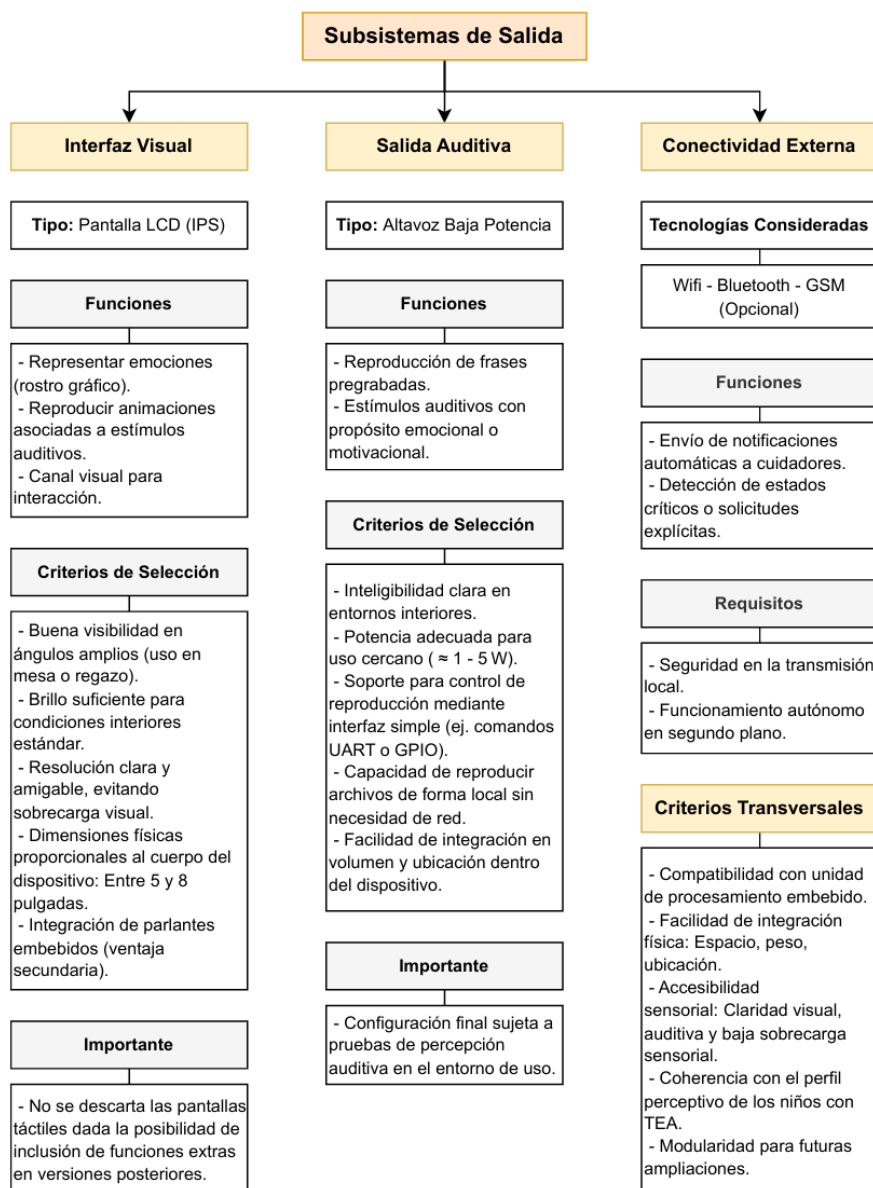


2.5.3 Subsistemas de salida

En cuanto a la salida del sistema, se establecieron mecanismos que permiten generar respuestas perceptibles y transmitir información relevante al entorno del usuario. Las decisiones de diseño se basaron en criterios de claridad, accesibilidad y facilidad de integración con la arquitectura general. Los bloques funcionales seleccionados responden a distintas formas de retroalimentación visual, auditiva y remota. El desglose técnico se ilustra en el siguiente esquema:

Figura 2.16

Periféricos de salida

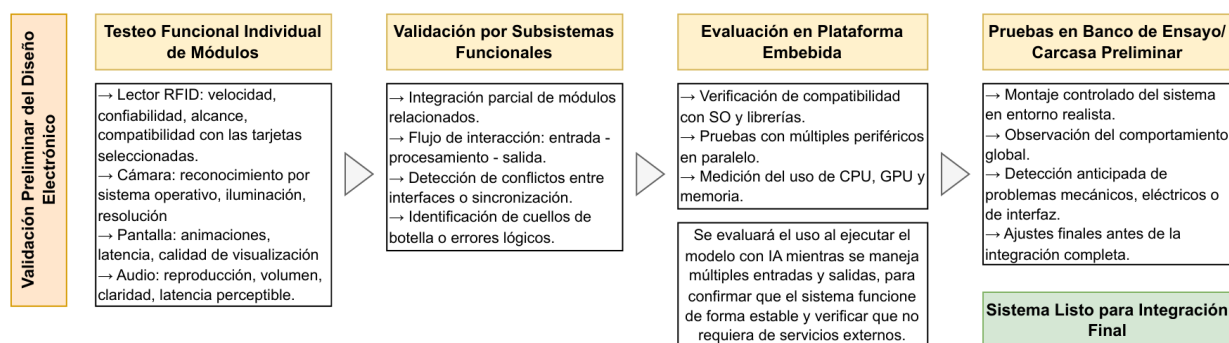


2.5.4 Validación preliminar del diseño

La validación electrónica del sistema se organizó en fases secuenciales, partiendo de pruebas funcionales individuales por módulo, seguidas por verificaciones a nivel de subsistemas y finalizando con ensayos de integración completa. Este proceso metodológico se encuentra representado en el flujograma de la Figura 2.17, esquematizando las etapas clave de validación desde la evaluación aislada de componentes hasta las pruebas en banco previas a la implementación definitiva. En cada fase se verifica no solo el funcionamiento de los elementos, sino también su compatibilidad con la unidad embebida y su desempeño bajo condiciones simuladas o reales, permitiendo ajustes técnicos antes de la integración final del sistema.

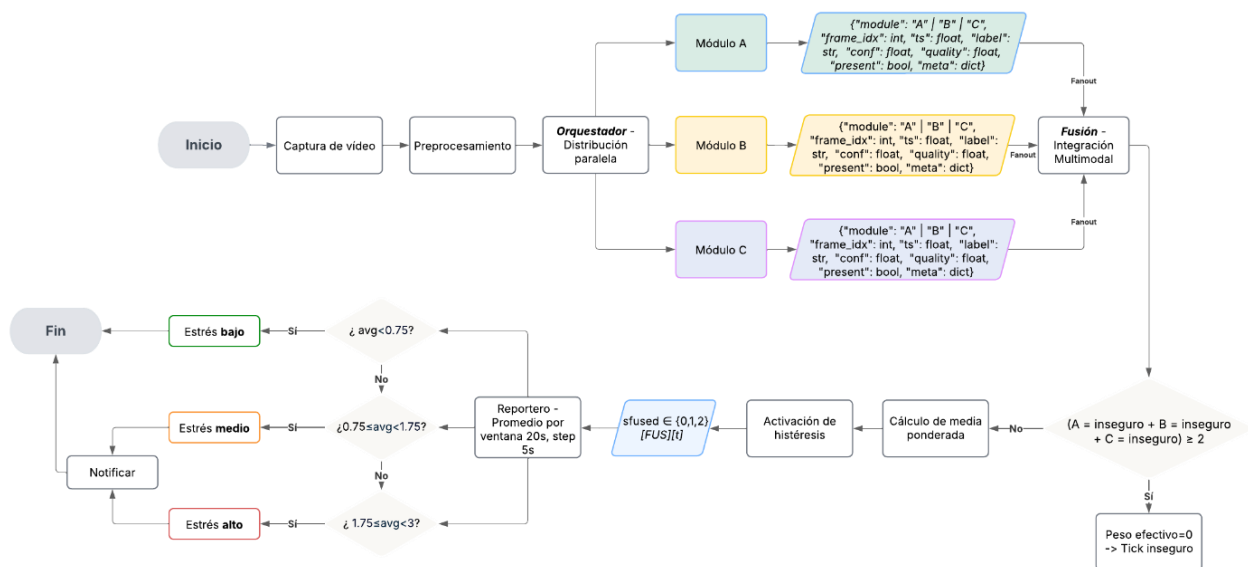
Figura 2.17

Validación preliminar del diseño electrónico



2.6 Diseño de programación

El desarrollo del modelo de inteligencia artificial propuesto se fundamenta en la necesidad de identificar niveles de estrés en niños con TEA, combinando el análisis de expresiones faciales, emociones y patrones psicofisiológicos derivados de parámetros como optical flow y lenguaje corporal.

Figura 2.18*Flujograma del sistema integrado de detección de estrés*

2.6.1 Módulo A - Análisis de emociones faciales

El Módulo A constituye el núcleo inicial del sistema, orientado a la detección y análisis de expresiones faciales para identificar estados afectivos relevantes en niños con TEA. Integra modelos preentrenados como MTCNN para la detección precisa de rostros y DeepFace para el reconocimiento automático de emociones. La emoción dominante se infiere en tiempo real y se traduce a un nivel de estrés (alto, medio o bajo) mediante una clasificación heurística. Los rostros capturados se convierten en vectores emocionales binarios, etiquetados según su nivel de estrés, conformando una primera capa de análisis clave para la detección proactiva de respuestas afectivas que requieren atención.

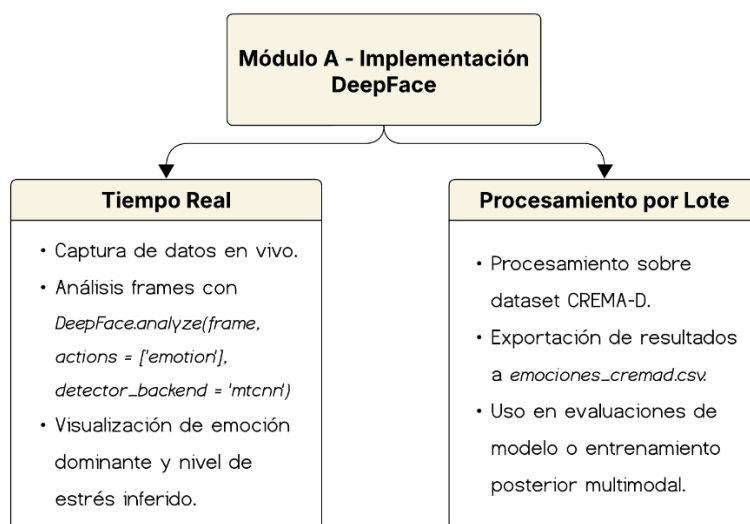
En el desarrollo del Módulo A interviene un conjunto de herramientas tecnológicas y bibliotecas de código abierto, seleccionadas por su eficiencia, precisión y compatibilidad con aplicaciones en tiempo real. El núcleo del proceso es *DeepFace*, biblioteca en Python que integra de forma automatizada la detección, alineación y análisis facial para la inferencia emocional.

El flujo inicia con la detección y alineación del rostro, etapas críticas para garantizar la correcta orientación y centrado de la región de interés; de acuerdo con sus desarrolladores, esta alineación previa incrementa la precisión del modelo en más de un 1%, margen relevante en escenarios sensibles como el análisis emocional. Para esta tarea se adoptó MTCNN como *backend*, debido a su robustez frente a variaciones de pose, iluminación y expresión.

Posteriormente, *DeepFace* aplica un módulo de análisis emocional basado en redes convolucionales preentrenadas con *datasets* como FER+, que estima la probabilidad de siete emociones universales (enojado, desagrado, miedo, feliz, tristeza, sorpresa y neutral); un resultado se traduce en un nivel de estrés (bajo, medio o alto) mediante reglas heurísticas. La implementación de *DeepFace* se dividió en dos aplicaciones, detalladas en la Figura 2.19.

Figura 2.19

Estrategias de integración de Deepface

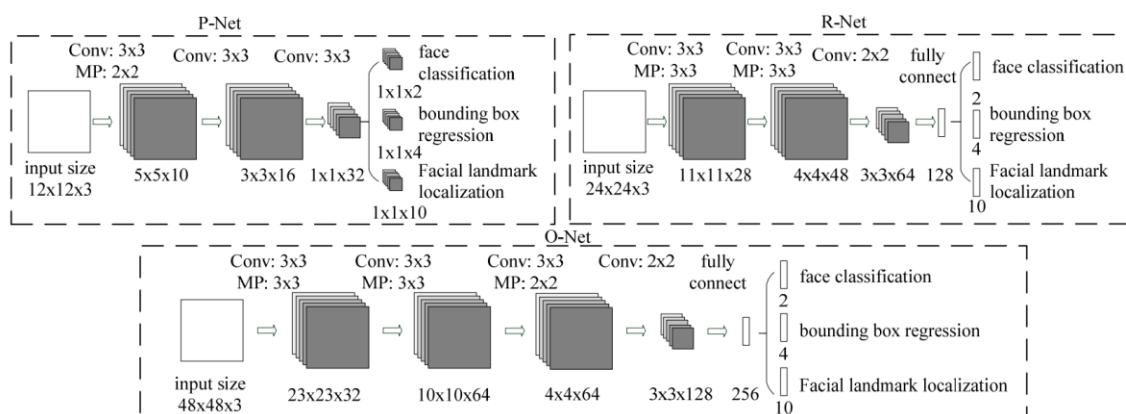


En ambas implementaciones, MTCNN extrae automáticamente las coordenadas del rostro y alinea geométricamente la región de interés garantizando la homogeneidad en las entradas del modelo emocional, reduciendo la variabilidad causada por inclinaciones, rotaciones o descentrado facial.

MTCNN es una red convolucional en cascada compuesta por tres etapas: P-Net, R-Net y O-Net descritas en la Figura 2.20.

Figura 2.20

Arquitectura de red MTCNN



En la fase de análisis por lote, MTCNN localiza y recorta las regiones faciales en cada imagen de recortes_faces_cremad, insumo necesario para el análisis emocional masivo con *DeepFace* y la generación del archivo estructurado emociones_cremad.csv.

Además de *DeepFace* y MTCNN, se integran otras bibliotecas complementarias que optimizan el pipeline emocional, permitiendo una implementación eficiente tanto en tiempo real como en procesamiento por lotes. Estas herramientas, descritas en la Tabla 2.5, cumplen funciones clave como captura de video, manipulación numérica, estructuración de resultados y visualización gráfica, garantizando la integración fluida del sistema.

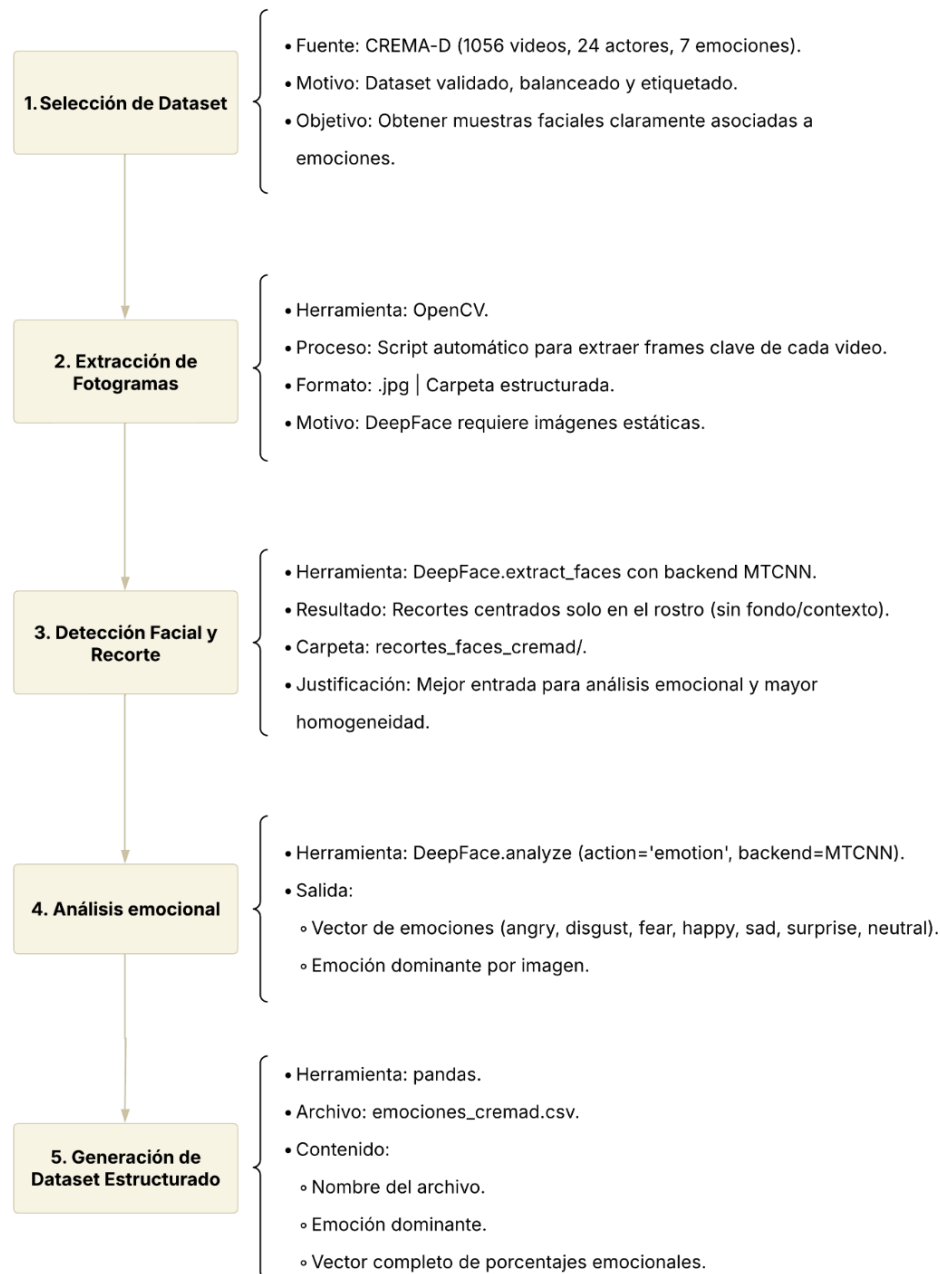
Tabla 2.5

Herramientas requeridas módulo A

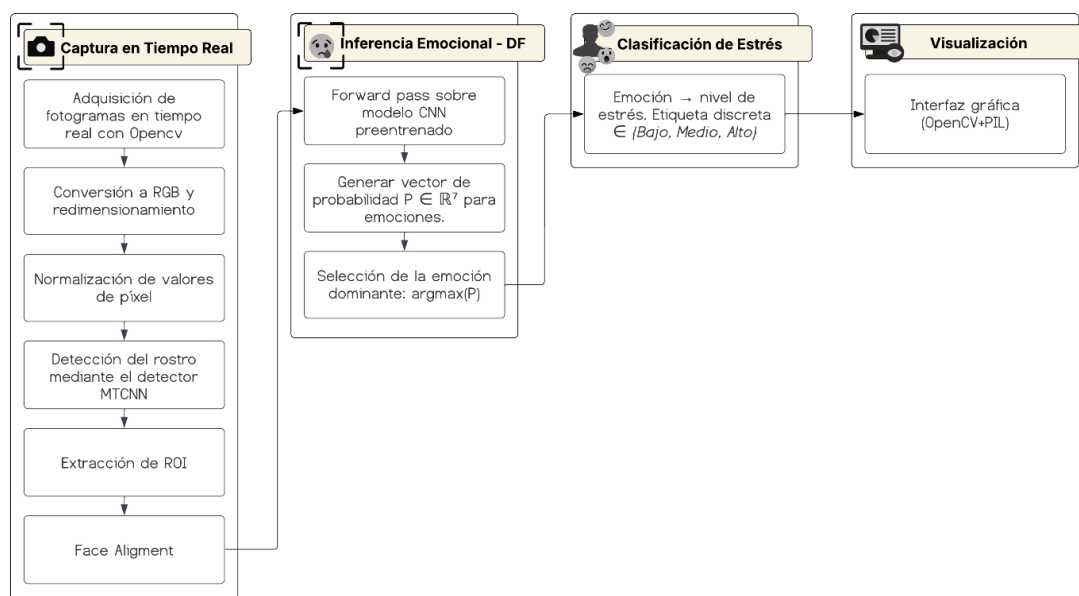
Herramienta	Función Principal	Detalles Técnicos
OpenCV	Captura, visualización y procesamiento de video en tiempo real	Lectura de fotogramas desde cámara; renderizado gráfico (rectángulos, textos, superposición con transparencia); manipulación de imágenes desde CREMA-D; integración con NumPy y DeepFace. Fuente: cv2.FONT_HERSHEY_DUPLEX.

DeepFace	Inferencia de emociones faciales mediante CNNs preentrenadas	Función <code>DeepFace.analyze()</code> en modo tiempo real y batch. Uso exclusivo del módulo de emociones. Detector backend: MTCNN. Salida: vector de probabilidades de 7 emociones, usado para inferir niveles de estrés. Exportación de resultados a .csv estructurado.
MTCNN	Detección y alineamiento preciso de rostros	Backend de detección facial para DeepFace. Arquitectura en cascada (P-Net, R-Net, O-Net). Alta precisión y bajo número de falsos positivos. Extrae bounding box y 5 landmarks faciales. Usado tanto en tiempo real como en procesamiento batch de imágenes de CREMA-D (recortes_faces_cremad).
NumPy	Manipulación numérica y estructuración de datos de imagen	Base para operaciones matriciales de imágenes (RGB ndarray). Usado en combinaciones de capas, recortes y almacenamiento de vectores de emociones. Integrado con OpenCV y DeepFace.
Pandas	Estructuración tabular de resultados emocionales (modo batch)	Construcción del archivo <code>emociones_cremad.csv</code> , incluyendo emoción dominante, nombre del archivo y vector de probabilidades. Codificado como UTF-8 con firma (utf-8-sig) para compatibilidad con Excel y Windows.
TQDM	Visualización del progreso en ejecuciones por lote	Muestra barra de progreso durante análisis batch de imágenes. Mejora la experiencia del usuario y permite estimar duración del procesamiento.
PIL / Pillow	Renderizado textual avanzado sobre fotogramas	Permite escribir texto con tildes y fuentes personalizadas (ej. <code>FreeSans.ttf</code>). Conversión bidireccional entre <code>numpy.ndarray</code> y <code>PIL.Image</code> para visualización final con OpenCV. Utilizado en versiones mejoradas del script de tiempo real.

Por otra parte, procesamiento de datos en el Módulo A sigue una secuencia que parte de la selección del *dataset* hasta la obtención de un conjunto de datos emocionales etiquetados. La Figura 2.21 ilustra este flujo que garantiza la calidad y homogeneidad de los datos hasta la obtención de resultados estructurados en un archivo tabular que consolida la emoción dominante y las probabilidades asociadas, sirviendo como insumo para etapas posteriores del sistema.

Figura 2.21*Preprocesamiento de dataset - Módulo A*

En cuanto a la arquitectura del Módulo A, integra múltiples componentes, desde la adquisición de video hasta la visualización gráfica de los resultados; la Figura 2.21 esquematiza de manera clara el *pipeline* completo de procesamiento e inferencia emocional utilizado, destacando la interacción entre sus principales bloques funcionales.

Figura 2.22*Flujograma del módulo A*

La Tabla 2.6 proporciona una descripción técnica de los elementos que conforman el flujo de procesamiento emocional mostrado en la Figura 2.22, detallando los parámetros técnicos que intervienen, desde la entrada del sistema hasta la salida inferida por el modelo.

Tabla 2.6*Descripción técnica del flujograma del módulo A*

Elemento	Descripción Técnica
Entrada al sistema	Fotogramas RGB (frame por frame) capturados desde cámara en tiempo real (OpenCV)
Resolución de entrada	Redimensionamiento 224x224
Normalización	Escalado de valores de píxel a rango [0, 1]
Detector facial	MTCNN (Multi-task Cascaded CNN)
Red neuronal	CNN
Acción invocada	emotion

2.6.2 Módulo B - Análisis de gestos corporales

El Módulo B del sistema tiene como objetivo identificar gestos posturales y comportamientos motores asociados a niveles de estrés en niños con TEA. Este componente complementa el análisis facial del Módulo A mediante la detección de patrones corporales como manos en el rostro o cabeza, juegos repetitivos con las manos, conductas comúnmente vinculadas a ansiedad o sobrecarga sensorial.

Para ello, se pretende implementar una arquitectura basada en redes LSTM, entrenada con secuencias de *keypoints* generados mediante *MediaPipe Holistic* extraídos de grabaciones en video, que permita capturar las posiciones tridimensionales del cuerpo y las manos a lo largo del tiempo.

El desarrollo del Módulo B implicó la integración de herramientas especializadas en visión por computadora, procesamiento numérico y aprendizaje profundo. Estas bibliotecas fueron seleccionadas por su eficiencia, compatibilidad con flujos en tiempo real y por lotes, permitiendo construir un *pipeline* para la detección y análisis de gestos posturales, desde la captura en video hasta la interpretación de resultados del modelo LSTM. La Tabla 2.7 resume las funciones principales y aspectos técnicos de cada herramienta utilizada.

Tabla 2.7

Herramientas requeridas en el módulo B

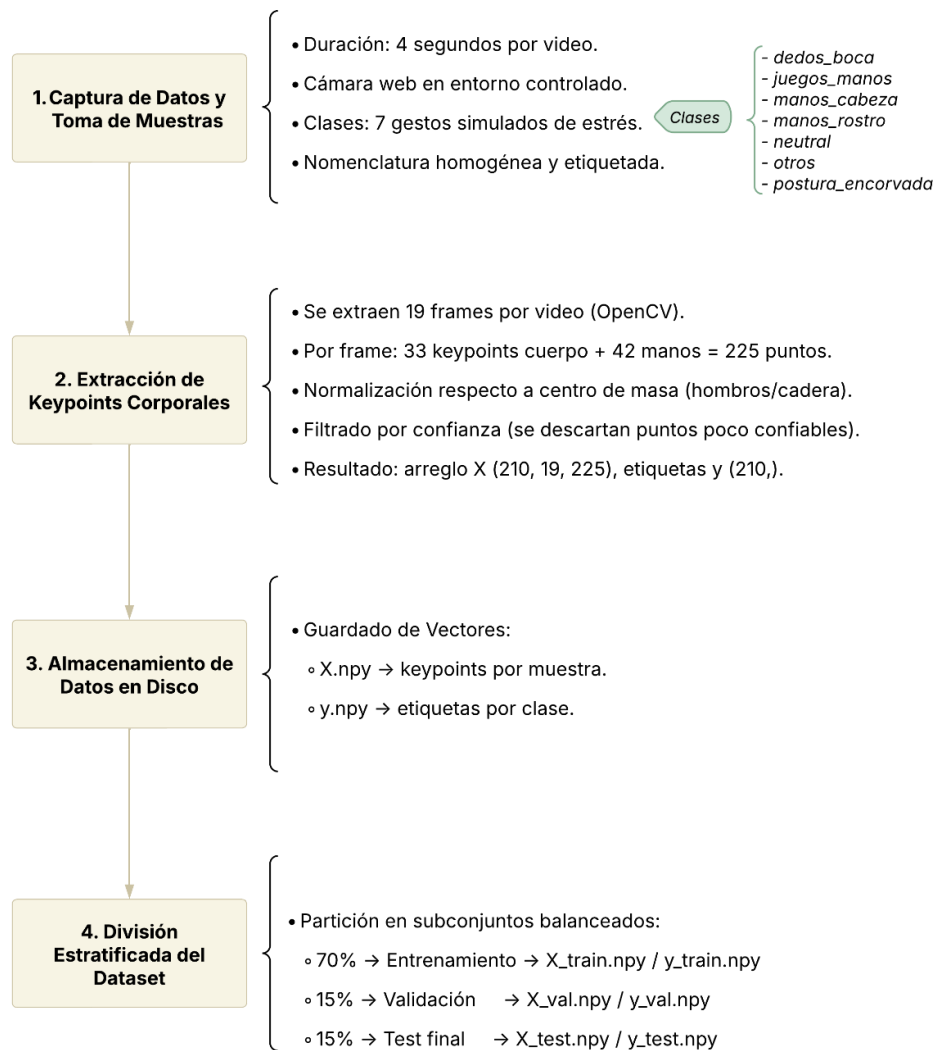
Herramienta	Función Principal	Detalles Técnicos
OpenCV	Lectura y manipulación de videos	Extracción de fotogramas individuales desde los videos; conversión a formato RGB; visualización y guardado de imágenes con landmarks superpuestos para verificación visual.
MediaPipe Holistic	Detección de keypoints del cuerpo y manos	Detecta 33 puntos del cuerpo y 21 de cada mano (225 en total). Ejecutado en modo <code>static_image_mode=True</code> para precisión por fotograma. Utiliza BlazePose y modelos de recorte para ROIs. Genera vectores 3D (x, y, z) por landmark, usados como secuencias temporales.

NumPy	Almacenamiento y manipulación de datos numéricos	Construcción de matrices 3D de entrada al modelo (19 fotogramas $\times$ 225 features). Transformación de etiquetas a formato categórico y almacenamiento en .npy.
TensorFlow / Keras	Construcción y entrenamiento del modelo LSTM	Red neuronal secuencial con capas LSTM, Dropout y Dense. Optimización con Adam; pérdida categorical_crossentropy; precisión (accuracy) como métrica. Exportación del modelo .h5 y generación de gráficos de métricas y reportes.
Scikit-learn	División de datos y evaluación del modelo	División estratificada en entrenamiento, validación y test. Generación de matrices de confusión y métricas por clase (precision, recall, F1-score).
Matplotlib / Seaborn	Visualización de resultados	Gráficos de evolución de precisión y pérdida por época. Matrices de confusión visuales para interpretar aciertos y errores del modelo.
Glob	Iteración sobre archivos	Detección automática de archivos .mp4 en carpetas de clases para procesamiento masivo.
os	Manejo del sistema de archivos	Creación y gestión de rutas y carpetas necesarias durante el procesamiento.
tqdm	Progreso visual de procesos	Barra de progreso para monitorizar procesamiento de múltiples videos, útil en flujos prolongados.

La recopilación de datos para el Módulo B se realizó mediante grabaciones controladas de corta duración, simulando distintos gestos corporales asociados a estrés infantil; cada clase fue representada por 30 videos que permiten capturar la variabilidad natural de los movimientos. El flujo mostrado en la Figura 2.23 describe el proceso seguido desde la grabación inicial hasta la estructuración del *dataset*.

Figura 2.23

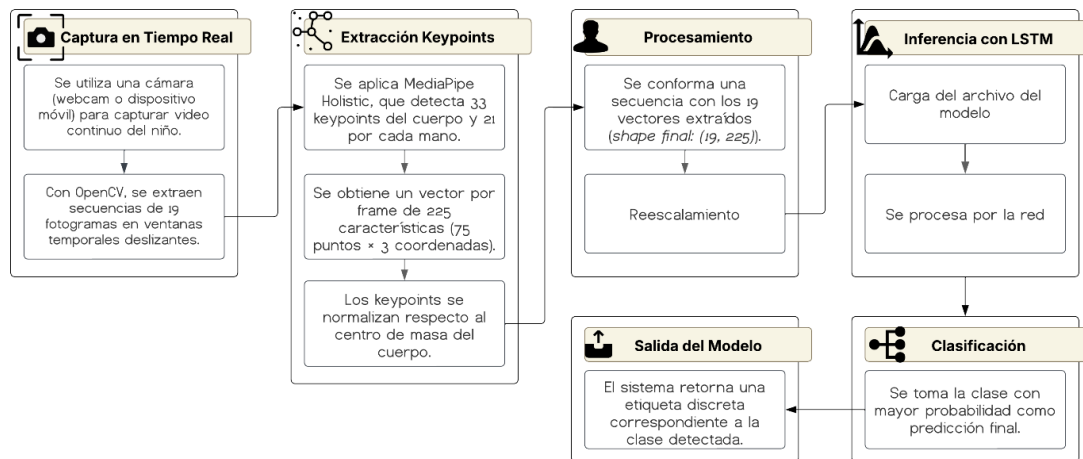
Procesamiento dataset - Módulo B



Sobre la base de datos recopilados, se diseñó un sistema de inferencia basado en redes neuronales recurrentes que procesan secuencias de *keypoints* extraídos de video en tiempo real. Su arquitectura se organiza en bloques funcionales encadenados, desde la captura del video hasta la predicción final de la clase gestual.

Figura 2.24

Flujograma del módulo B



Como se observa en la ilustración, el sistema procesa secuencias de video capturadas por cámara, extrayendo 19 fotogramas consecutivos. En cada uno se detectan 75 puntos clave del cuerpo y manos, generando 225 características por *frame*, lo que conforma una matriz de entrada de forma (19, 225). Esta representación motivó el uso de redes LSTM, adecuadas para modelar relaciones temporales complejas y dependencias a largo plazo.

Para optimizar el rendimiento, se exploraron tres configuraciones de red, variando el número de capas LSTM y su direccionalidad (unidireccional y bidireccional), unidades por capa, técnicas de regularización (Dropout, L2). Todas compartieron una arquitectura secuencial con Keras sobre TensorFlow, con entrada (19, 225) y una capa final Dense con activación softmax de 7 neuronas, correspondiente a las clases de gestos definidas. La Tabla 2.8, describe las principales características comunes a todas las arquitecturas evaluadas:

Tabla 2.8*Arquitecturas evaluadas para el módulo B*

Modelo	Capas Recurrentes	Regularización	Capa Densa	Optimizador / LR	Entrenamiento
LSTM-L2	LSTM(64, RS=True) LSTM(64, RS=False)	L2=0.001 en LSTM, Dropout=0.2	Softmax(7)	Adam, 0.0005	Epochs=150 Batch=64 patience=10
LSTM-Ligero	LSTM(20, RS=True) LSTM(10, RS=False)	Dropout=0.2	Softmax(7)	Adam (defecto)	Epochs=150 Batch=64 patience=10
BiLSTM-M-L2-Dense	BiLSTM(64, RS=True) BiLSTM(64, RS=False)	L2=0.001 en LSTM, Dropout=0.2	Dense(64, ReLU) Softmax(7)	Adam, 0.0005	Epochs=150 Batch=64 patience=12

2.6.2.1 Módulo C – Análisis de patrones de movimiento

El Módulo C del sistema propuesto se encargará de detectar patrones de movimiento corporal asociados a niveles de estrés mediante la implementación de algoritmos de flujo óptico en video. Este módulo complementará la información extraída en los módulos anteriores (emociones faciales y gestos corporales estáticos) con características dinámicas del desplazamiento temporal.

En cuanto corresponde su desarrollo, se integraron herramientas especializadas para capturar, procesar y analizar patrones dinámicos de movimiento en niños con TEA mediante flujo óptico. La estrategia adoptada se centró en el uso de un modelo preentrenado, para extraer características discriminativas de secuencias de video, permitiendo la clasificación de gestos repetitivos vinculados al estrés. En la Tabla 2.9 se describen las herramientas utilizadas y su función dentro del sistema.

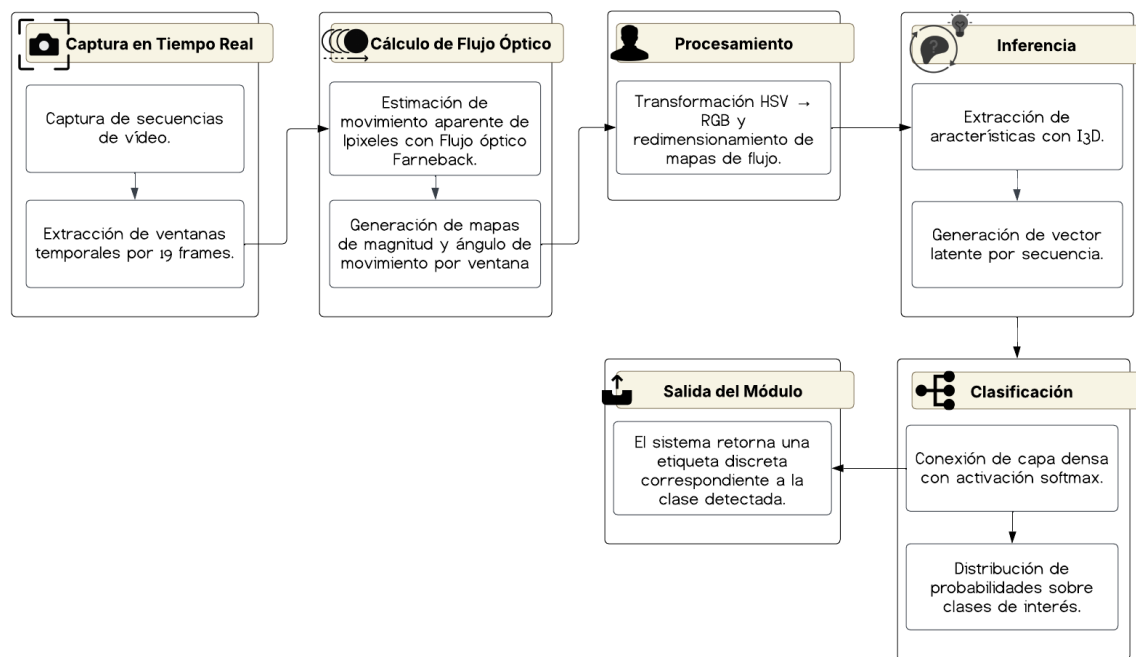
Tabla 2.9*Herramientas requeridas en el módulo C*

Herramienta	Función Principal	Detalles Técnicos
OpenCV	Captura de video y extracción de frames	Lectura de video en tiempo real, separación de secuencias de 19 frames por ventana.
Optical Flow (Farneback)	Estimación del movimiento entre frames consecutivos	Cálculo de vectores de movimiento (magnitud y dirección) por píxel.
Detectron2	Segmentación anatómica	Uso de Mask R-CNN preentrenado para aislar cuerpo, aplicando máscaras para cálculo de flujo óptico solo en regiones relevantes.
NumPy	Manipulación y almacenamiento de arreglos de flujo óptico	Transformación de vectores a formatos compatibles con redes neuronales.
TensorFlow + Keras	Inferencia con modelo preentrenado y capas personalizadas de clasificación	Carga de modelos como I3D o C3D + capa final softmax entrenada sobre nuestro dataset.
Scikit-learn	Preprocesamiento de datos y evaluación del desempeño	Normalización, codificación de etiquetas, métricas de evaluación.

Dentro flujo funcional del Módulo C, basado en la estimación de movimiento mediante flujo óptico se empleó el algoritmo de *Farneback* por su eficiencia en contextos en tiempo real; los mapas generados fueron adaptados para su procesamiento por una red I3D preentrenada, capaz de capturar patrones temporales complejos. El vector latente resultante se clasifica mediante una capa *softmax*, permitiendo detectar gestos repetitivos asociados a estrés; el proceso se aprecia a detalle en la Figura 2.25.

Figura 2.25

Flujograma del módulo C



La Tabla 2.10 sintetiza los aspectos técnicos más relevantes del modelo implementado en el Módulo C, abarcando desde la estructura de entrada y el preprocesamiento aplicado, hasta la configuración de la red y los parámetros de optimización empleados.

Tabla 2.10

Descripción técnica del flujograma del módulo C

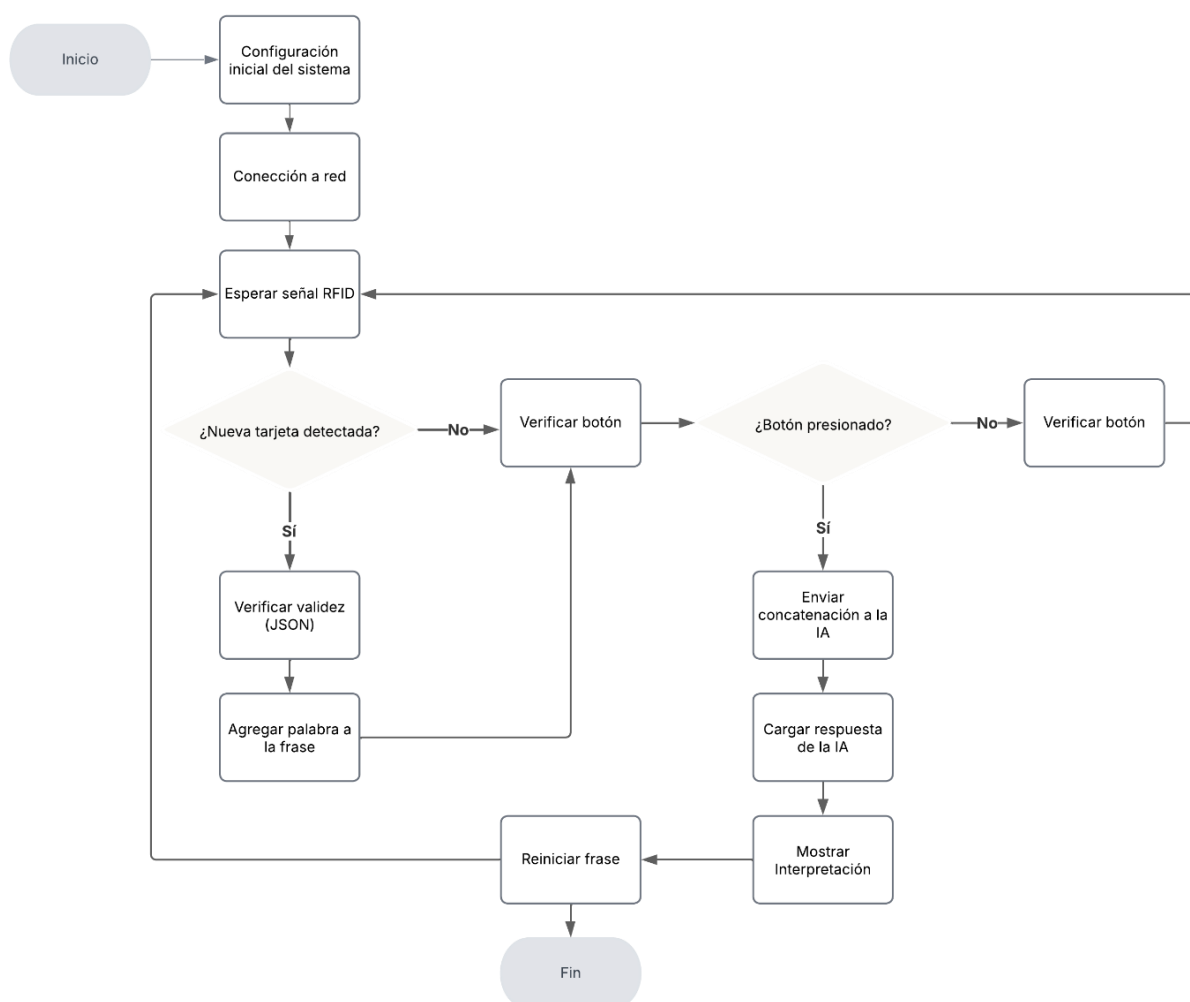
Parámetro / Componente	Características Técnicas
Tipo de entrada	Secuencia de n frames con flujo óptico (magnitud y dirección)
Preprocesamiento	Redimensión, segmentación, normalización, combinación de canales HSV / RGB
Tipo de red	CNN
Capas finales	Capa de aplanamiento + capa densa + softmax
Número de clases	4
Optimización	Adam, learning rate adaptativo
Pérdida	categorical_crossentropy (multiclase)
Salida	Etiqueta de clase correspondiente al patrón de movimiento detectado

2.6.2.2 Sistema de Comunicación PECS Asistido por IA

Este módulo implementa un sistema de comunicación aumentativa que permite a niños TEA construir frases utilizando tarjetas RFID asociadas a pictogramas; cada tarjeta representa una palabra con valor semántico. A medida que el niño pasa las tarjetas, el sistema las reconoce, valida su contenido y construye progresivamente una frase, como se ilustra en la Figura 2.26, que esquematiza el flujo completo de procesamiento.

Figura 2.26

Flujograma del sistema de comunicación PECS-RFID



Cuando el niño considera que la frase está lista, puede presionar un botón físico que desencadena el envío de la frase a un modelo de lenguaje que, mediante procesamiento contextual, reordena, corrige y completa la oración, generando una interpretación gramaticalmente correcta y fiel al mensaje original.

La interacción se realiza en tiempo real entre la ESP32, que actúa como controlador principal, y un servidor alojado en red local que ejecuta el modelo de lenguaje preentrenado deepseek-r1-0528-qwen3-8b. La comunicación se establece mediante una API HTTP expuesta por un servicio *Flask*, sin requerir conexión a internet. Este enfoque completamente local garantiza autonomía operativa, baja latencia, y mayor privacidad en el tratamiento de la información, asegurando una interpretación precisa y segura del lenguaje pictográfico infantil.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

El presente capítulo expone los resultados durante el proceso de diseño, implementación y validación preliminar del prototipo, denominado Moodi, proveniente del término inglés *mood*, que hace referencia al estado anímico o al tono emocional de una persona, lo cual refleja el propósito central del dispositivo: facilitar la comunicación aumentativa y la interpretación de estados emocionales en niños con TEA. A continuación, se presentan de manera estructurada los hallazgos alcanzados en los ámbitos mecánico, electrónico, interactivo y de procesamiento inteligente, con sus correspondientes análisis técnicos.

3.1 Resultados del diseño mecánico

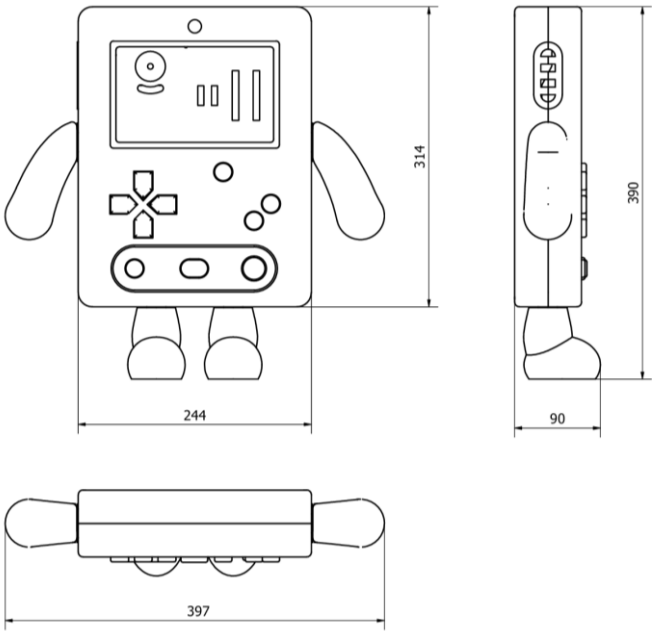
3.1.1 Dimensiones y peso global

El prototipo presenta dimensiones externas de $390 \times 397 \times 90$ mm (incluyendo extremidades) y una carcasa central de $244 \times 314 \times 70$ mm (Figura 3.1). El peso total estimado es de 1886 gramos, valor considerado compatible con la manipulación autónoma por la población usuaria prevista. Como referencia, la literatura en ergonomía pediátrica señala que la carga personal no debe superar entre el 10% y el 15 % del peso corporal en población infantil, recomendándose el límite inferior ($\approx 10\%$) para actividades de transporte, dado que valores superiores al 15% se asocian con modificaciones posturales y sobrecarga musculoesquelética [65], [66].

En este caso, el dispositivo no está destinado a ser transportado de manera continua, sino a ser manipulado en interacciones puntuales (colocarlo sobre el regazo, sostenerlo momentáneamente o abrazarlo). Bajo esta premisa, y considerando los pesos de referencia propuestos por la OMS para niños de 4 y 10 años (~ 17 kg y ~ 31 kg, respectivamente), el dispositivo representa aproximadamente 11% y 6% del peso corporal, situándose dentro de los márgenes ergonómicos recomendados [67].

Figura 3.1

Plano conjunto del Moodi



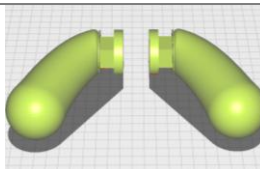
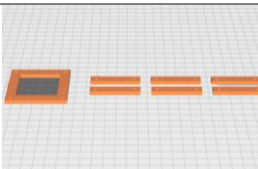
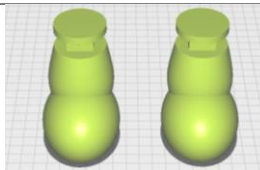
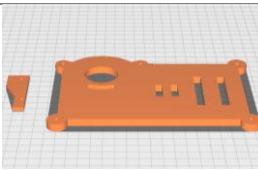
3.1.2 Estimación de masa y tiempos de fabricación

La Tabla 3.1 resume las masas aproximadas de cada pieza de la carcasa, calculadas mediante *UltiMaker Cura*, junto con los tiempos de impresión en una *Creality CR-10 MAX*, el porcentaje de relleno seleccionado y el tipo de filamento empleado, siguiendo lo establecido en la metodología. Esta información sirvió como base para proyectar el consumo de material y validar la factibilidad de producción.

Tabla 3.1

Valores aproximados de la masa de las piezas de CAD

	Pieza	Detalles		Pieza	Detalles
C. Frontal		Eryone PETG 0.4mm Nozzle Standard Quality - 0.2mm 20% 1 day 16 hours 58 minutes 416g - 136.15m Preview Save to Disk	Caja		Eryone PETG 0.4mm Nozzle Standard Quality - 0.2mm 15% 5 hours 39 minutes 47g - 15.37m Preview Save to Disk
C. Posterior		Eryone PETG 0.4mm Nozzle Standard Quality - 0.2mm 20% 1 day 20 hours 44 minutes 481g - 157.47m Preview Save to Disk	Botones		Eryone PETG 0.4mm Nozzle Standard Quality - 0.2mm 20% 3 hours 35 minutes 25g - 8.16m Preview Save to Disk

Brazos		1 Generic ABS 0.4mm Nozzle  Standard Quality - 0.2mm  50%  16 hours 57 minutes   185g - 70.09m Preview Save to Disk	Sujetadores		1 Eryone PETG 0.4mm Nozzle  Standard Quality - 0.2mm  20%  2 hours 20 minutes   15g - 4.89m Preview Save to Disk
		1 Generic ABS 0.4mm Nozzle  Standard Quality - 0.2mm  50%  16 hours 48 minutes   191g - 72.30m Preview Save to Disk			1 Eryone PETG 0.4mm Nozzle  Standard Quality - 0.2mm  20%  7 hours 29 minutes   65g - 21.40m Preview Save to Disk
Total: 1425 gramos					

3.1.3 Masa de los componentes electrónicos

La Tabla 3.2 recopila la masa de cada módulo electrónico integrado, obtenidos mediante mediciones individuales y conjuntas en una balanza digital Camry EK5055. Esta información permitió estimar la masa total del dispositivo y sirvió como insumo para el posterior análisis estructural.

Tabla 3.2

Valores de la masa de los componentes electrónicos

Pantalla LCD	Jetson Orin Nano	ESP32 – RC522
		
255 gramos	188 gramos	18 gramos
Total: 461 gramos		

3.1.4 Distribución de componentes internos

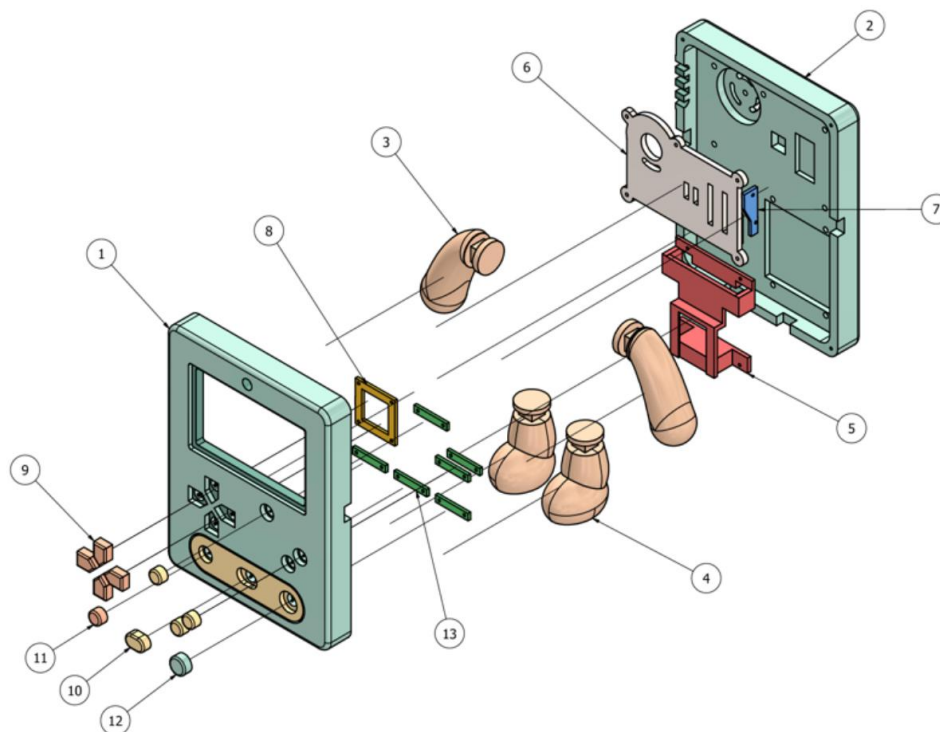
La configuración interna del dispositivo se diseñó para facilitar tanto la integración electrónica como el mantenimiento posterior. La carcasa fue segmentada en diferentes piezas, cada una con funciones específicas de soporte o alojamiento.

En la Figura 3.2 se presenta la vista explosionada del prototipo, donde se identifican las principales piezas impresas en 3D. Si bien en la ilustración no se representan directamente los

subsistemas electrónicos, la imagen incorpora señaléticas numéricas que permiten identificar la ubicación prevista de cada módulo.

Figura 3.2

Vista explosionada del prototipo



La Tabla 3.3 establece la correspondencia entre el número asignado en la figura y el componente o función asociada, así como la cantidad empleada para el ensamble.

Tabla 3.3 Lista de piezas requeridas para el ensamble del prototipo

Nº	Cantidad	Pieza
1	1	Carcasa frontal
2	1	Carcasa posterior
3	2	Brazo Moodi
4	2	Pie Moodi
5	1	Apoyo Jetson (<i>Housing</i>)
6	1	Tapa de los componentes internos
7	1	Acople RFID
8	1	Sujetador de los botones direccionales
9	4	Botón direccional

10	1	Botón largo
11	4	Botón pequeño
12	1	Botón grande
13	6	Sujetador de botón unitario

3.1.5 *Análisis estructural (FEA en Inventor)*

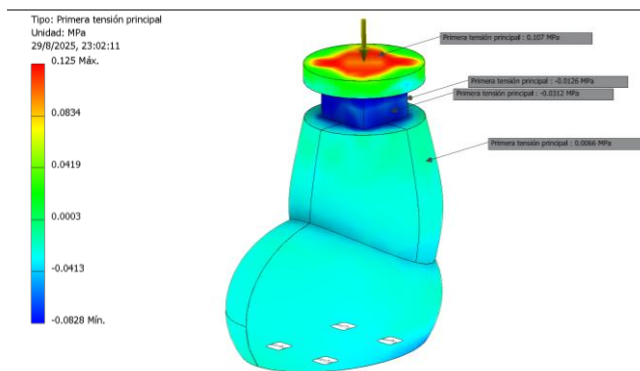
Se efectuó un análisis por elementos finitos (FEA) en Autodesk Inventor, aplicando una carga axial de 30 N sobre uno de los pies del prototipo. Este valor se definió como condición de diseño altamente conservadora, ya que no solo excede la carga estática equivalente al peso del dispositivo, sin considerar los pies (masa aproximada de 1.695 kg, corresponde a una fuerza gravitacional de 16.62 N), sino que además concentra el esfuerzo total en un único punto de apoyo, simulando que todo el peso recae sobre un solo pie del muñeco.

El material fue caracterizado con las propiedades mecánicas del ABS establecidas en la metodología para un relleno del 50%: Módulo de Young (E) = 2.3 GPa, Coeficiente de Poisson (ν) = 0.37, Esfuerzo de fluencia (σ_y) = 16 MPa y Resistencia última a la tracción (UTS) = 20 MPa. Los resultados del análisis se encuentran resumidos en la Tabla 3.4, donde se detallan las magnitudes críticas evaluadas, incluyendo tensiones de Von Mises, tensiones principales, desplazamientos y factor de seguridad.

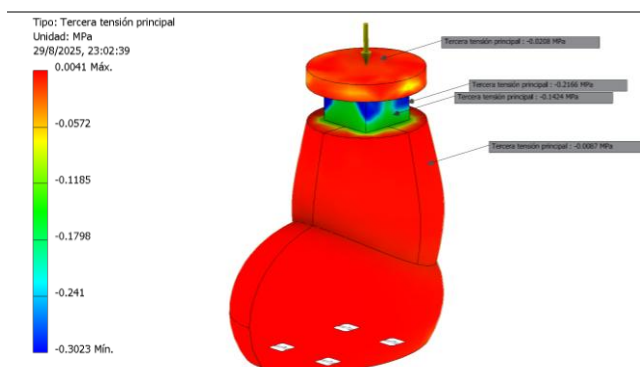
Tabla 3.4

Resultados del análisis estructural 30 N

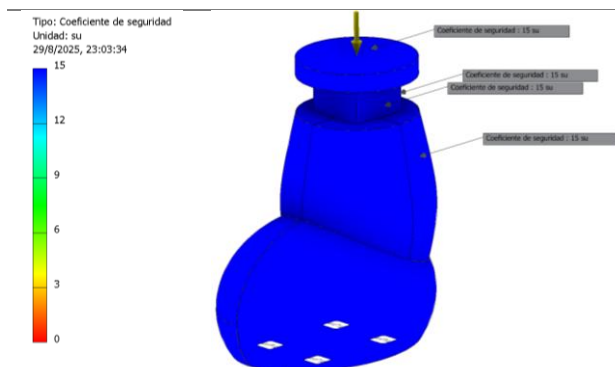
Métrica	Imagen	Análisis
Tipo: Tensión de Von Mises Unidad: MPa 29/8/2025, 22:51:32 0.2234 Máx. 0.1788 0.1342 0.0896 0.045 0.0004 Mín.		La distribución de la tensión equivalente de Von Mises bajo una carga axial de 30 N alcanzó un valor máximo de 0.223 MPa. Las sondas adicionales registraron 0.124, 0.0208, 0.107 y 0.0143 MPa, lo que evidencia que los esfuerzos se concentran en la zona superior, mientras que el resto del pie mantiene cargas mínimas. En todos los casos, los valores se mantuvieron muy por debajo del límite de fluencia del material (16 MPa), lo que confirma un amplio margen de seguridad.



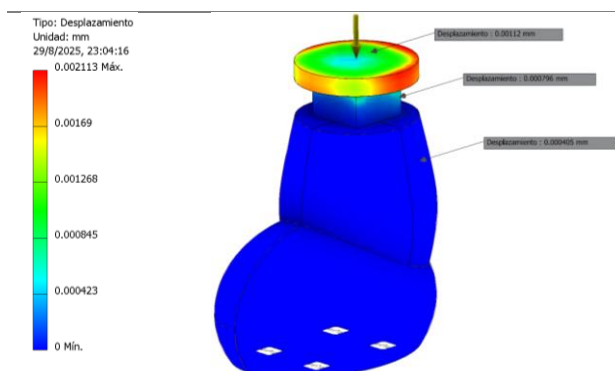
Se muestra la primera tensión principal, que representa los esfuerzos máximos de tracción. El valor más alto registrado fue de 0.125 MPa en la zona de aplicación de la carga. Adicionalmente, se identificaron pequeñas áreas con valores negativos (-0.012 a -0.031 MPa), correspondientes a compresiones locales alrededor del encaje. En general, las tensiones de tracción se mantienen muy por debajo de la resistencia última del material.



Se presenta la tercera tensión principal, asociada a los esfuerzos de compresión. El valor mínimo de las sondas fue de aproximadamente -0.216 MPa en la unión del pie-encaje, coherente con el estado de carga axial. El resto de la pieza muestra una distribución homogénea de compresiones bajas, sin presencia de concentraciones críticas. Esto confirma que la bota trabaja predominantemente en compresión bajo la condición de carga impuesta.



El análisis de coeficiente de seguridad mostrado arrojó un valor uniforme igual a 15 en toda la geometría. Cabe destacar que este valor corresponde al límite superior de la escala configurada en el software, por lo que el coeficiente real frente al límite de fluencia es aún mayor (≈ 72 según el cálculo analítico). Este resultado evidencia que la pieza posee un margen de seguridad muy elevado frente a la falla estructural.

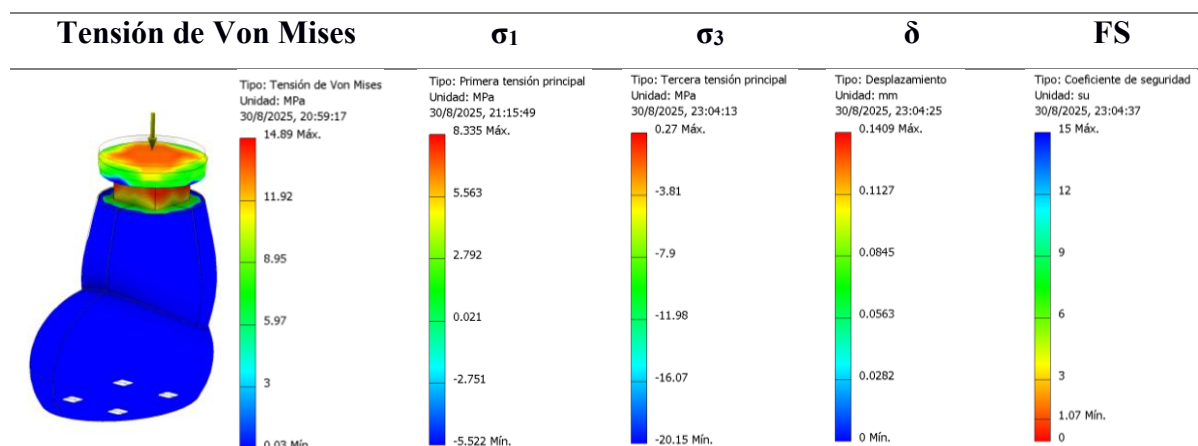


Finalmente, se aprecia el mapa de desplazamientos totales. El máximo desplazamiento fue de 0.0021 mm, localizado en la plataforma superior, mientras que en otras zonas se registraron valores entre 0.0004 mm y 0.0011 mm. Estas deformaciones son prácticamente despreciables en términos funcionales, garantizando que la bota mantendrá su forma y estabilidad durante el uso estático previsto.

Además, para evaluar el comportamiento límite de la bota, se realizó una simulación adicional aplicando una carga axial de 2000 N (~200 kgf). Los resultados de las métricas se presentan en la Tabla 3.5, con su respectivo análisis.

Tabla 3.5

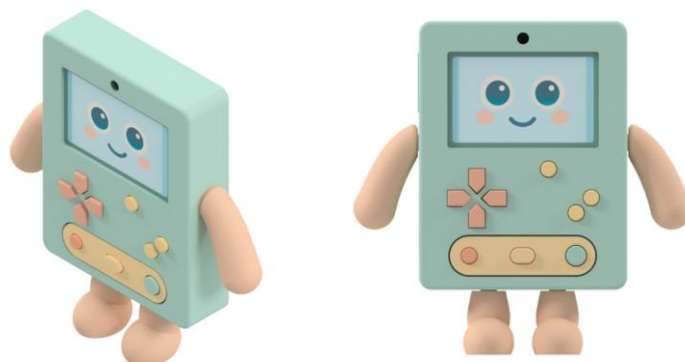
Resultados del análisis estructural 2000N



En este escenario, las tensiones principales alcanzaron valores de 8.34 MPa en tracción y -20.15 MPa en compresión, mientras que el desplazamiento máximo fue de apenas 0.14 mm, reflejando una alta rigidez estructural. El coeficiente de seguridad mínimo se redujo a 1.07, confirmando que la pieza se sitúa en el umbral elástico, pero sin superar la fluencia del material (14.89 MPa < 16MPa). Este resultado demuestra que, aun multiplicando la carga real de trabajo por más de 60 veces, el pie no falla inmediatamente, lo que refuerza la conclusión de que en las condiciones reales de uso (~30 N) el diseño opera con un margen extremadamente holgado, óptimo para uso con infantes.

3.1.6 Aspectos estéticos

Además de las consideraciones funcionales y estructurales, se abordaron los aspectos estéticos del prototipo, con el propósito de favorecer la aceptación y la interacción por parte de los usuarios. El modelo final se ensambló y se renderizó en Inventor Studio, obteniendo visualizaciones foto-realistas que facilitaron la evaluación de la morfología, las proporciones y la integración global de los componentes.

Figura 3.3*Primera versión cromática del Moodi*

De manera complementaria, se exploró la posibilidad de generar variantes cromáticas del diseño, manteniendo inalterada la arquitectura estructural y electrónica. Este recurso busca adaptarse a las preferencias perceptivas y sensoriales de los niños con TEA, favoreciendo la familiarización con el dispositivo y reduciendo la resistencia inicial a su uso. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de dicha variante, donde el cambio de colorimetría constituye un factor de personalización potencial para distintos perfiles de usuario.

Figura 3.4*Segunda versión cromática del Moodi*

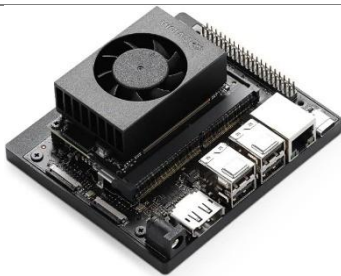
3.2 Resultados del diseño electrónico

La arquitectura electrónica final se configuró siguiendo criterios de modularidad, robustez y escalabilidad, garantizando la integración eficiente de los subsistemas y su compatibilidad con los requerimientos de interacción multimodal. Este enfoque asegura la

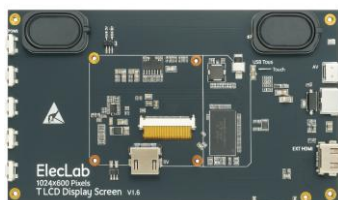
posibilidad de ampliación futura sin comprometer la estabilidad del diseño. Los componentes seleccionados, sintetizan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6

Selección de componentes electrónicos

Unidad de Procesamiento	
	Jetson Orin Nano (8 GB RAM) Adoptada como núcleo de cómputo debido a su capacidad de procesamiento paralelo con aceleración GPU, indispensable para la ejecución en tiempo real de modelos de visión por computadora y análisis de lenguaje natural. Sus múltiples interfaces (USB, I ² C, SPI y GPIO) facilitaron la conexión directa con periféricos, minimizando latencias y simplificando la integración física.
Microcontrolador Auxiliar	
	ESP32 Implementado como subsistema complementario para la gestión de comunicaciones ligeras y la integración de periféricos de bajo costo. Su incorporación resultó estratégica al habilitar la transmisión de notificaciones mediante protocolos de mensajería (ej. Telegram), reduciendo la dependencia de módulos adicionales en la Jetson Orin Nano, y proporcionar una interfaz directa con el lector RFID a través de buses de comunicación serial.
Lector RFID	
	RC522 Seleccionado por su operación en la frecuencia estándar de 13.56 MHz, su bajo costo y estabilidad en la detección sin contacto físico estricto. Estas características lo convierten en una solución idónea para contextos de interacción espontánea, al facilitar la manipulación y reducir las exigencias de precisión motriz en niños con TEA.
Pantalla	
	ElecLab 7" HDMI v1.6, Táctil Capacitiva Seleccionada por su resolución nativa de 1024×600 píxeles y tecnología IPS, que garantizan la representación nítida de animaciones gráficas con amplios ángulos de visión y brillo estable bajo condiciones de iluminación interior. Su compatibilidad con la interfaz HDMI a DisplayPort asegura la transmisión simultánea de video y audio, simplificando la integración sin necesidad de hardware adicional. Finalmente, la funcionalidad táctil capacitiva establece una base sólida para la incorporación de futuras dinámicas interactivas de tipo lúdico-terapéutico y de comunicación aumentativa.

Audio



ElecLab 7" HDMI v1.6, Táctil Capacitiva

Se gestiona a través de los dos altavoces de 2W integrados en la pantalla, cuya potencia es suficiente para el contexto de uso previsto. A diferencia de los parlantes empleados en juguetes electrónicos de bajo costo, que suelen generar saturación acústica y pérdida de claridad en frecuencias medias-altas a volúmenes elevados, esta configuración asegura un equilibrio adecuado entre calidad sonora, dimensiones compactas y compatibilidad con el entorno de uso. En consecuencia, no se requirió un subsistema auditivo externo.

Cámara Frontal



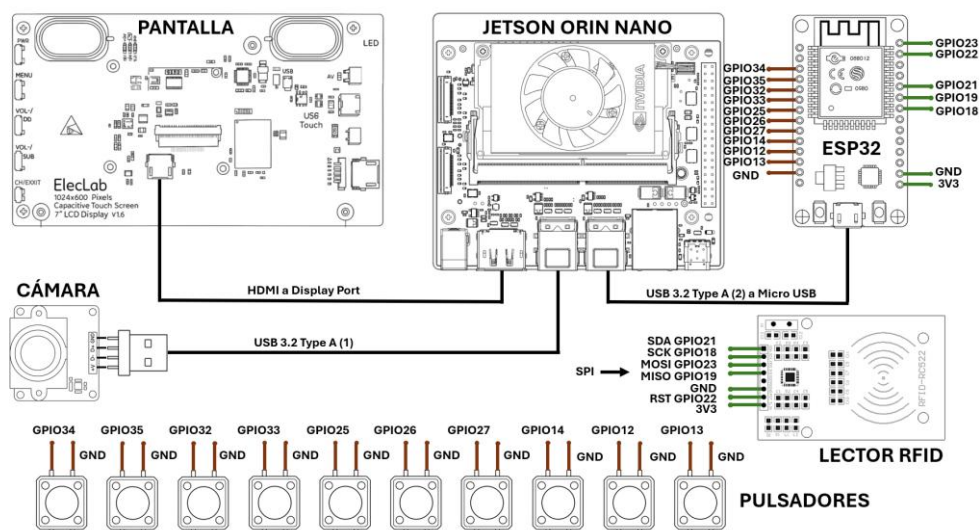
USB VMAX HD 1080p

Integrada como medio de captura de señales no verbales, con capacidad de registrar expresiones faciales en resolución Full HD. Su compatibilidad nativa con USB permitió conexión directa a la Jetson Orin Nano sin necesidad de interfaces adicionales. El módulo fue desensamblado y reconfigurado para optimizar el aprovechamiento volumétrico, garantizando un ángulo de captura acorde con la posición esperada del usuario durante la interacción.

Complementariamente, en la Figura 3.5 se presenta el esquema de conexiones entre los principales componentes electrónicos del sistema. Este diagrama ilustra la relación jerárquica entre la Jetson Orin Nano como unidad de procesamiento central, la ESP32 como microcontrolador auxiliar y los periféricos asociados.

Figura 3.5

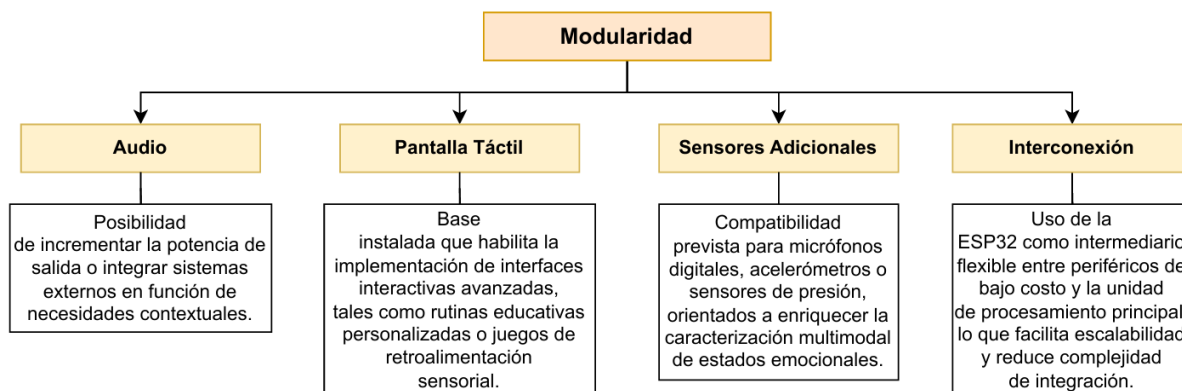
Plano electrónico del Moodi



En este sentido, el esquema adoptado presenta un alto grado de modularidad, lo que permite sustituir o ampliar subsistemas sin comprometer la arquitectura general. Los aspectos más relevantes se destacan en la Figura 3.6.

Figura 3.6

Enfoque de modularidad propuesto para el proyecto



3.2.1 Costos estimados del prototipo

Con el objetivo de evaluar la factibilidad económica del diseño, se elaboró una estimación de costos que considera tanto los principales componentes electrónicos como las piezas impresas en 3D. El costo total aproximado de construcción del prototipo asciende a 364,46 USD. La Tabla 3.7 presenta el detalle de cada ítem con su respectivo costo, lo que permite dimensionar los recursos necesarios para la fabricación y establecer una referencia preliminar para eventuales réplicas o procesos de escalamiento.

Tabla 3.7

Detalle de los costos del prototipo

Ítem	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Impresiones 3D en PETG	1.049 kg	\$22.00 (1 kg)	\$23.07
Impresiones 3D en ABS	0.376 kg	\$20.00 (1 kg)	\$7.52
Jetson Orin Nano	1 u	\$249.00	\$249.00
ESP32	1 u	\$9.50	\$9.50
Lector RFID RC522	1 u	\$5.69	\$5.69
ElecLab 7" HDMI v1.6	1 u	\$49.99	\$49.99
USB VMAX HD 1080p	1 u	\$18.19	\$18.19
Pulsador (4 patas)	10 u	\$0.15	\$1.50

En todo caso, el costo estimado de construcción del prototipo es considerablemente menor al de dispositivos comerciales de comunicación aumentativa, cuyo rango habitual se sitúa entre 600 y 5000 USD. Esta diferencia confirma la viabilidad del diseño como alternativa accesible, al ofrecer por un costo reducido un sistema con capacidades multimodales de interacción y un alto potencial de impacto en entornos educativos y terapéuticos para niños con TEA.

3.3 Resultados de la interfaz animada y sensorial

La interfaz animada se diseñó como un módulo de interacción audiovisual orientado a reforzar la comunicación aumentativa y la respuesta emocional en los niños con TEA. Los resultados preliminares muestran la integración de expresiones faciales animadas, respuestas auditivas y secuencias multimodales que constituyen la base de un entorno más inmersivo y accesible.

3.3.1 Producción de audios y voces seleccionadas

Se generó un conjunto de 55 frases pregrabadas, organizadas bajo la estructura pedagógica entrada–modelado–respuesta, con el objetivo de favorecer la repetición, el aprendizaje y la interacción natural. Para la selección de las voces se realizaron pruebas piloto con diferentes perfiles:

- **Voz femenina joven:** finalmente adoptada como la opción principal en esta etapa, debido a su timbre suave y prosodia amigable, percibida como más cercana y atractiva para la población infantil.
- **Voz materna y voz de adulto mayor femenino:** grabadas en paralelo como opciones de respaldo, dado que la familiaridad de estas voces podría ofrecer mayor confort emocional y seguridad en algunos perfiles de usuario.

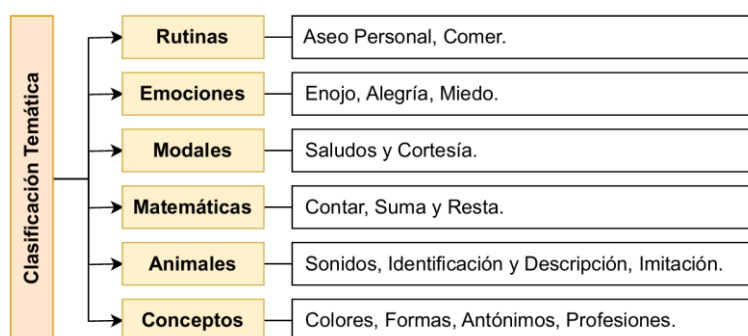
La decisión de descartar las voces de los propios desarrolladores se fundamentó en criterios de adecuación perceptual: timbres graves o demasiado impersonales pueden resultar poco congruentes con frases de acompañamiento infantil (ej. “juega conmigo”), lo que podría generar rechazo o interpretarse como intimidante. Este hallazgo abre la posibilidad de que, en fases posteriores, el sistema incorpore configuraciones personalizables de voz, similar a los asistentes virtuales comerciales, permitiendo adaptar la modalidad expresiva a las preferencias individuales de cada niño.

3.3.2 *Categorías de audios implementadas*

Los audios fueron clasificados en seis categorías temáticas (Figura 3.7), diseñadas para abarcar tanto rutinas cotidianas como aprendizajes básicos y estados emocionales. Entre ellas destacan:

Figura 3.7

Categorías temáticas de los audios



Este esquema favorece la generalización del aprendizaje y la transferencia entre contextos (hogar, escuela, terapia), además de proporcionar material suficiente para personalizar la experiencia de acuerdo con las necesidades comunicativas y cognitivas de cada usuario.

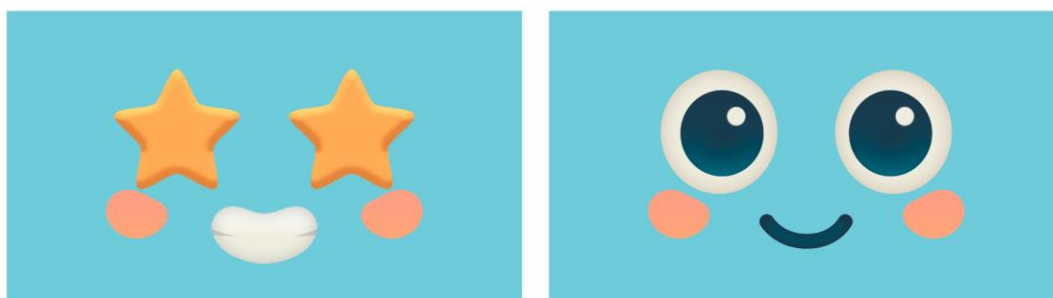
3.3.3 *Diseño gráfico y animación facial*

El desarrollo de la interfaz animada se llevó a cabo en dos etapas secuenciales: la elaboración de caras base de referencia, y la producción de animaciones sincronizadas con los audios pregrabados.

En la primera fase se diseñaron en Adobe Illustrator dos rostros iniciales: uno sonriente y otro con ojos estrellados, concebidos como prototipos gráficos para explorar estilos visuales y definir lineamientos de expresividad. Estas caras base representan únicamente el punto de partida del trabajo y no constituyen el repertorio final de expresiones, el cual está proyectado para ampliarse con nuevas configuraciones gráficas adaptadas a diferentes categorías emocionales.

Figura 3.8

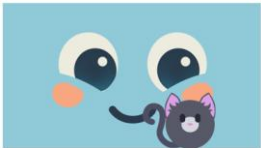
Rostros iniciales del Moodi



En la segunda fase se generaron cuatro animaciones piloto, realizadas en Adobe After Effects y sincronizadas con frases seleccionadas del conjunto de audios. Cada animación se diseñó con coherencia audiovisual, integrando tanto los cambios gestuales del personaje como la aparición de elementos gráficos adicionales que refuerzan el mensaje expresado. Los resultados se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8

Resultado de las animaciones

Frase (Audio)	Descripción	Fotogramas	
¿Qué cosas te hacen sonreír? (pausa) ¡A mí me alegra jugar contigo!	La animación representa al personaje sonriendo progresivamente, reforzando la emoción positiva mediante transiciones faciales suaves.		
¿Qué sonido hace el perro? (pausa) ¡Guau guau!	La animación incorpora un perro ladrando en pantalla, acompañado de gestos congruentes para favorecer la asociación entre estímulo auditivo y estímulo visual.		
¿Y el gato? (pausa) ¡Miau! ¡Eso es!	El personaje interactúa visualmente con la aparición de un gato, reforzando la respuesta correcta con expresiones dinámicas de entusiasmo.		
¿Qué color tiene una manzana? (pausa) ¡Rojo! Muy bien.	Se representa gráficamente una manzana mientras los ojos del personaje recorren su contorno, reforzando el concepto verbal.		

3.4 Resultados de programación

3.4.1 Resultados del Módulo A – Reconocimiento de emociones faciales

El Módulo A se centró en la detección de emociones faciales en tiempo real como indicador primario de estrés; se empleó el detector MTCNN, que permitió localizar la región facial de manera estable incluso con variaciones de ángulo e iluminación, y posteriormente se utilizó la librería *DeepFace* para la clasificación de siete emociones básicas.

En las pruebas de ejecución en vivo, el sistema mostró un desempeño estable, si bien los porcentajes de probabilidad emitidos por *DeepFace* usando el *backend* MTCNN se mantuvieron en torno al 50% en promedio, el modelo fue capaz de identificar correctamente la emoción dominante en la mayoría de los casos. Esta información fue procesada adicionalmente

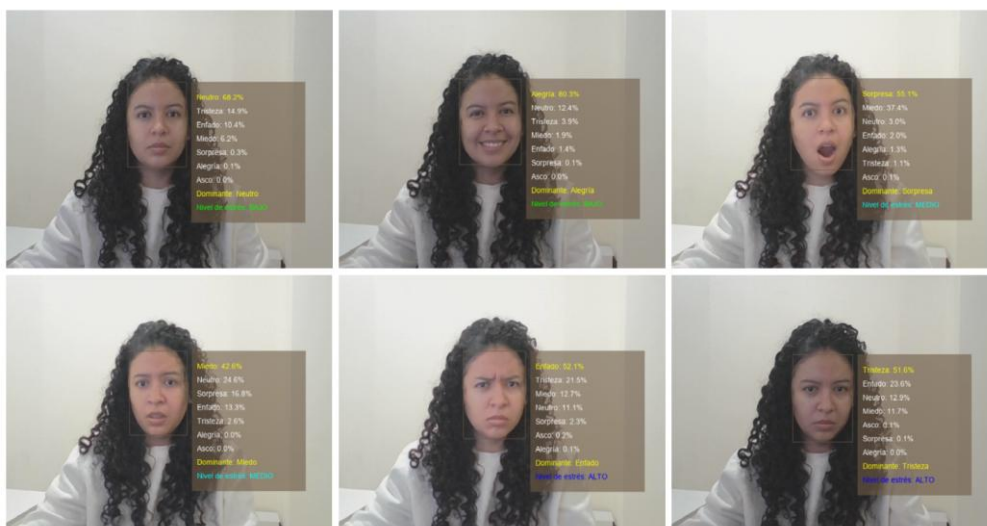
mediante una regla heurística, asignando niveles de estrés (bajo, medio, alto) en función de la emoción detectada. En la Figura 3.9 se muestran ejemplos de salida en tiempo real, donde se aprecia el rostro detectado con MTCNN, el panel de probabilidades emocionales y el nivel de estrés resultante.

Se evaluaron de manera exploratoria otros detectores faciales, como Mediapipe y RetinaFace; el primero ofreció mayor velocidad, pero presentó mayor confusión en expresiones, mientras que el segundo alcanzó mayor precisión nominal exigiendo una carga computacional demasiado elevada, lo cual redujo la viabilidad de operación en tiempo real sobre el hardware objetivo. Por esta razón, se mantuvo MTCNN como *backend* principal, al ofrecer un mejor equilibrio entre precisión y eficiencia.

Como limitaciones, se identificó que condiciones de baja iluminación y rostros parcialmente ocluidos reducen la confianza de las predicciones, además de observarse confusiones entre clases adyacentes (neutral y felicidad leve). No obstante, el módulo demostró capacidad para discriminar emociones negativas (tristeza, enfado, miedo), asociadas a mayor probabilidad de estrés, frente a emociones positivas/neutrales asociadas a niveles bajos de activación.

Figura 3.9

Pruebas del reconocimiento de emociones faciales



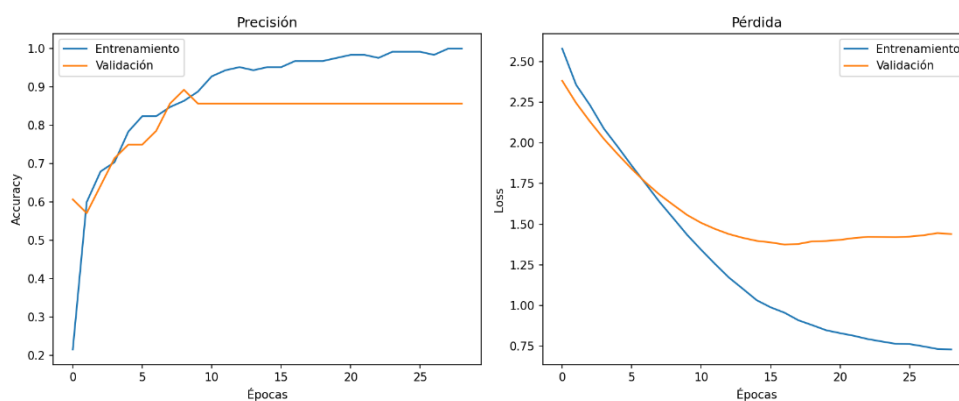
Las pruebas en tiempo real donde destacaron seis emociones predominantes pueden visualizarse en la Figura 3.9.

3.4.2 Resultados del Módulo B – Gestos corporales y posturas

El Módulo B se enfocó en la clasificación de gestos corporales que constituyen indicadores conductuales de estrés en niños con TEA; para el entrenamiento se optó por una arquitectura bidireccional LSTM, para capturar dependencias temporales en secuencias de *keypoints* extraídos mediante *MediaPipe Holistic*.

Figura 3.10

Gráficas de precisión y pérdida del módulo B



En la Figura 3.10 puede observarse un incremento sostenido de la precisión en ambas fases durante las primeras épocas, con un punto de estabilización alrededor de la época 10, donde se alcanzó un valor cercano al 100% de exactitud en entrenamiento y se estabilizó en aproximadamente 85% en validación. Este comportamiento evidencia un ajuste adecuado del modelo al conjunto de entrenamiento, aunque con una ligera tendencia al sobreajuste (*overfitting*) en las últimas épocas; la evolución de validación en la gráfica de pérdida se estabiliza también alrededor de 1.35–1.4 después de 15 épocas, mostrando una ligera tendencia a aumentar hacia el final, lo que confirma el inicio de sobreajuste.

El comportamiento se atribuye a la limitada disponibilidad de datos; la aplicación de regularización L2 y *dropout* mitigó parcialmente el sobreajuste, aunque sin eliminarlo,

evidenciando la necesidad de ampliar el volumen y variabilidad del conjunto para fortalecer la generalización.

Tabla 3.9

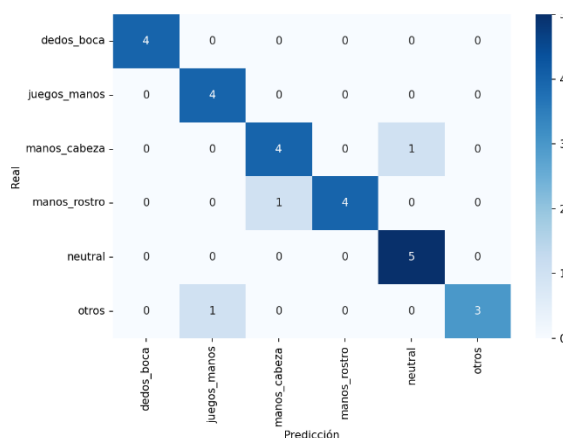
Métricas resultantes del módulo B

Clase	Precisión	Recall	F1-score	Soporte
Dedos en boca	1.00	1.00	1.00	4
Juegos de manos	0.80	1.00	0.89	4
Manos en cabeza	0.80	0.80	0.80	5
Manos en rostro	1.00	0.80	0.89	5
Neutral	0.83	1.00	0.91	5
Otros	1.00	0.75	0.86	4
Accuracy				0.89
Macro avg				0.89
Weighted avg				0.89

Los resultados cuantitativos sobre el conjunto de prueba se presentan en la Tabla 3.9, evidenciando que el sistema alcanzó un accuracy global de 88.9%, con promedios macro de 0.91 en precisión, 0.89 en recall y 0.89 en F1-score. Se observa un desempeño sobresaliente en las clases dedos en boca ($F1=1.00$) y neutral ($F1\approx 0.91$), mientras que las clases manos en cabeza y otros presentan valores ligeramente inferiores debido a confusiones con clases adyacentes.

Figura 3.11

Matriz de confusión del módulo B



La Figura 3.11 muestra la matriz de confusión generada a partir de las predicciones en el conjunto de prueba con 27 instancias, derivado de la partición 70-15-15 de los datos para entrenamiento, lo que restringe la variabilidad observada; se revela un desempeño perfecto en las clases dedos en boca y juegos de manos, mientras que se registraron confusiones puntuales entre manos en cabeza y manos en rostro, gestos que presentan proximidad espacial y similitudes posturales, lo que dificulta su discriminación. Asimismo, en la categoría otros se observó confusión con juegos de manos, atribuible a la heterogeneidad intrínseca de dicha clase.

Figura 3.12

Pruebas del reconocimiento de gestos corporales y posturas



Se realizaron pruebas en tiempo real del Módulo B, donde el sistema procesó secuencias de keypoints extraídos mediante MediaPipe Holistic y clasificó dinámicamente los gestos corporales. En la Figura 3.12 se muestran capturas representativas de la salida en vivo, correspondientes a las seis clases.

3.4.3 Resultados del Módulo C – Flujo óptico y movimientos repetitivos

El Módulo C consistió en la detección de patrones motores asociados a distintos niveles de estrés mediante flujo óptico; los videos empleados fueron descompuestos en frames y segmentados anatómicamente con *Detectron2*, como se aprecia en la Figura 3.13, logrando aislar la silueta corporal.

Figura 3.13

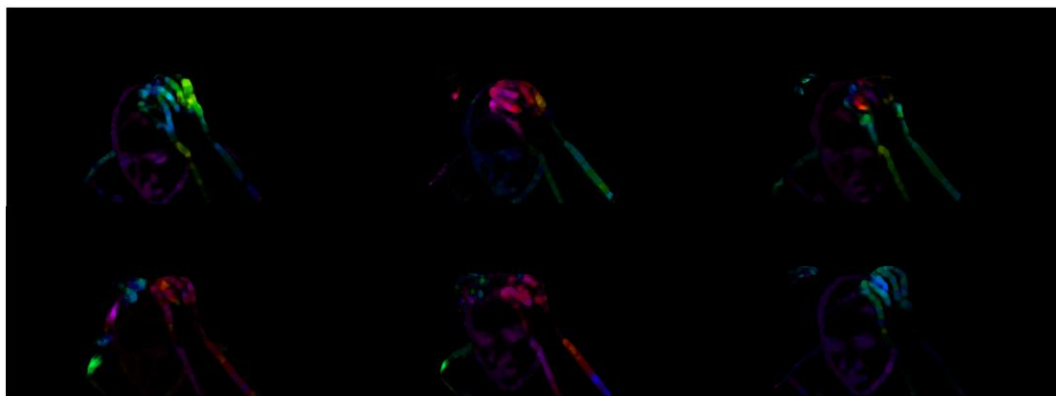
Segmentación con Detectron2



Cada par de frames consecutivos fue procesado con el algoritmo de *Farnebäck* para flujo óptico, generando magnitudes, variaciones y entropía, proyectadas en representaciones cromáticas del movimiento.

Figura 3.14

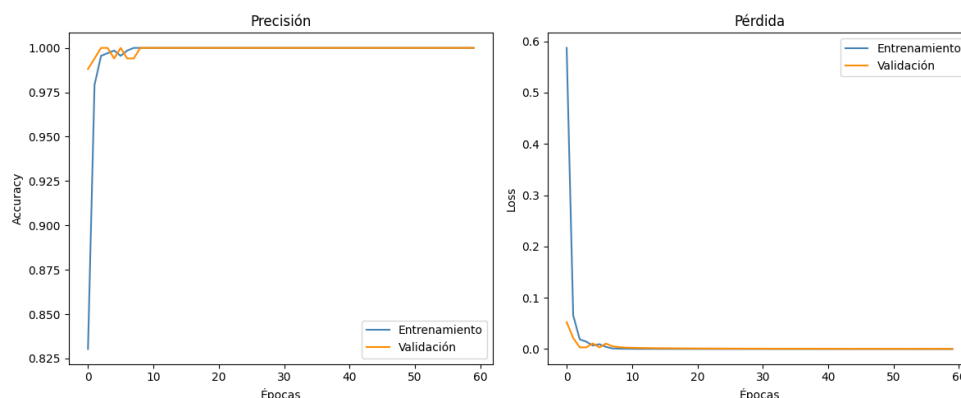
Figuras de entrada para un BILSTM



Estas imágenes resultantes expuestas en la Figura 3.14, se organizaron en secuencias de 10 fotogramas, transformadas en vectores de características mediante VGG16 preentrenada, que sirvieron de entrada a un LSTM bidireccional de dos capas con 256 neuronas ocultas y *dropout* del 50%, diseñado para capturar dependencias temporales.

Figura 3.15

Gráficas de precisión y pérdida del módulo C



La Figura 3.15 muestra las curvas de entrenamiento y validación en términos de precisión y pérdida. Desde las primeras épocas el modelo alcanzó valores cercanos al 100% de exactitud en ambos conjuntos, con una rápida convergencia de la pérdida a valores prácticamente nulos. Este comportamiento indica que el modelo no solo aprendió con rapidez los patrones discriminativos de cada clase, sino que además mantuvo una generalización consistente, sin evidencias de sobreajuste (*overfitting*). El mecanismo de *early stopping* confirmó esta estabilidad al no requerir una detención temprana prolongada, ya que el error de validación permaneció bajo y estable.

Tabla 3.10

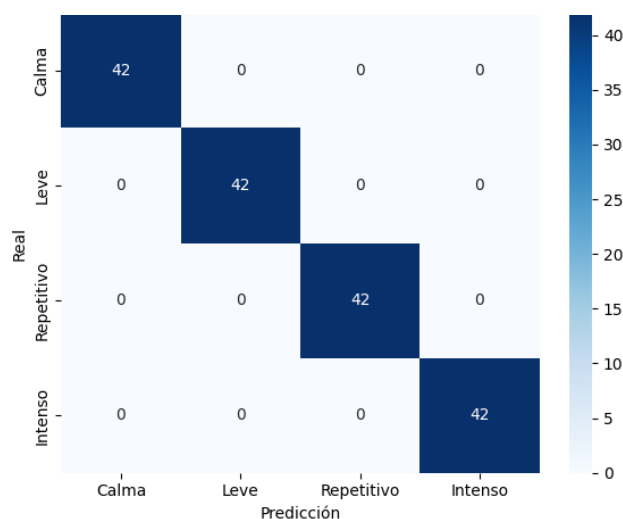
Métricas resultantes del módulo C

Clase	Precisión	Recall	F1-score	Soporte
Calma	1.00	1.00	1.00	42
Leve	1.00	1.00	1.00	42
Repetitivo	1.00	1.00	1.00	42
Intenso	1.00	1.00	1.00	42
Accuracy			1.00	168
Macro avg	1.00	1.00	1.00	168
Weighted avg	1.00	1.00	1.00	168

En la evaluación final sobre el conjunto de prueba, el sistema alcanzó un 100% de precisión, *recall* y F1-score en las cuatro clases consideradas en la Tabla 3.10. Cada clase contó con 42 secuencias en el conjunto de prueba, totalizando 168 instancias correctamente clasificadas.

Figura 3.16

Matriz de confusión del módulo C



El acierto completo presentado en la Figura 3.16 se explica por la reducción de variabilidad efectiva al agrupar *frames* en secuencias, lo que favoreció la convergencia; un script de verificación descartó *data leakage*, confirmando que el desempeño se debió al enfoque metodológico, aunque se requiere ampliar la variabilidad y el volumen de datos para fortalecer la generalización en contextos más diversos.

Figura 3.17

Predicción de las clases del módulo C



Para complementar los resultados cuantitativos, se realizaron pruebas en tiempo real del Módulo C, donde el sistema recibió secuencias de video y generó la predicción de la clase

correspondiente en cada intervalo de 10 fotogramas. En la Figura 3.17 se muestran capturas representativas de la salida en vivo para las cuatro categorías, en las que se aprecia la etiqueta generada y la correspondencia con el comportamiento observado en pantalla.

3.4.4 Sistema Final

El sistema integrado permitió unificar la información proveniente de los tres módulos A, B y C mediante un fusionador determinista en tiempo real; la orquestación de *frames* garantizó la consistencia temporal, los módulos B y C recibieron todos los fotogramas para preservar la secuencia requerida por los modelos recurrentes, mientras que el Módulo A se activó en intervalos de *ticks*, reduciendo la carga computacional del análisis facial sin pérdida de continuidad.

Las salidas de cada módulo fueron normalizadas a una escala común $[0, 3]$ en la cual 0 corresponde a estado bajo o ausencia de estrés y 3 a nivel alto, a partir de esta unificación se estableció un mapeo de etiquetas específico por módulo, de forma que categorías heterogéneas como neutral, dedos a la boca o intenso se tradujeron a valores comparables. Posteriormente, se aplicó una combinación ponderada de predicciones, con pesos fijos de configuración, modulados por un factor de calidad $q \in [0,1]$ que reflejó la fiabilidad de cada detección.

Tabla 3.11

Esquema de ponderación y clasificación multimodal

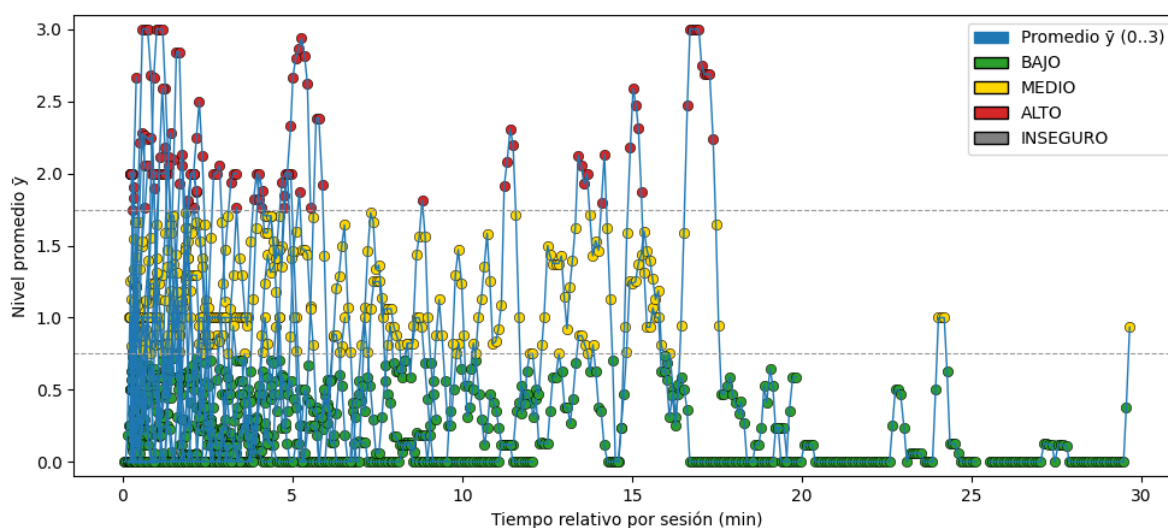
Módulo	Peso	Mapeo de etiquetas
A-Análisis facial	0.25	Neutro, alegría=0 Sorpresa, asco=1 Miedo= 2 Tristeza, Enojo=3
B-Análisis de gestos corporales	0.35	Neutral, otros=0 Dedos en boca= 1 Juego de manos=2 Manos en cabeza, manos en rostro=3

C-Análisis de patrones con flujo óptico	0.40	Calma, leve=0 Repetitivo=2 Agitación=3
--	------	--

El valor resultante $\hat{y}$ se calculó como el promedio ponderado de los niveles de los tres módulos y se redondeó al entero más cercano, garantizando una salida discreta y coherente en tiempo real.

Figura 3.18

Evolución temporal del nivel global de estrés



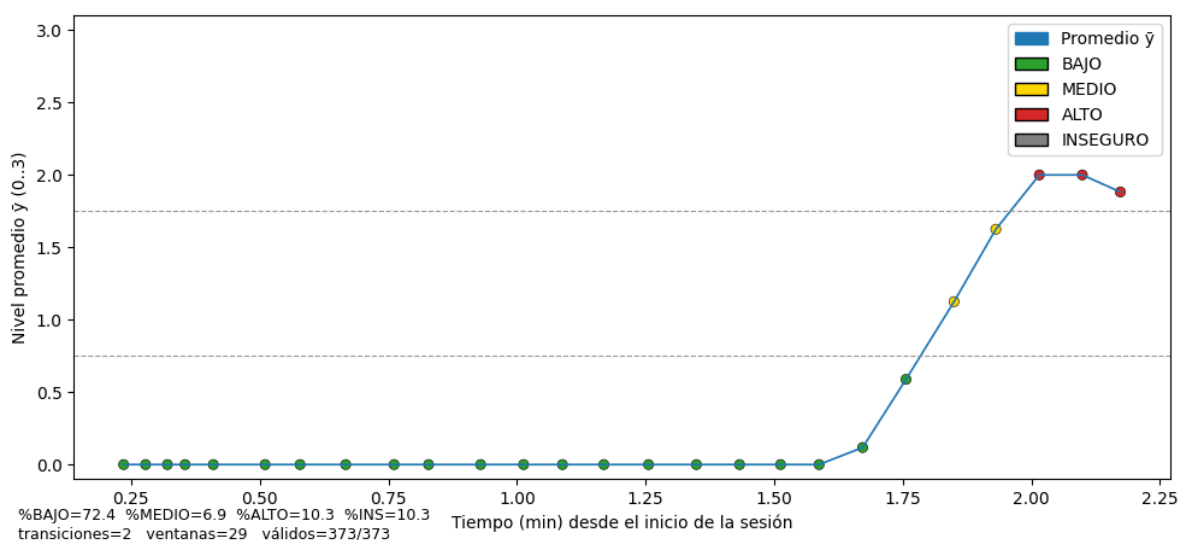
Evolución temporal del nivel global de estrés durante sesiones experimentales se expone en la Figura 3.18 donde el eje X muestra el tiempo relativo por sesión [min], y el eje Y el promedio de niveles. Los colores representan las etiquetas categóricas emitidas: Bajo (verde), medio (amarillo), alto (rojo) e inseguro (gris), mientras las líneas punteadas corresponden a los umbrales 0.75 y 1.75 empleados en la clasificación.

Por otra parte, en la Figura 3.19 se observa la evolución temporal del nivel global de estrés en una sesión específica con duración total de 2.2 minutos; durante los primeros 1.7 minutos el sistema mantuvo un estado estable bajo, pero posteriormente detectó señales consistentes en los módulos que elevaron el nivel a MEDIO y finalmente a ALTO. La transición se produce de manera progresiva gracias al esquema de histéresis, que evita

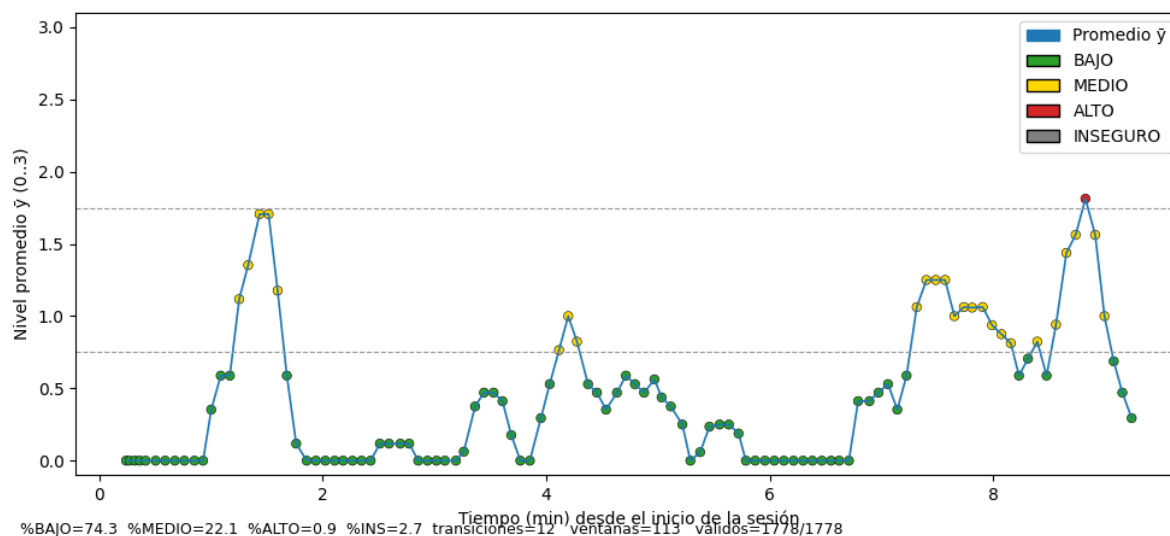
fluctuaciones espurias. La cobertura alcanzó el 100%, evidenciando que el sistema fusionó correctamente las salidas de los tres módulos en todo momento. En términos cuantitativos, el 72% de la sesión se mantuvo en bajo, con episodios puntuales en medio y alto. Esto demuestra que el sistema integrado no solo es estable, sino que responde adecuadamente a cambios en el comportamiento detectado.

Figura 3.19

Sesión corta seleccionada de prueba



Asimismo, la evolución del nivel global de estrés en una sesión más extensa de 9,2 minutos, presentada en la Figura 3.20 demuestra que el sistema mantuvo predominantemente en estado BAJO (74,3%), con incrementos transitorios hacia MEDIO (22,1%) y episodios residuales en ALTO (0,9%). La cobertura fue del 100% y se registraron 12 transiciones entre niveles, lo que refleja una dinámica estable y controlada. Estos resultados evidencian que el fusionador conserva la robustez en sesiones prolongadas, detectando cambios sostenidos sin incurrir en oscilaciones espurias.

Figura 3.20*Sesión larga seleccionada de prueba*

Finalmente, la validación cualitativa corroboró la coherencia del sistema en distintos escenarios: Bajo (avg = 0.00), producto de una emoción neutral en el Módulo A, un gesto neutral en el Módulo B y una actividad calma en el Módulo C; Medio (avg = 0.82) al detectar alegría en el rostro, gestos clasificados como “otros” y una actividad motora repetitiva y Alto (avg = 2.18), al coincidir una emoción negativa (tristeza), un gesto de manos a la cabeza y actividad de agitación corporal; esta progresión se ilustra en la Figura 3.21, evidenciando cómo la integración multimodal sostiene la consistencia del nivel global de estrés.

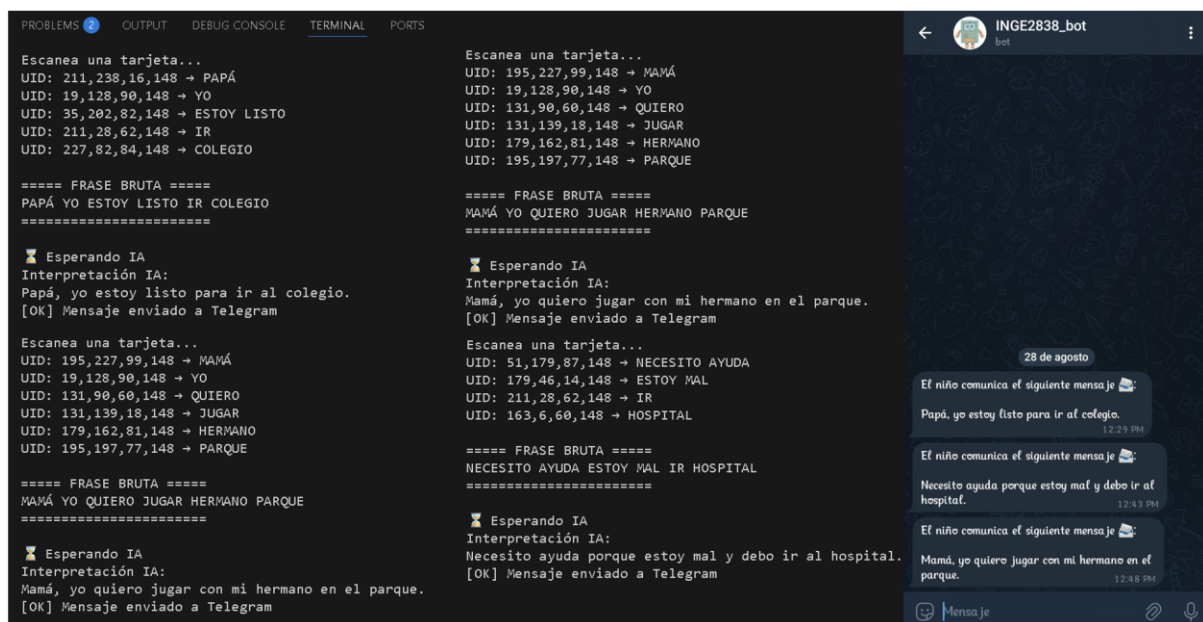
Figura 3.21*Validación cualitativa del módulo C*

3.4.5 Resultados del sistema de comunicación PECS-RFID

El sistema validó exitosamente la detección de tarjetas PECS-RFID, la construcción dinámica de frases y su reinterpretación gramatical mediante el modelo de lenguaje ejecutado localmente. La Figura 3.22 presenta un ejemplo práctico: a la izquierda se observa la salida por consola tras la lectura de las tarjetas y la generación de la “frase bruta”, mientras que a la derecha se visualiza el mensaje ya corregido y enviado automáticamente al canal de Telegram del cuidador. Este flujo evidencia la integración completa del proceso, desde la adquisición del UID hasta la comunicación efectiva con el destinatario, confirmando la robustez del *pipeline* implementado.

Figura 3.22

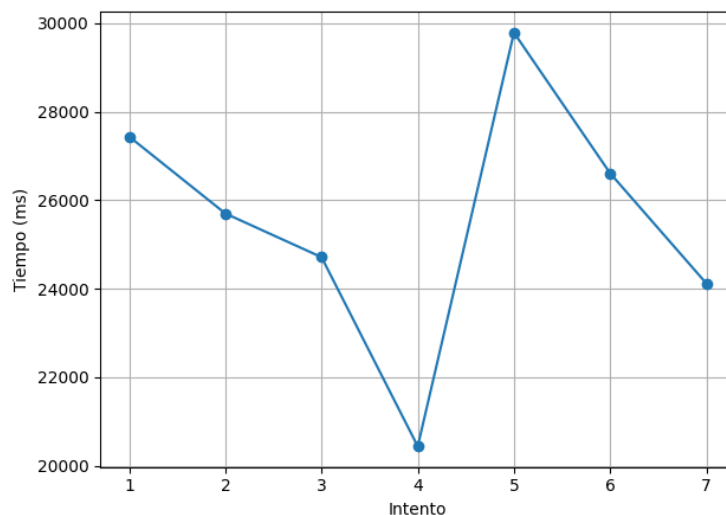
Validación experimental PECS-RFID



La validación experimental mostró que el sistema interpreta de forma coherente secuencias semánticas simples como “PAPÁ ESTOY LISTO COLEGIO”, reestructurándolas en mensajes gramaticalmente correctos, como “Papá, estoy listo para ir al colegio.” Asimismo, se comprobó el manejo de eventos no esperados (por ejemplo, tarjetas no registradas), donde el sistema bloquea el envío.

Figura 3.23

Tiempo de respuesta por intento con la comunicación PECS-RFID



En términos de desempeño, se evaluaron los tiempos de respuesta totales, comprendidos entre el envío de la frase no estructurada y la entrega por mensajería instantánea de la frase interpretada; la distribución de estos tiempos, observada en la Figura 3.23, en siete intentos consecutivos, con valores que oscilaron entre 20000 y 29000 milisegundos. Este intervalo incluye la latencia de análisis semántico en el modelo de lenguaje y la transmisión mediante HTTP/JSON. Aunque se trata de un retardo perceptible, se mantiene estable y predecible, lo cual resulta aceptable dentro del contexto de uso asistencial.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

Tras la aplicación de las fases metodológicas de diseño, implementación y validación preliminar del sistema propuesto, se obtuvieron los siguientes hallazgos que permiten concluir sobre el grado de cumplimiento de los objetivos planteados y las implicaciones del trabajo desarrollado.

4.1 Conclusiones

Tras la aplicación de las fases metodológicas de diseño, implementación y validación preliminar de la propuesta, se obtuvieron las siguientes conclusiones, que sintetizan los principales hallazgos y aportes del proyecto:

- El sistema unificó la interacción física, el procesamiento embebido y la inteligencia artificial, validando la interpretación de pictogramas en mensajes estructurados mediante un modelo de lenguaje local con latencia adecuada, mientras que el pulsador físico reforzó la confiabilidad al completar el ciclo desde la selección de tarjetas hasta la entrega digital en Telegram. La combinación de Jetson Orin Nano como unidad principal y ESP32 como controlador auxiliar evidenció una arquitectura eficiente para IA en tiempo real y control de periféricos.
- El sistema integrado de IA validó la eficacia de un enfoque multimodal para la detección de niveles de estrés en tiempo real, combinando de manera complementaria el análisis facial, la identificación de gestos corporales y la caracterización de patrones motores mediante flujo óptico. La fusión determinista, apoyada en una ponderación por calidad y un esquema de histéresis temporal, garantizó salidas estables y consistentes, reduciendo oscilaciones y permitiendo transiciones progresivas entre niveles de estrés. No obstante, el Módulo B evidenció limitaciones en la discriminación de gestos con alta similitud postural, vinculadas principalmente a la restricción del *dataset* utilizado.

Por su parte, el Módulo C alcanzó un desempeño perfecto en fase de entrenamiento, explicado por la alta diferenciación entre clases y el número reducido de instancias; sin embargo, este comportamiento sugiere posibles limitaciones al enfrentar condiciones menos controladas, como variaciones de iluminación, presencia de ruido visual o cambios en la distancia de la cámara.

- El prototipo consolidó un equilibrio entre ergonomía, seguridad y estética, con dimensiones y peso acordes al rango antropométrico de niños de 4 a 10 años que favorecen su aceptación, mientras que la integración de componentes y el uso preliminar de impresión 3D en PLA permitieron validar ensamblajes y tolerancias, asegurando la factibilidad de su fabricación definitiva en ABS y PETG, incluyendo recubrimientos con silicona de grado alimenticio en brazos y piernas. A su vez, la incorporación de animaciones gráficas con audios seleccionados bajo criterios de prosodia, organizados en 21 categorías, demostró la capacidad del sistema para ofrecer interacciones multimodales flexibles, atractivas y pedagógicamente estructuradas.

4.2 Recomendaciones

A partir de la experiencia adquirida durante el desarrollo y la validación preliminar, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer y ampliar el sistema en fases futuras.

- Diversificar los *datasets* empleados en los módulos B y C mediante técnicas de aumento de datos y estrategias de regularización, con el fin de mitigar el sobreajuste evidenciado particularmente en la clasificación de gestos corporales; para ello, resulta pertinente incorporar registros en condiciones más variadas de iluminación, con participantes de diferentes edades, estaturas y estilos de ejecución del mismo gesto, garantizando así una mayor robustez y generalización del modelo; cabe destacar que, por restricciones

de tiempo, permisos y viabilidad en la fase de desarrollo, no fue posible incluir en los conjuntos de entrenamiento datos provenientes de niños dentro del rango etario establecido con diagnóstico de TEA, lo que constituye una limitación relevante; en consecuencia, se sugiere que futuros trabajos refuercen los datasets con información recopilada directamente de esta población. Adicionalmente, es recomendable explorar la integración de arquitecturas ligeras que conserven un alto desempeño con menor demanda computacional, facilitando su ejecución en tiempo real sobre plataformas embebidas.

- Incluir en el diseño del prototipo un sistema de ventilación y disipación térmica que contrarreste la alta generación de calor de la Jetson Orin Nano dentro de la carcasa del muñeco, se sugiere evaluar opciones como rejillas de ventilación, o ventiladores silenciosos, a fin de asegurar un funcionamiento estable en tiempo real, prolongar la vida útil de los componentes y garantizar la seguridad del usuario final.
- Realizar pruebas controladas y estudios piloto con una muestra representativa de niños con TEA, extendiendo la validación a contextos reales como escuelas, clínicas de terapia del lenguaje y centros de intervención temprana, con el fin de evaluar la aceptación del prototipo, la efectividad de las respuestas multimodales y su impacto en la comunicación aumentativa.
- Incorporar opciones de voz adicionales y un repertorio ampliado de animaciones para personalizar la experiencia según las preferencias individuales de cada usuario, así como explorar la integración de nuevas modalidades sensoriales (micrófonos ambientales, sensores de presión o acelerómetros) con el fin de enriquecer la caracterización multimodal de emociones y niveles de estrés.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, “Autismo,” Salud Mental (MHE). Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/autism-spectrum-disorders-\(asd\)](https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/autism-spectrum-disorders-(asd))
- [2] A. S. Weber *et al.*, “Challenging Behaviors in Children with Nonverbal Autism: A Questionnaire to Guide the Design of a Wearable Device for Biomarker Recording,” *Sensors (Basel)*, vol. 25, no. 7, p. 2009, Apr. 2025, doi: 10.3390/S25072009.
- [3] P. Tsvetkova *et al.*, “International Perspectives on Assistive Technologies for Autism and Intellectual Disabilities: Findings from a Delphi Study,” *Disabilities 2024, Vol. 4, Pages 1138-1155*, vol. 4, no. 4, pp. 1138–1155, Dec. 2024, doi: 10.3390/DISABILITIES4040071.
- [4] W. M. Cheng, T. B. Smith, M. Butler, T. M. Taylor, and D. Clayton, “Effects of Parent-Implemented Interventions on Outcomes of Children with Autism: A Meta-Analysis,” *J Autism Dev Disord*, vol. 53, no. 11, pp. 4147–4163, Nov. 2023, doi: 10.1007/S10803-022-05688-8/FIGURES/4.
- [5] T. Shahbaz, S. Khalid, A. Amir, and S. Yaqoob, “Parenting Stress Among Parents of Children with Autism Spectrum Disorder,” *Journal of Health and Rehabilitation Research*, vol. 3, no. 2, pp. 724–729, Dec. 2023, doi: 10.61919/JHRR.V3I2.214.
- [6] A. Paris, L. D. Denne, C. F. Grindle, R. May, M. M. Apanasionok, and R. P. Hastings, “Facilitators and barriers to the implementation of the picture exchange communication system (PECS): a systematic review,” *Front Educ (Lausanne)*, vol. 9, Jun. 2024, doi: 10.3389/FEDUC.2024.1206410/BIBTEX.
- [7] L. P. M. Tsang, C. H. How, S. P. Yeleswarapu, and C. M. Wong, “Autism spectrum disorder: Early identification and management in primary care,” *Singapore Med J*, vol. 60, no. 7, pp. 324–328, Jul. 2019, doi: 10.11622/SMEDJ.2019070.
- [8] M. Al-Beltagi, N. K. Saeed, A. S. Bediwy, R. Alhawamdeh, and R. Elbeltagi, “Management of critical care emergencies in children with autism spectrum disorder,” <http://www.wjgnet.com/>, vol. 14, no. 2, Jun. 2025, doi: 10.5492/WJCCM.V14.I2.99975.
- [9] I. López, J. Jaramillo, and A. Burbano, “El Trastorno del Espectro Autista (TEA) Frente al Reconocimiento de Derechos Constitucionales de niños, niñas y adolescentes del Ecuador,” *KAIROS, REVISTA DE CIENCIAS ECONÓMICAS, JURÍDICAS Y ADMINISTRATIVAS*, vol. 6, no. 10, pp. 52–73, Jan. 2023, doi: 10.37135/KAI.03.10.03.

- [10] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), “Más de 2 millones de niños en el Ecuador viven con mascotas |,” INEC. Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/mas-de-2-millones-de-ninos-en-el-ecuador-viven-con-mascotas/>
- [11] V. Rose, D. Trembath, D. Keen, and J. Paynter, “The proportion of minimally verbal children with autism spectrum disorder in a community-based early intervention programme,” *Journal of Intellectual Disability Research*, vol. 60, no. 5, pp. 464–477, May 2016, doi: 10.1111/JIR.12284,.
- [12] J. Y. F. de Lima Antão *et al.*, “Instruments for augmentative and alternative communication for children with autism spectrum disorder: a systematic review,” vol. 73, p. e497, Jan. 2018, doi: 10.6061/CLINICS/2017/E497.
- [13] B. Scassellati, Henny Admoni, and M. Matarić, “Robots for use in autism research,” *Annu Rev Biomed Eng*, vol. 14, pp. 275–294, Aug. 2012, doi: 10.1146/ANNUREV-BIOENG-071811-150036.
- [14] L. S. Vygotski, *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*, 3a edición. Barcelona: Editorial Crítica, 2009.
- [15] M. C. Boesch, O. Wendt, A. Subramanian, and N. Hsu, “Comparative efficacy of the picture exchange communication system (PECS) versus a speech-generating device: Effects on social-communicative skills and speech development,” *AAC: Augmentative and Alternative Communication*, vol. 29, no. 3, pp. 197–209, Sep. 2013, doi: 10.3109/07434618.2013.818059.
- [16] American Psychiatric Association, *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, 5a edición. Washington, DC: American Psychiatric Publishing, 2022.
- [17] World Health Organization, *ICD-11 Implementation or Transition Guide*, 11°. World Health Organization, 2019. Accessed: Jun. 09, 2025. [Online]. Available: www.who.int/classifications/network/collaborating
- [18] World Health Organization, “Autism,” Salud Mental (MHE). Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/autism-spectrum-disorders>
- [19] L. Shalev, Y. Tsal, and C. Mevorach, “Computerized progressive attentional training (CPAT) program: Effective direct intervention for children with ADHD,” *Child Neuropsychology*, vol. 13, no. 4, pp. 382–388, Jul. 2007, doi: 10.1080/09297040600770787.

- [20] Autism Europe, “DiGitool – Digital Inclusive Tool (2021 – 2023) – Autism Europe.” Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.autismeurope.org/blog/what-we-do/digitool/>
- [21] T. Charman and K. Gotham, “Measurement Issues: Screening and diagnostic instruments for autism spectrum disorders-lessons from research and practice,” *Child Adolesc Ment Health*, vol. 18, pp. 52–63, Feb. 2013, doi: 10.1111/j.1475-3588.2012.00664.x.
- [22] M. P. Ketelaars, J. Cuperus, K. Jansonius, and L. Verhoeven, “Pragmatic language impairment and associated behavioural problems,” *Int J Lang Commun Disord*, vol. 45, no. 2, pp. 204–214, Mar. 2010, doi: 10.3109/13682820902863090.
- [23] A. C. Tamanaha *et al.*, “Picture Exchange Communication System (PECS) Implementation Program for children with autism spectrum disorder,” *Codas*, vol. 35, no. 4, p. 20210305, 2023, doi: 10.1590/2317-1782/20232021305en.
- [24] P. Howlin, R. K. Gordon, G. Pasco, A. Wade, and T. Charman, “The effectiveness of Picture Exchange Communication System (PECS) training for teachers of children with autism: a pragmatic, group randomised controlled trial,” *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 48, pp. 473–481, 2007, doi: 10.1111/j.1469-7610.2006.01707.x.
- [25] J. B. Ganz, “AAC Interventions for Individuals with Autism Spectrum Disorders: State of the Science and Future Research Directions,” *AAC: Augmentative and Alternative Communication*, vol. 31, no. 3, pp. 203–214, Jul. 2015, doi: 10.3109/07434618.2015.1047532,.
- [26] P. Buffle, A. Naranjo, E. Gentaz, and G. Vivanti, “Experiences and Attitudes on Early Identification Practices of Autism: A Preliminary Survey of Pediatric Professionals in Ecuador,” *Children*, vol. 9, no. 2, p. 123, Feb. 2022, doi: 10.3390/CHILDREN9020123.
- [27] Y. Elshar, S. Hu, K. Bouazza-Marouf, D. Kerr, and A. Mansor, “Augmentative and Alternative Communication (AAC) Advances: A Review of Configurations for Individuals with a Speech Disability,” *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 8, p. 1911, Apr. 2019, doi: 10.3390/S19081911.
- [28] A. S. Bondy and L. A. Frost, “The Picture Exchange Communication System,” *Focus Autism Other Dev Disabl*, vol. 9, no. 3, pp. 1–19, 1994, doi: 10.1177/108835769400900301.
- [29] M. Flippin, S. Reszka, and L. R. Watson, “Effectiveness of the picture exchange communication system (PECS) on communication and speech for children with autism spectrum disorders: A meta-analysis,” *Am J Speech Lang Pathol*, vol. 19, no. 2, pp. 178–195, 2010, doi: 10.1044/1058-0360(2010/09-0022),.

- [30] J. Hughes-Lika and M. Chiesa, "The picture exchange communication system and adults lacking functional communication: A research review," *Eur J Behav Anal*, vol. 22, no. 1, pp. 40–58, Jan. 2020, doi: 10.1080/15021149.2020.1815507.
- [31] R. Simeoli, L. Iovino, D. Marocco, G. Guglielmino, and A. Rega, "A Comparison of Picture Exchange Communication System (PECS) and Speech- Generating Device as Communication Modes for Children with Autism Spectrum Disorders," *Res Dev Disabil*, vol. 130, Jul. 2023, doi: 10.20944/PREPRINTS202307.0347.V1.
- [32] K. Gordon, G. Pasco, F. McElduff, A. Wade, P. Howlin, and T. Charman, "A communication-based intervention for nonverbal children with autism: What changes? who benefits?," *J Consult Clin Psychol*, vol. 79, no. 4, pp. 447–457, Aug. 2011, doi: 10.1037/A0024379,.
- [33] ARASAAC, "ARASAAC - PORTAL ARAGONÉS DE LA COMUNICACIÓN AUMENTATIVA Y ALTERNATIVA." Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: <https://saesaragon.blogspot.com/2021/05/arasaac-portal-aragones-de-la.html>
- [34] M. Bakhtiarvand, E. Zavaraki, S. Daramadi, and F. Jafarkhani, "Research Synthesis of the Components of Instructional Model Technology-Based Picture Exchange Communication System in the Education of Children with Autism Spectrum Disorder," *J Res Sci Teach*, vol. 12, pp. 12–97, Jan. 2022, Accessed: Jun. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/366781211_Research_Synthesis_of_the_Components_of_Instructional_Model_Technology-Based_Picture_Exchange_Communication_System_in_the_Education_of_Children_with_Autism_Spectrum_Disorder
- [35] K. Youssef, S. Said, S. Alkork, and T. Beyrouthy, "A Survey on Recent Advances in Social Robotics," *Robotics 2022, Vol. 11, Page 75*, vol. 11, no. 4, p. 75, Jul. 2022, doi: 10.3390/ROBOTICS11040075.
- [36] R. Vagnetti, A. Di Nuovo, M. Mazza, and M. Valenti, "Social Robots: A Promising Tool to Support People with Autism. A Systematic Review of Recent Research and Critical Analysis from the Clinical Perspective," *Rev J Autism Dev Disord*, pp. 1–25, Feb. 2024, doi: 10.1007/S40489-024-00434-5/FIGURES/2.
- [37] L. J. Wood, A. Zaraki, B. Robins, and K. Dautenhahn, "Developing Kaspar: A Humanoid Robot for Children with Autism," *Int J Soc Robot*, vol. 13, no. 3, pp. 491–508, Jun. 2021, doi: 10.1007/S12369-019-00563-6,.

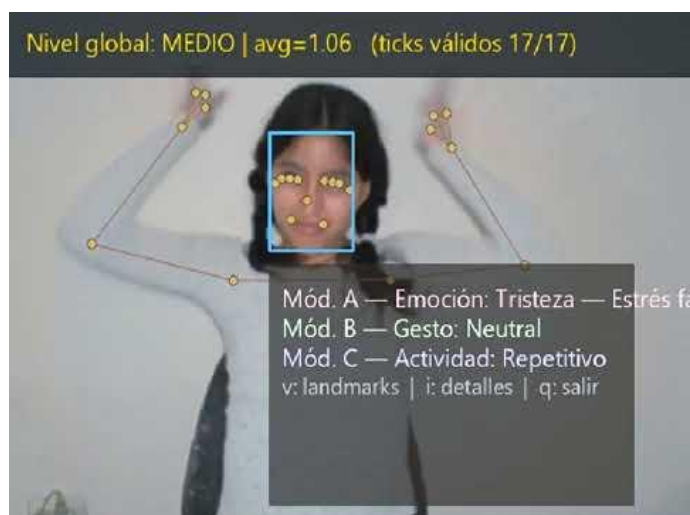
- [38] A. Puglisi *et al.*, “Social Humanoid Robots for Children with Autism Spectrum Disorders: A Review of Modalities, Indications, and Pitfalls,” *Children*, vol. 9, no. 7, p. 953, Jul. 2022, doi: 10.3390/CHILDREN9070953.
- [39] E. P. Madrid Ruiz, H. H. Oscanoa Fernández, C. E. García Cena, and R. Cedazo León, “Design of JARI: A Robot to Enhance Social Interaction in Children with Autism Spectrum Disorder,” *Machines* 2025, Vol. 13, Page 436, vol. 13, no. 5, p. 436, May 2025, doi: 10.3390/MACHINES13050436.
- [40] S. Cano, C. S. González, R. M. Gil-Iranzo, and S. Albiol-Pérez, “Affective Communication for Socially Assistive Robots (SARs) for Children with Autism Spectrum Disorder: A Systematic Review,” *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 15, p. 5166, Aug. 2021, doi: 10.3390/S21155166.
- [41] N. L. A. Rashid, Y. Leow, P. Klainin-Yobas, S. Itoh, and V. X. Wu, “The effectiveness of a therapeutic robot, ‘Paro’, on behavioural and psychological symptoms, medication use, total sleep time and sociability in older adults with dementia: A systematic review and meta-analysis,” *Int J Nurs Stud*, vol. 145, p. 104530, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.IJNURSTU.2023.104530.
- [42] European Comission, “Development of Robot-Enhanced therapy for children with Autism spectrum disorders (DREAM),” CORDIS - EU. Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/id/611391>
- [43] Z. Zeng, M. Pantic, G. I. Roisman, and T. S. Huang, “A survey of affect recognition methods: Audio, visual, and spontaneous expressions,” *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 31, no. 1, pp. 39–58, Jan. 2009, doi: 10.1109/TPAMI.2008.52,.
- [44] M. Leo *et al.*, “Computational Assessment of Facial Expression Production in ASD Children,” *Sensors (MDPI)*, vol. 18, no. 11, p. 3993, Nov. 2018, doi: 10.3390/S18113993.
- [45] K. Porayska-Pomsta *et al.*, “Blending human and artificial intelligence to support autistic children’s social communication skills,” *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 25, no. 6, Dec. 2018, doi: 10.1145/3271484/SUPPL_FILE/PORAYSKA-POMSTA.ZIP.
- [46] O. Rudovic, J. Lee, M. Dai, B. Schuller, and R. W. Picard, “Personalized machine learning for robot perception of affect and engagement in autism therapy,” *Sci Robot*, vol. 3, no. 19, Jun. 2018, doi: 10.1126/SCIROBOTICS.AAO6760.
- [47] S. K. D’Mello and J. Kory, “A Review and Meta-Analysis of Multimodal Affect Detection Systems,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 47, no. 3, pp. 43:1-43:36, Apr. 2015, doi: 10.1145/2682899.

- [48] A. Vinciarelli, M. Pantic, and H. Bourlard, "Social signal processing: Survey of an emerging domain," *Image Vis Comput*, vol. 27, no. 12, pp. 1743–1759, 2009, doi: 10.1016/J.IMAVIS.2008.11.007.
- [49] V. Silva, F. Soares, J. S. Esteves, C. P. Santos, and A. P. Pereira, "Fostering Emotion Recognition in Children with Autism Spectrum Disorder," *Multimodal Technologies and Interaction 2021, Vol. 5, Page 57*, vol. 5, no. 10, p. 57, Sep. 2021, doi: 10.3390/MTI5100057.
- [50] J. R. H. Lee and A. Wong, "AEGIS: A real-time multimodal augmented reality computer vision based system to assist facial expression recognition for individuals with autism spectrum disorder," Oct. 2020, Accessed: Jun. 09, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2010.11884>
- [51] C. Voss *et al.*, "Superpower Glass: Delivering Unobtrusive Real-time Social Cues in Wearable Systems," Feb. 2020, doi: 10.1145/2968219.2968310.
- [52] M. Wolf, *Computer as Components Principles of Embedded Computing System Design s*, 3°. Waltham, Massachusetts: Morgan Kaufmann, 2012.
- [53] M. A. Mohammed, S. Alyahya, A. A. Mukhlif, K. H. Abdulkareem, H. Hamouda, and A. Lakhan, "Smart Autism Spectrum Disorder Learning System Based on Remote Edge Healthcare Clinics and Internet of Medical Things," *Sensors 2024, Vol. 24, Page 7488*, vol. 24, no. 23, p. 7488, Nov. 2024, doi: 10.3390/S24237488.
- [54] P. Pérez-Fuster, G. Herrera, L. Kossyvaki, and A. Ferrer, "Enhancing Joint Attention Skills in Children on the Autism Spectrum through an Augmented Reality Technology-Mediated Intervention," *Children*, vol. 9, no. 2, p. 258, Feb. 2022, doi: 10.3390/CHILDREN9020258.
- [55] P. Lagos *et al.*, "L-PECS: Application for Inclusive Work Environments," *Procedia Comput Sci*, vol. 184, pp. 396–403, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.03.050.
- [56] Y. Matsuzaka and R. Yashiro, "AI-Based Computer Vision Techniques and Expert Systems," *AI 2023, Vol. 4, Pages 289-302*, vol. 4, no. 1, pp. 289–302, Feb. 2023, doi: 10.3390/AI4010013.
- [57] A. N. Khoirunnisa, Munir, F. Shahbodin, L. Dewi, Y. B. Santoso, and L. Susanti, "The Effect of Augmented Reality in Enhancing Basic Communication Skills in Children with Autism Spectrum Disorder," *European Journal of Educational Research*, vol. 14, no. 2, pp. 613–623, Apr. 2025, doi: 10.12973/EU-JER.14.2.615.
- [58] Y. Koumpouros, "Digital Horizons: Enhancing Autism Support with Augmented Reality," *J Autism Dev Disord*, pp. 1–17, Feb. 2025, doi: 10.1007/S10803-024-06709-4/TABLES/1.

- [59] World Health Organization, “Child Growth Standards: Length/height-for-age,” WHO, 2006. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards/length-height-for-age>
- [60] G. A. Johnson and J. J. French, “Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials,” *Advances in Technology Innovation*, vol. 3, no. 4, pp. 179–184, 2018. [Online]. Available: <https://ojs.imeti.org/index.php/AITI/article/view/1010>
- [61] Part Manufacturing, “3D Printing Filament Properties Table,” *PartMFG.com*. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.partmfg.com/3d-printing-filament-properties-table/>
- [62] S. Wickstrom, “PETG vs PLA vs ABS: 3D Printing Strength Comparison,” *Ultimaker.com*, Mar. 21, 2025. Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/learn/petg-vs-pla-vs-abs-3d-printing-strength-comparison/>
- [63] O. Olabisi and K. Adewale, *Handbook of Thermoplastics*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
- [64] S. Ganeshkumar, S. D. Kumar, U. Magarajan, S. Rajkumar, B. Arulmurugan, S. Sharma, C. Li, R. A. Ilyas, and M. F. Badran, “Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3D-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS,” *Materials*, vol. 15, no. 15, p. 5142, Jul. 2022, doi: 10.3390/ma15155142.
- [65] M. J. Moore, G. L. White, and D. L. Moore, “Backpack Weight: How Heavy Is Safe?,” *AAP Grand Rounds*, vol. 18, no. 1, pp. 10–11, Jul. 2007, doi: 10.1542/gr.18-1-10.
- [66] Children’s Hospital Los Angeles, “Is Your Child’s Backpack Too Heavy?,” *CHLA Blog*, Jul. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.chla.org/blog/advice-experts/your-childs-backpack-too-heavy>. [Accessed: Sep. 8, 2025].
- [67] World Health Organization, “Weight-for-age,” in *WHO Child Growth Standards – Standards*, [Online]. Available: <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards/weight-for-age>. [Accessed: 08-Sep-2025].

Apéndices

Prueba piloto del sistema final



Vínculo: <https://youtu.be/VjUIBs9u95g>

Animación - ¿Qué cosas te hacen sonreír? (pausa) ¡A mí me alegra jugar contigo!



Vínculo: <https://youtu.be/2MedGE2Ut-I>

Animación - ¿Qué sonido hace el perro? (pausa) ¡Guau guau!



Vínculo: <https://youtu.be/1S-0VNkECio>

Animación - ¿Y el gato? (pausa) ¡Miau! ¡Eso es!



Vínculo: <https://youtu.be/d3RbdhBsDoU>

Animación - ¿Qué color tiene una manzana? (pausa) ¡Rojo! Muy bien



Vínculo: <https://youtu.be/Kt-EXJ1UPik>

Módulo A - Reconocimiento de emociones faciales



Vínculo: <https://youtu.be/OLDq-slFAsU>

Módulo B - Gestos corporales y posturas



Vínculo: <https://youtu.be/k551l-9zx0E>

Módulo C - Flujo óptico y movimientos repetitivos



Vínculo; https://youtu.be/0p_r-eq5s2w

Sistema Final (Combinación Módulo A, B y C)

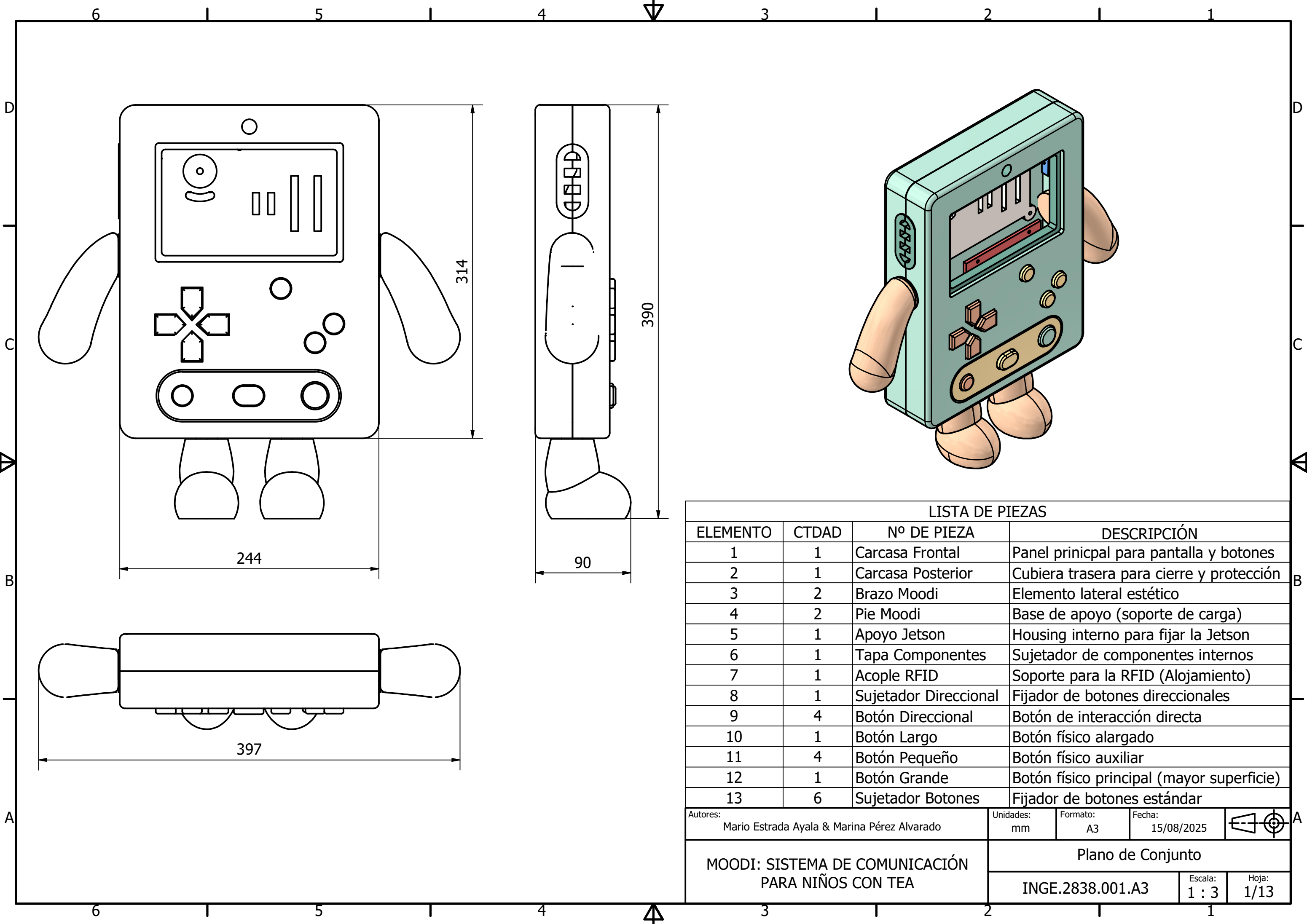


Vínculo: <https://youtu.be/i9XMpza287Y>

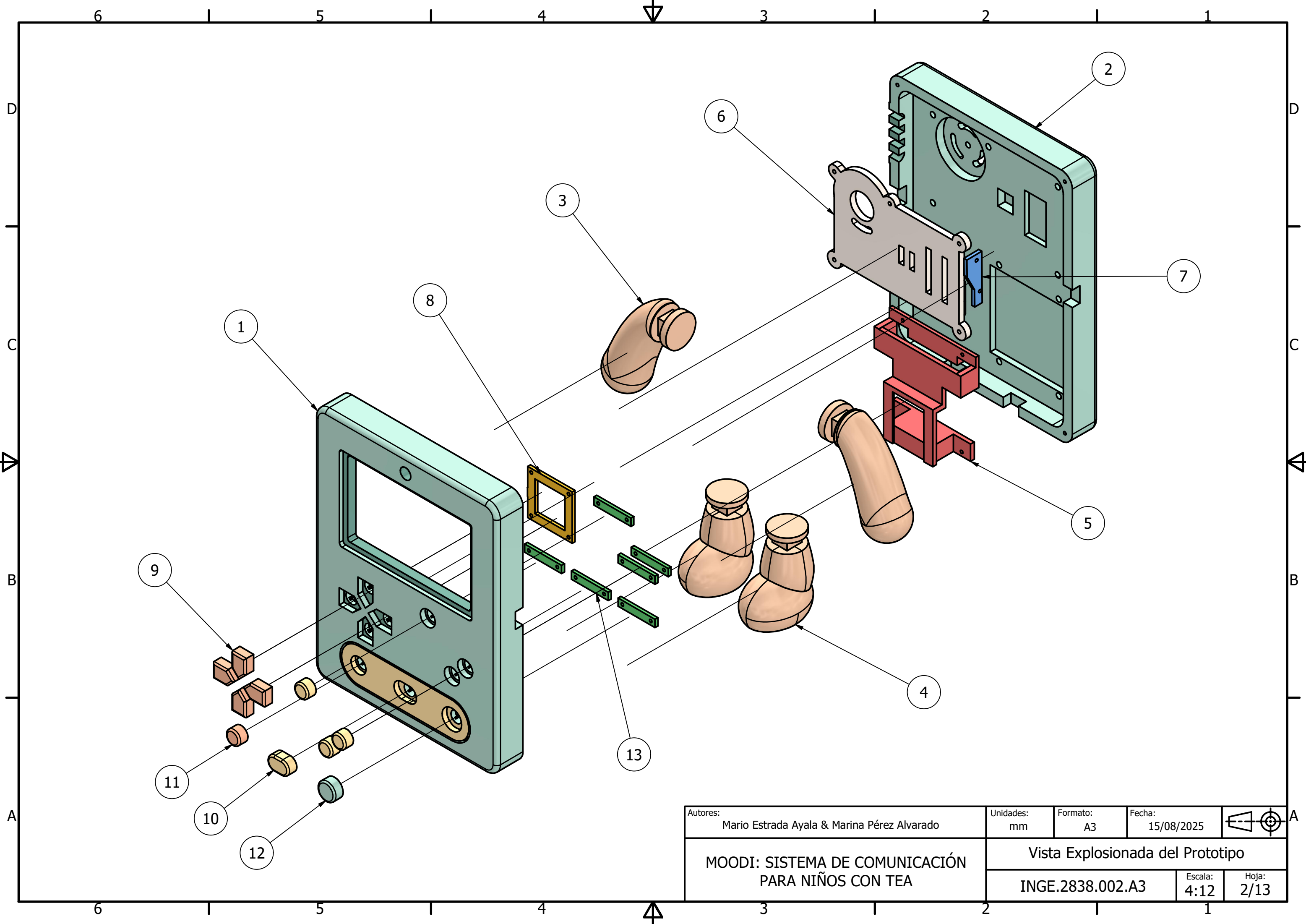
Sistema de comunicación PECS-RFID

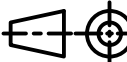


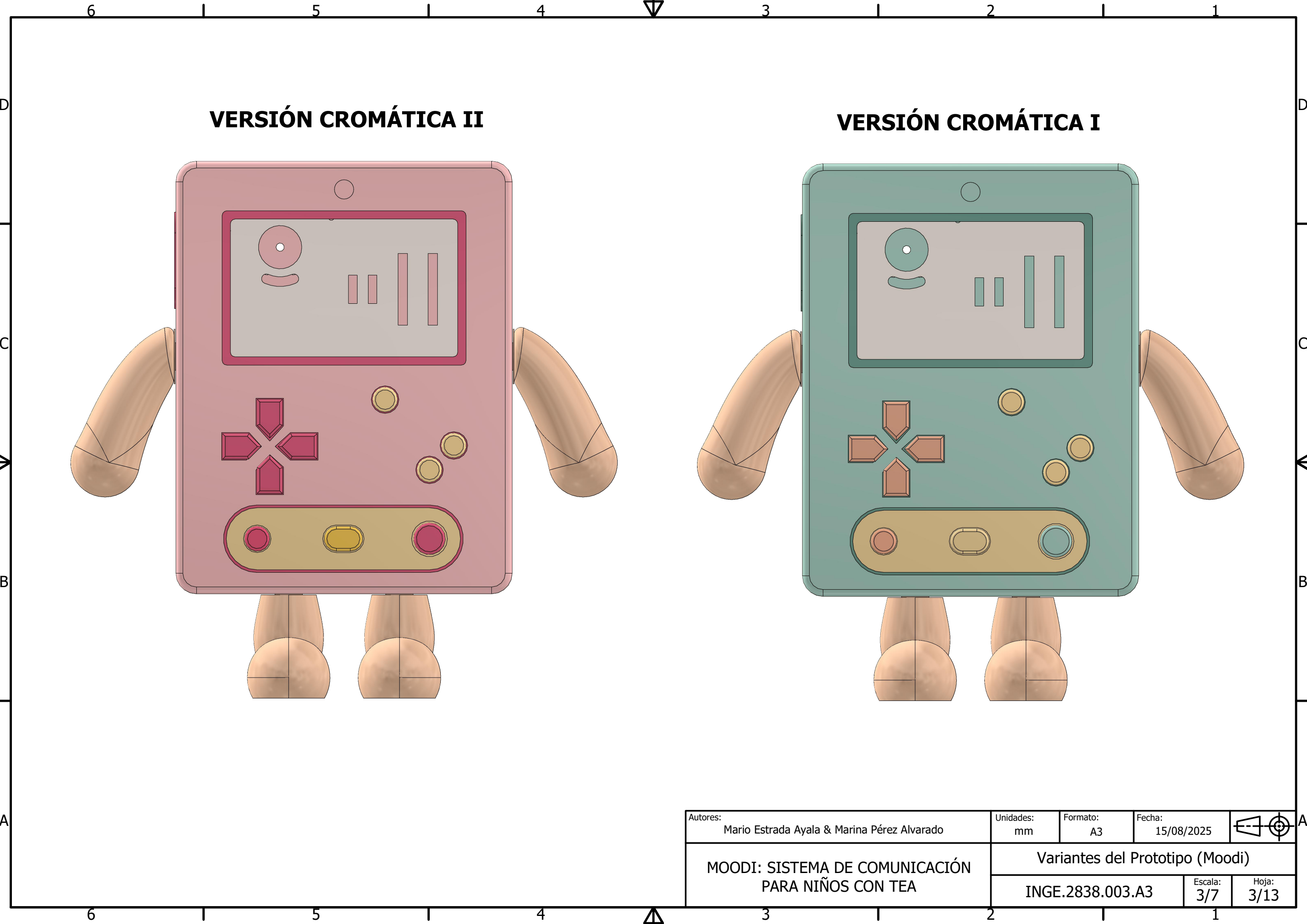
Vínculo: <https://youtu.be/xHSG7AuCZs8>



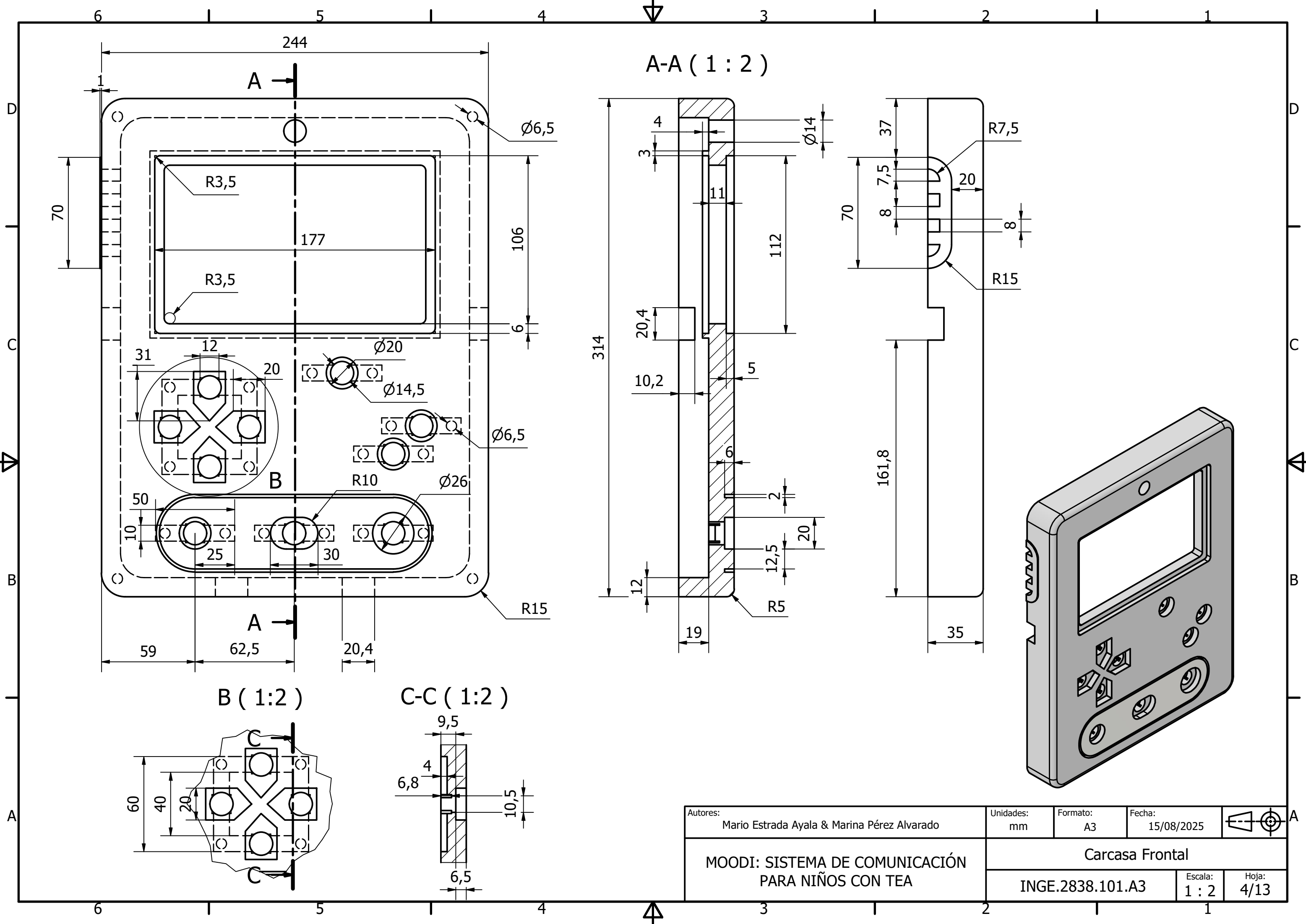
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Carcasa Frontal	Panel prinicipal para pantalla y botones
2	1	Carcasa Posterior	Cubiera trasera para cierre y protección
3	2	Brazo Moodi	Elemento lateral estético
4	2	Pie Moodi	Base de apoyo (soporte de carga)
5	1	Apoyo Jetson	Housing interno para fijar la Jetson
6	1	Tapa Componentes	Sujetador de componentes internos
7	1	Acople RFID	Soporte para la RFID (Alojamiento)
8	1	Sujetador Direccional	Fijador de botones direccionales
9	4	Botón Direccional	Botón de interacción directa
10	1	Botón Largo	Botón físico alargado
11	4	Botón Pequeño	Botón físico auxiliar
12	1	Botón Grande	Botón físico principal (mayor superficie)
13	6	Sujetador Botones	Fijador de botones estándar
Autores:		Unidades:	Formato:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado		mm	A3
		Fecha:	
		15/08/2025	
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA		Plano de Conjunto	
		INGE.2838.001.A3	Escala: 1 : 3 Hoja: 1/13



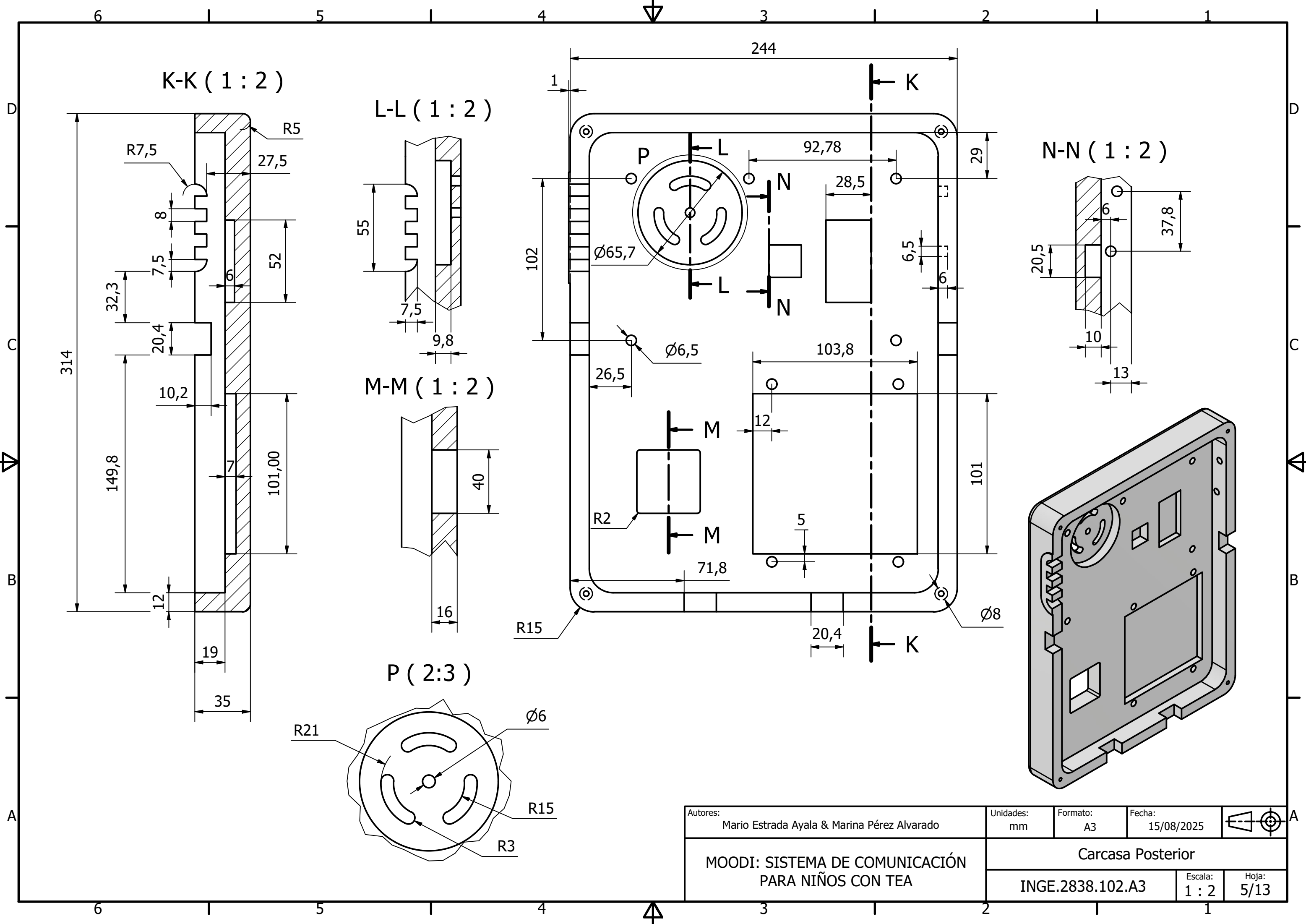
Autores: Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado		Unidades: mm	Formato: A3	Fecha: 15/08/2025	
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA		Vista Explosionada del Prototipo			
		INGE.2838.002.A3		Escala: 4:12	Hoja: 2/13

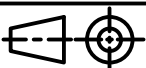


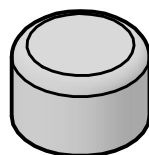
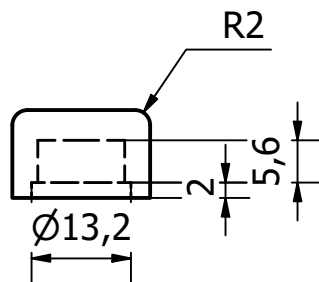
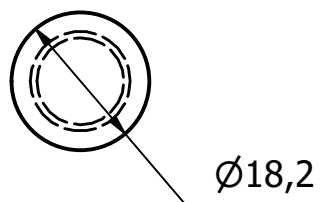
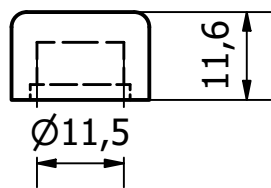
Autores: Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado	Unidades: mm	Formato: A3	Fecha: 15/08/2025	
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA	Variantes del Prototipo (Moodi)			
	INGE.2838.003.A3		Escala: 3/7	Hoja: 3/13



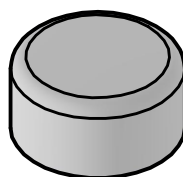
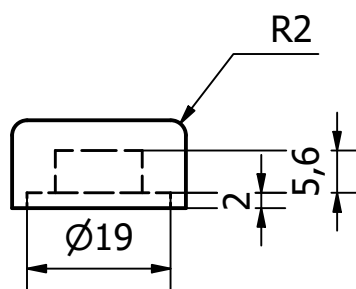
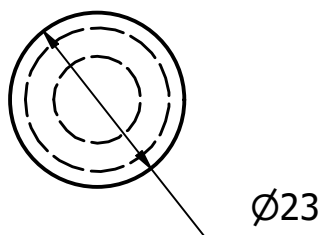
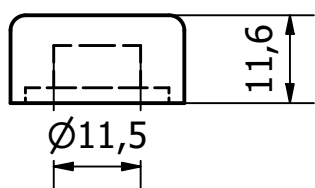
Autores: Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado		Unidades: mm	Formato: A3	Fecha: 15/08/2025		A
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA		Carcasa Frontal				
		INGE.2838.101.A3		Escala: 1 : 2	Hoja: 4/13	



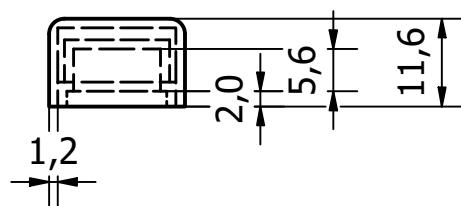
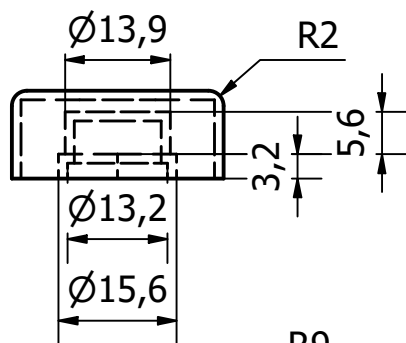
Autores: Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado		Unidades: mm	Formato: A3	Fecha: 15/08/2025	
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA		Carcasa Posterior			
		INGE.2838.102.A3		Escala: 1 : 2	Hoja: 5/13



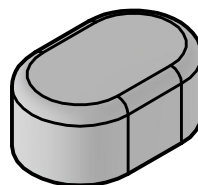
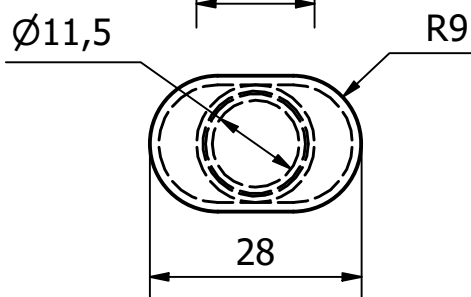
Botón Pequeño



Botón Grande



Botón Largo

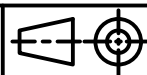


Autores:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado

Unidades:
mm

Formato:
A4

Fecha:
15/08/2025



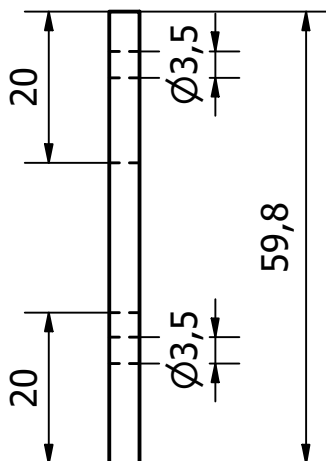
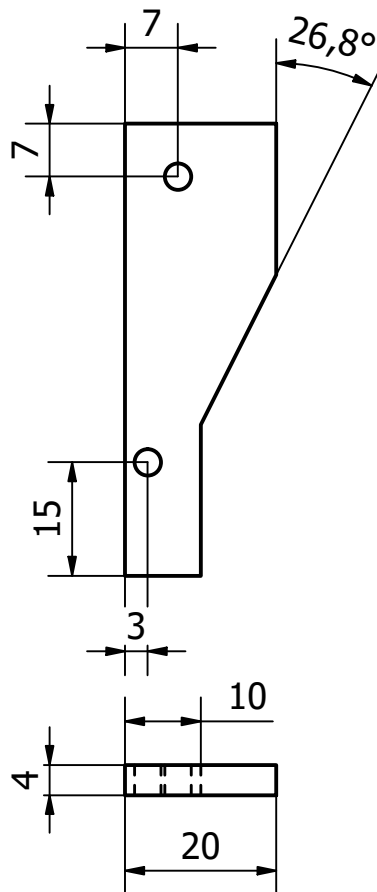
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN
PARA NIÑOS CON TEA

Botones del Prototipo

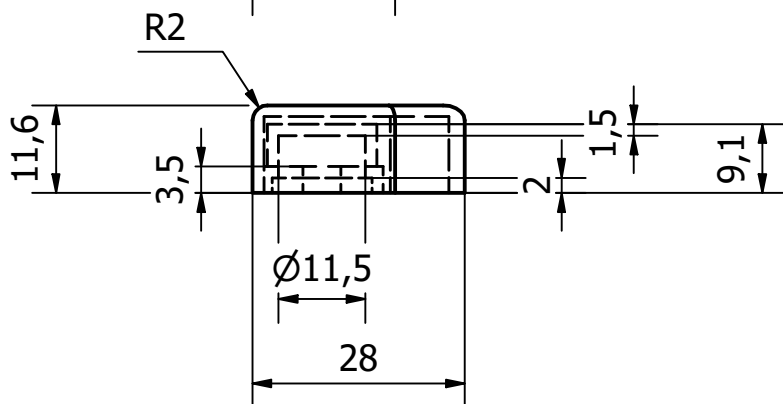
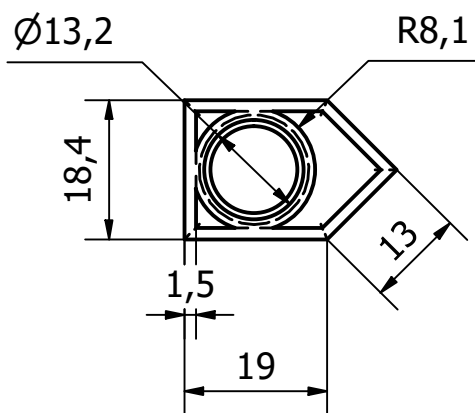
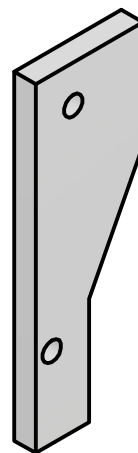
INGE.2838.103.A4

Escala:
1 : 1

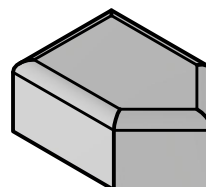
Hoja:
6/13



Acople RFID



Botón Direccional



Autores:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado

Unidades:
mm

Formato:
A4

Fecha:
15/08/2025



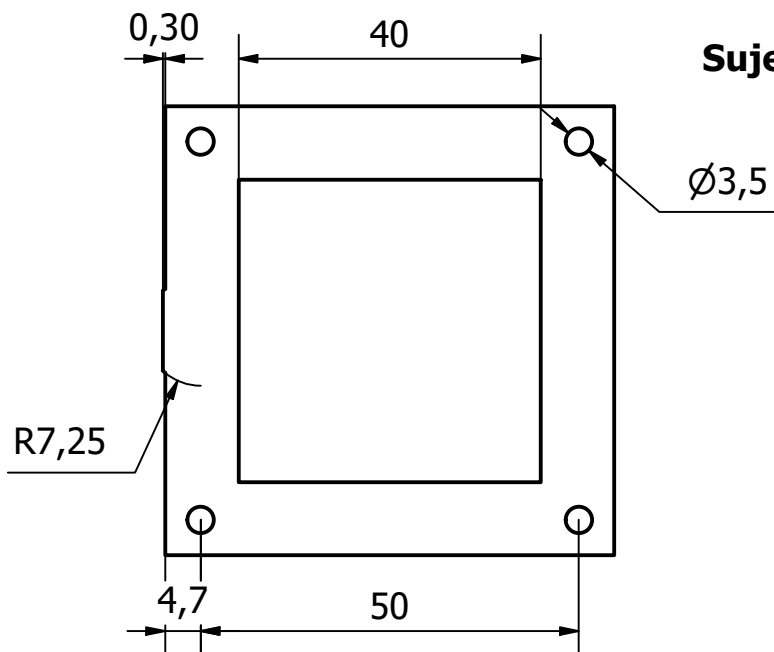
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN
PARA NIÑOS CON TEA

Botón Direccional y Acople RFID

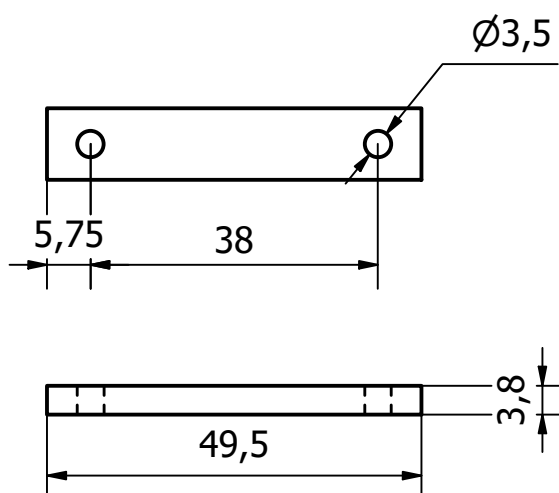
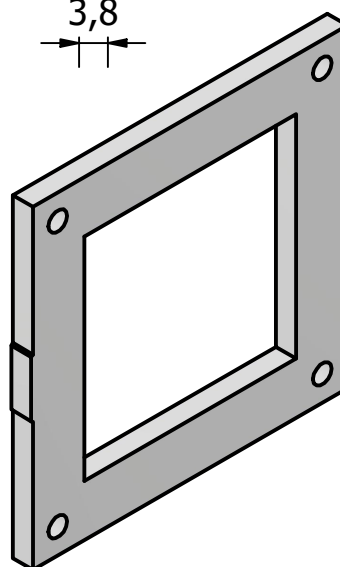
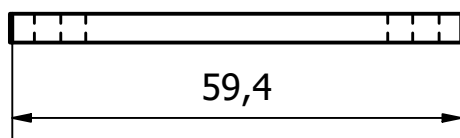
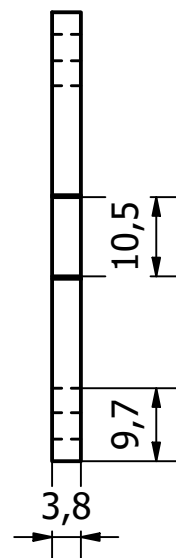
INGE.2838.104.A4

Escala:
1 : 1

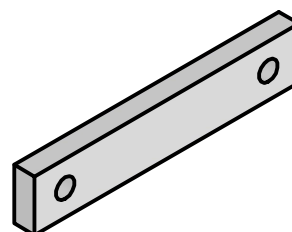
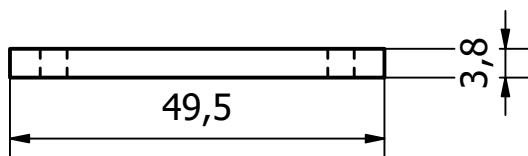
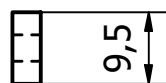
Hoja:
7/13



Sujetador Botones Direccionales



Sujetador Botón (General)

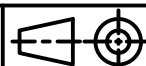


Autores:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado

Unidades:
mm

Formato:
A4

Fecha:
15/08/2025



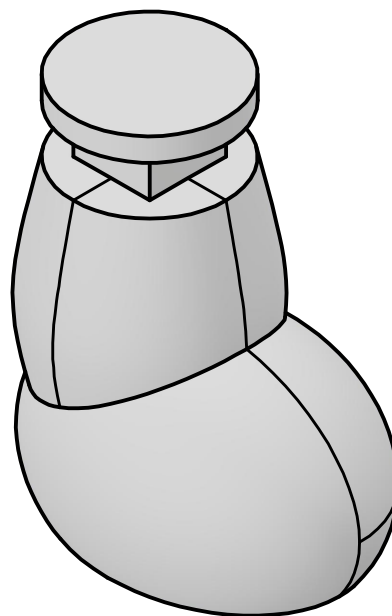
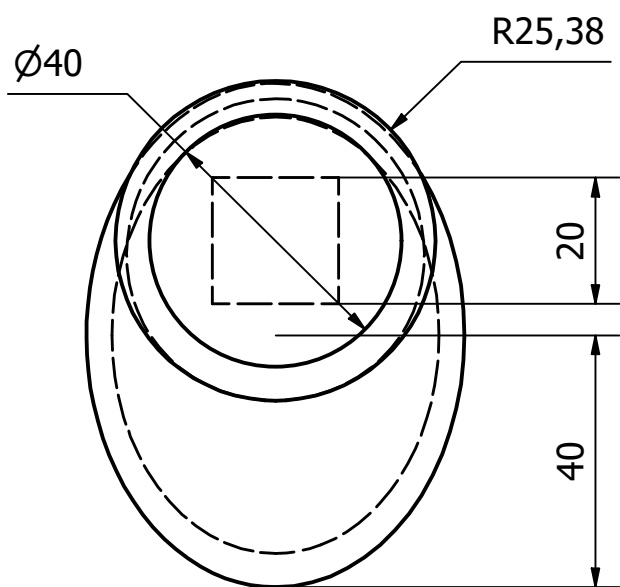
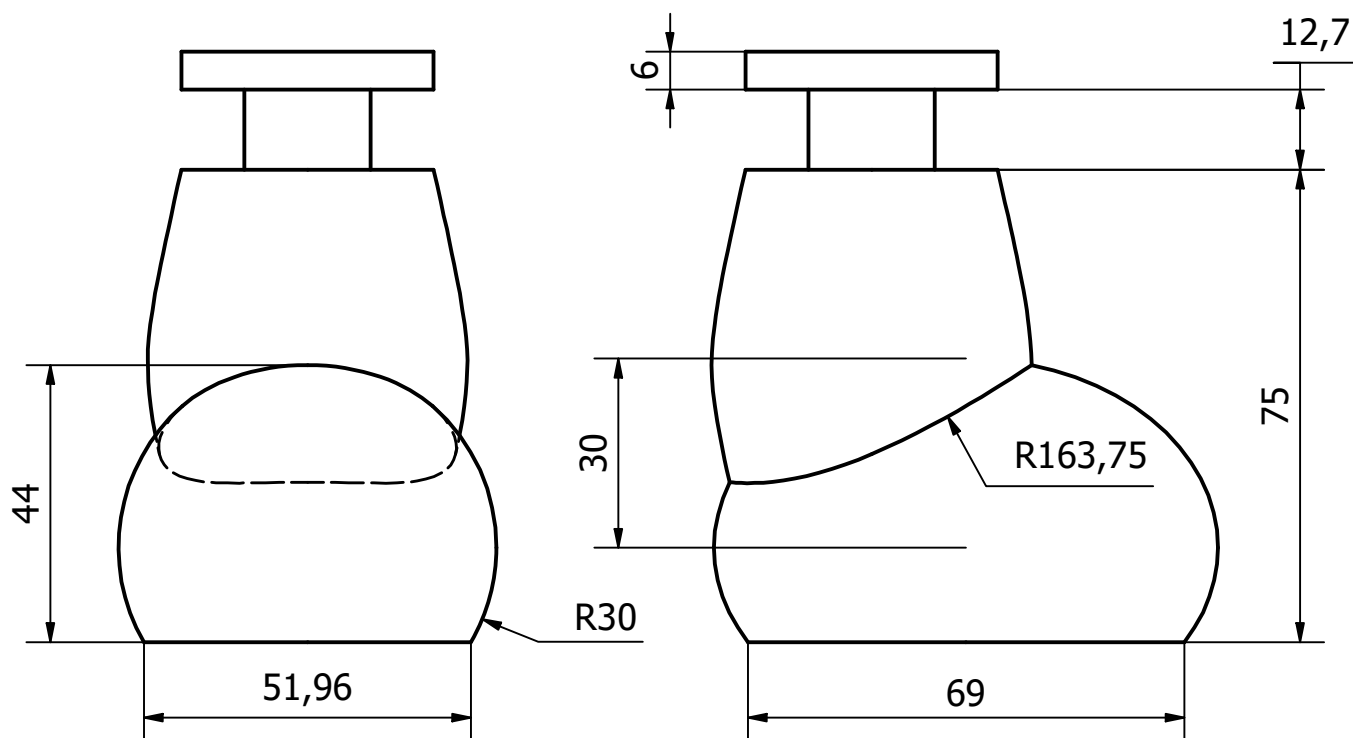
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN
PARA NIÑOS CON TEA

Sujetadores de los Botones

INGE.2838.105.A4

Escala:
1 : 1

Hoja:
8/13

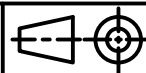


Autores:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado

Unidades:
mm

Formato:
A4

Fecha:
15/08/2025



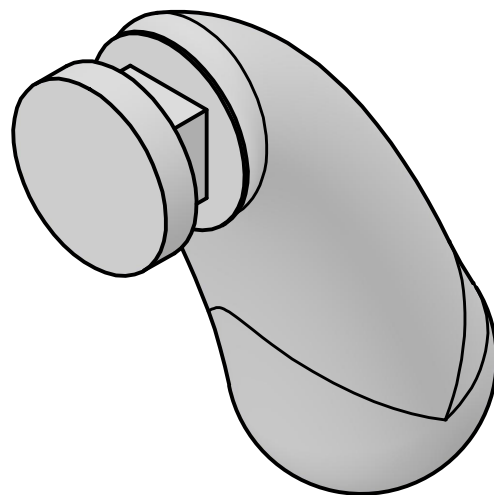
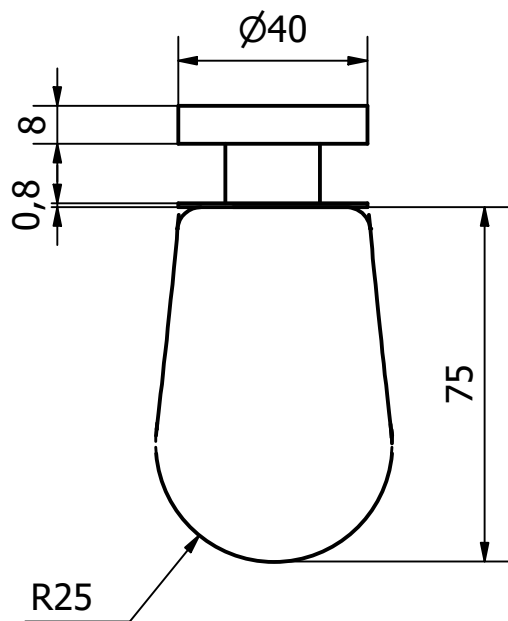
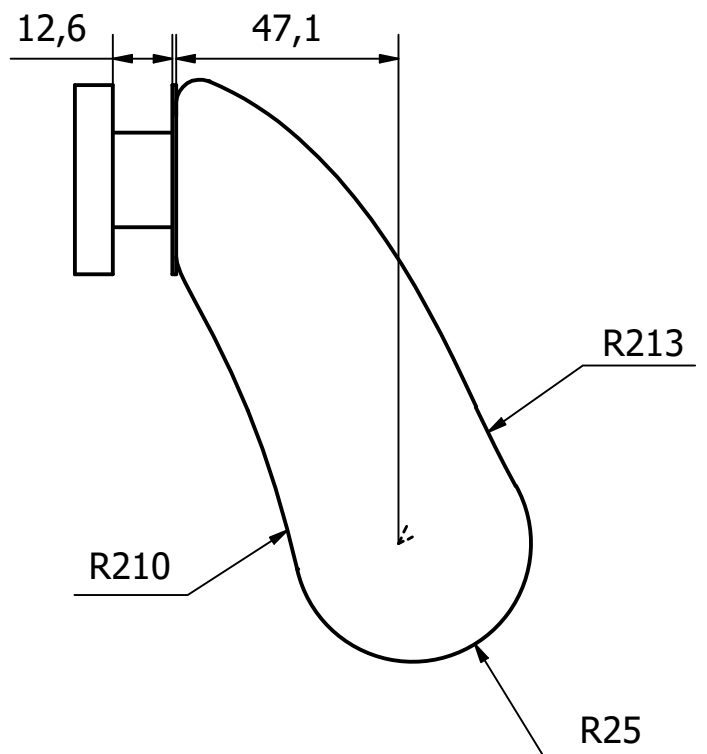
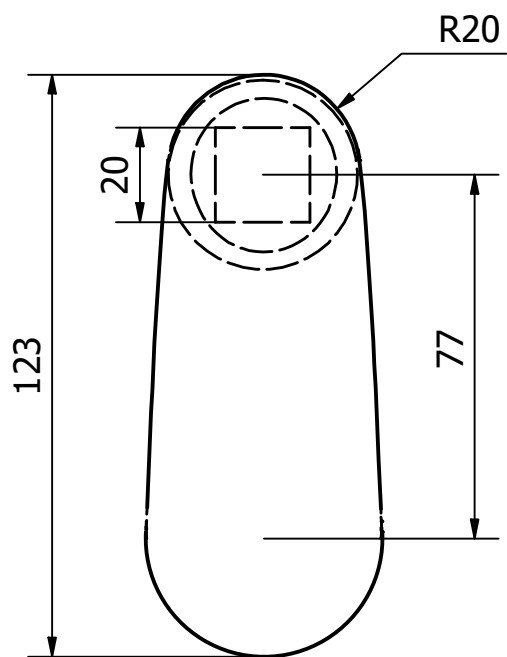
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN
PARA NIÑOS CON TEA

Pie del Prototipo

INGE.2838.106.A4

Escala:
5:6

Hoja:
9/13



Autores:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado

Unidades:
mm

Formato:
A4

Fecha:
15/08/2025



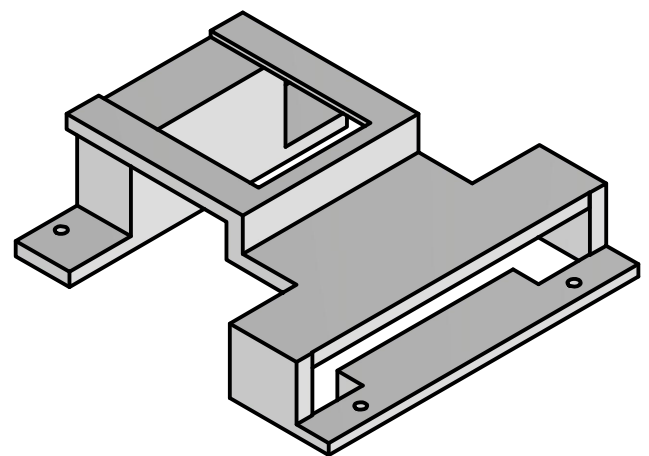
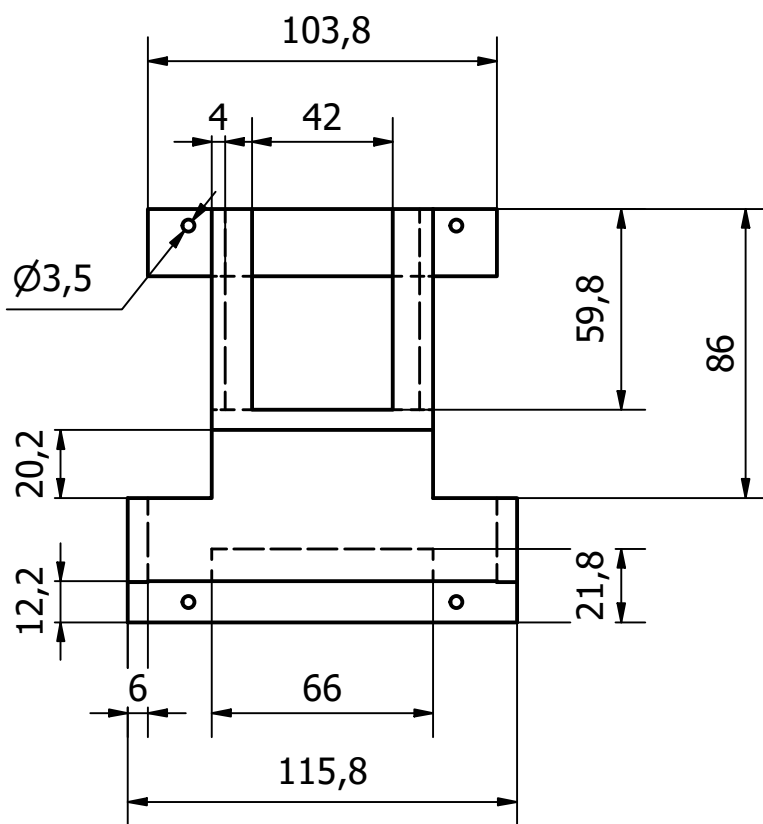
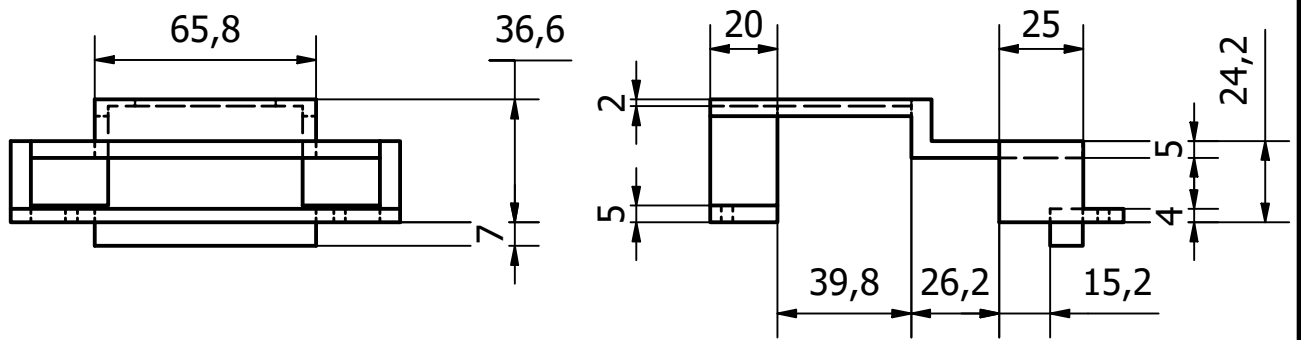
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN
PARA NIÑOS CON TEA

Brazo del Prototipo

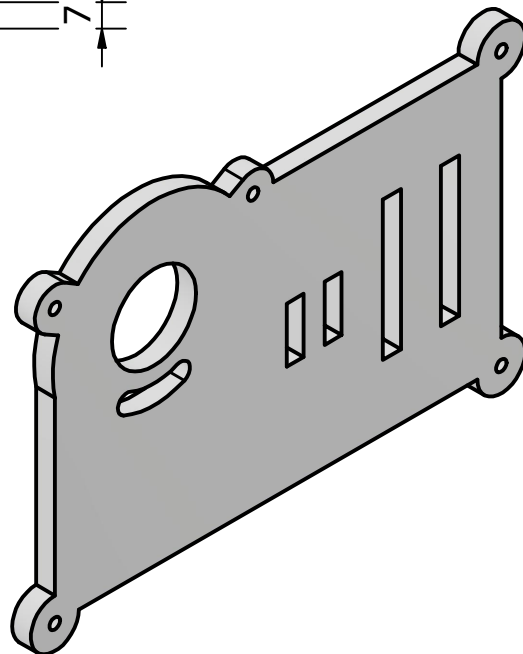
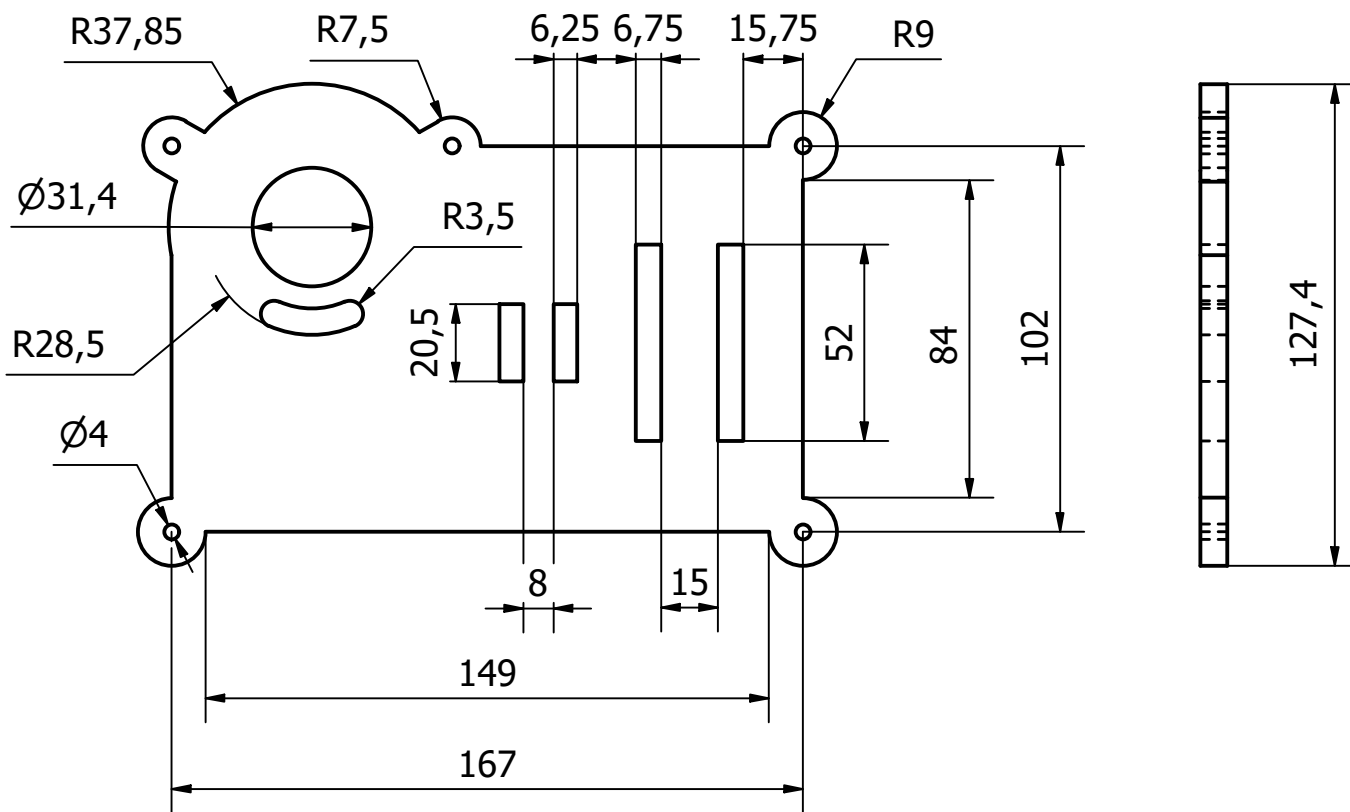
INGE.2838.107.A4

Escala:
5:7

Hoja:
10/13



Autores: Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado	Unidades: mm	Formato: A4	Fecha: 15/08/2025	
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA	Apoyo Jetson Orin Nano			
	INGE.2838.108.A4	Escala: 1:2	Hoja: 11/13	

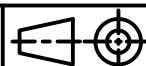


Autores:
Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado

Unidades:
mm

Formato:
A4

Fecha:
15/08/2025



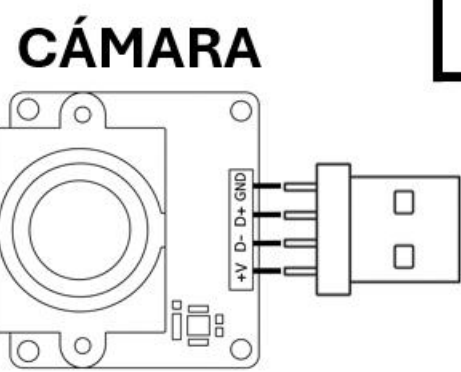
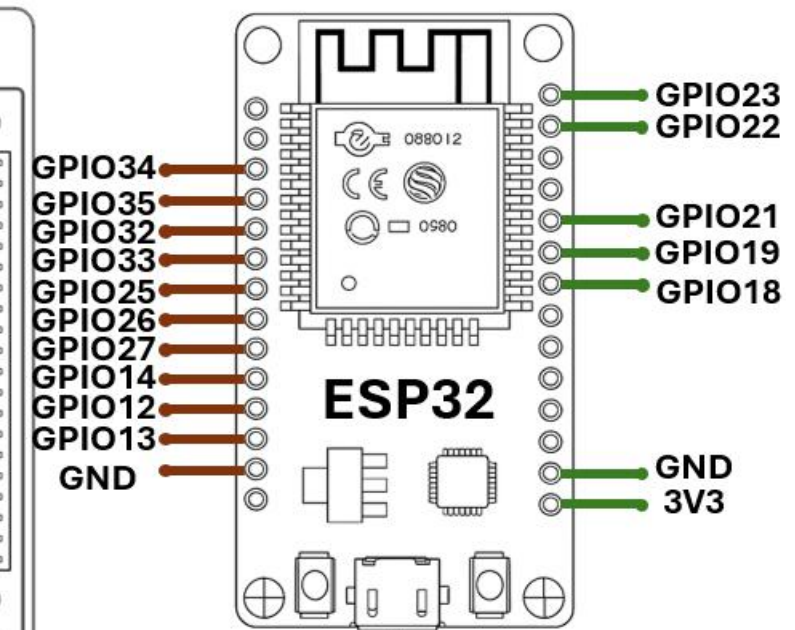
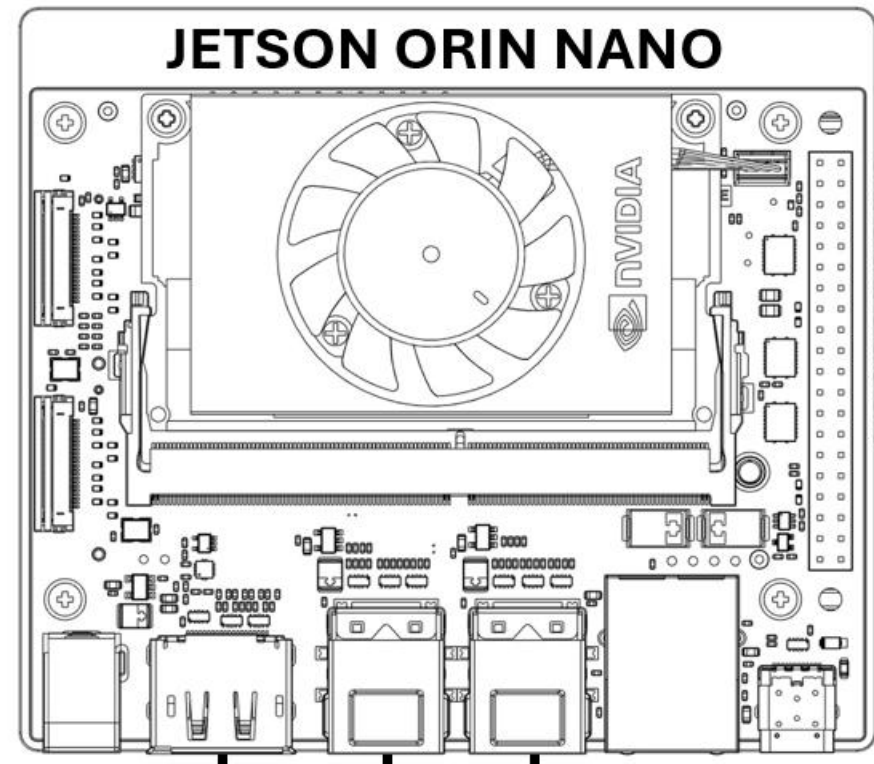
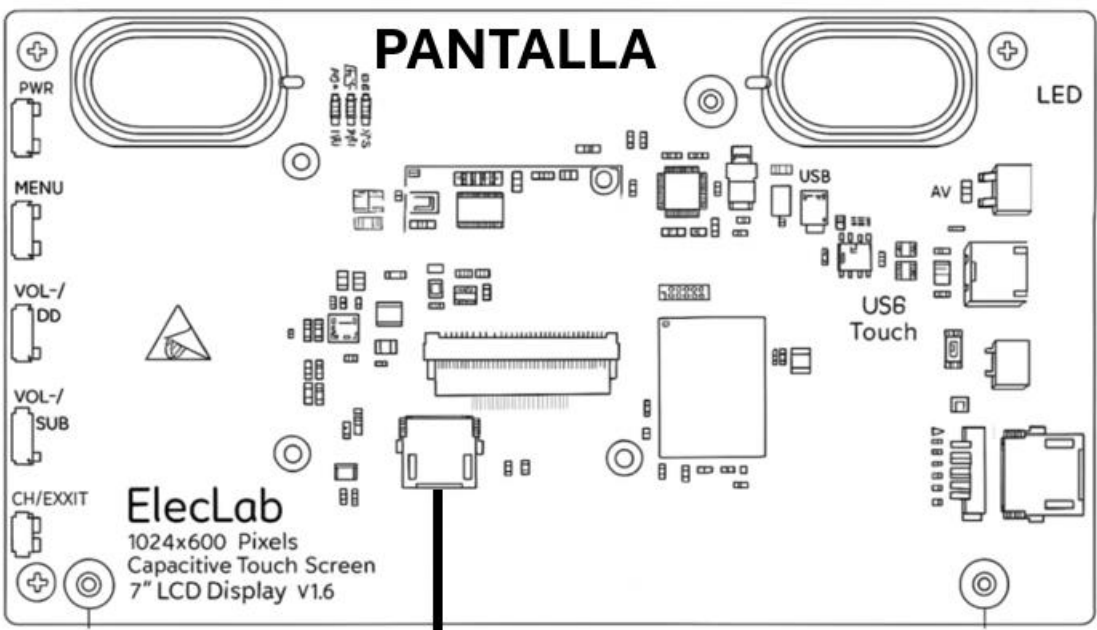
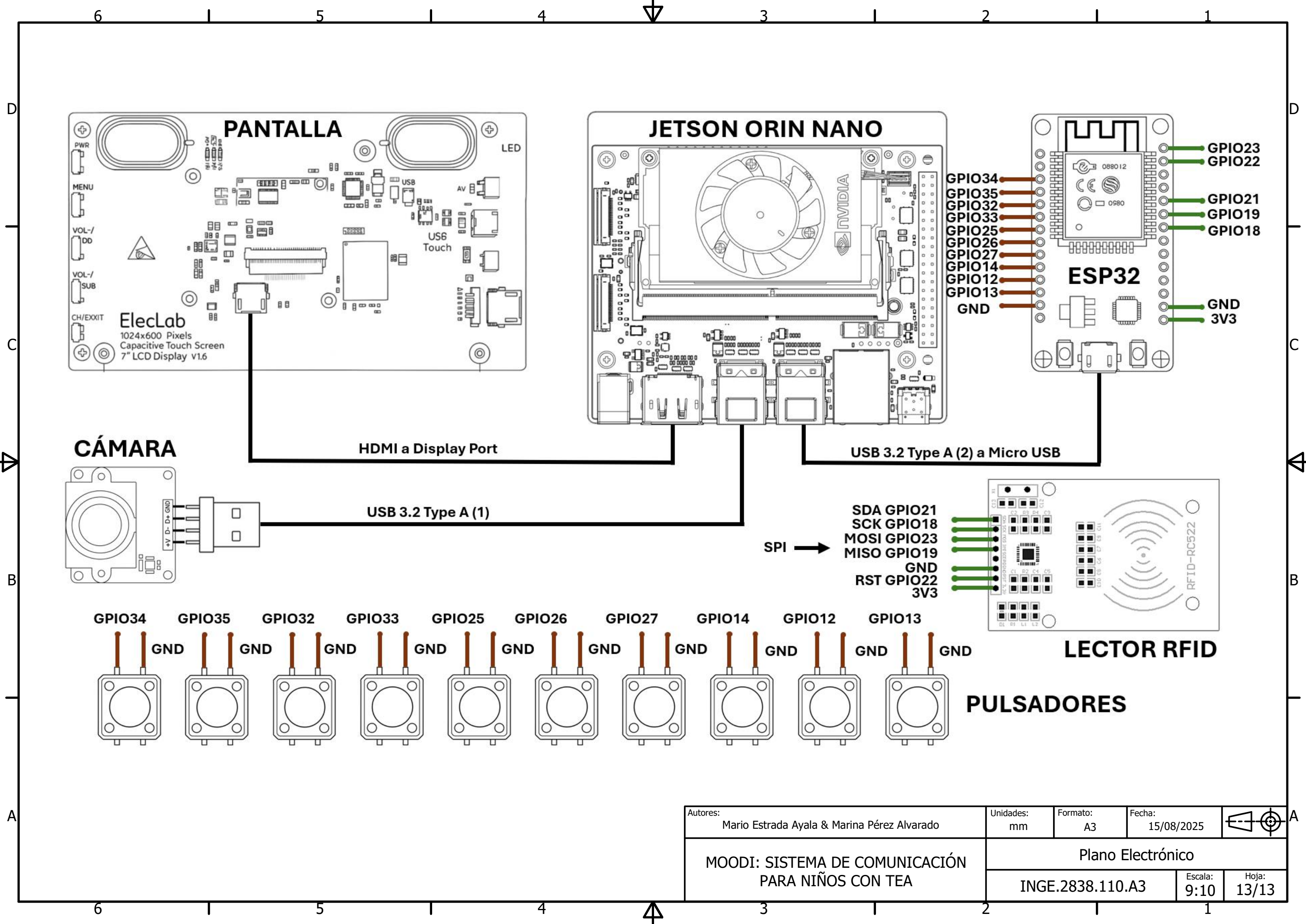
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN
PARA NIÑOS CON TEA

Tapa de los Componentes (Interna)

INGE.2838.109.A4

Escala:
1 : 2

Hoja:
12/13

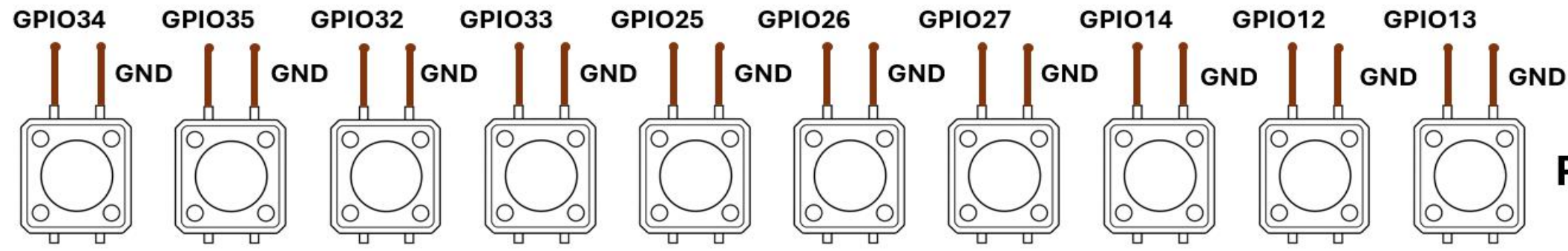
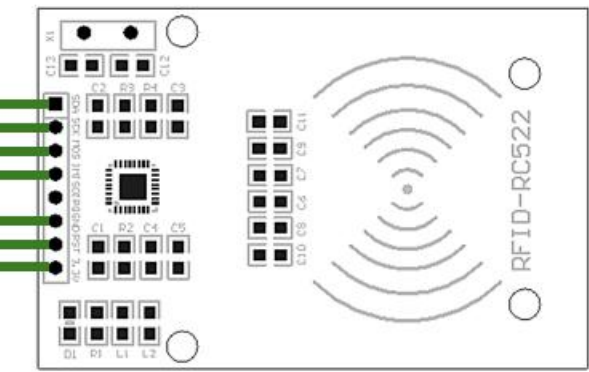


HDMI a Display Port

USB 3.2 Type A (2) a Micro USB

USB 3.2 Type A (1)

SPI →
SDA GPIO21
SCK GPIO18
MOSI GPIO23
MISO GPIO19
GND
RST GPIO22
3V3



LECTOR RFID

PULSADORES

Autores: Mario Estrada Ayala & Marina Pérez Alvarado		Unidades: mm	Formato: A3	Fecha: 15/08/2025		A
MOODI: SISTEMA DE COMUNICACIÓN PARA NIÑOS CON TEA		Plano Electrónico				
		INGE.2838.110.A3		Escala: 9:10	Hoja: 13/13	