



Diseño y construcción de una cabeza animatrónica con percepción sensorial capaz de realizar gestos y expresiones para facilitar la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA)

Rendón Chicaiza, Diego Armando

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. Mendoza Chipantasi, Darío José

Latacunga, 06 de agosto del 2021



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ANIMATRÓNICA CON PERCEPCIÓN SENSORIAL CAPAZ DE REALIZAR GESTOS Y EXPRESIONES PARA FACILITAR LA COMUNICACIÓN DE NIÑOS Y NIÑAS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA)”**, fue realizado por el señor **Rendón Chicaiza, Diego Armando** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 06 de agosto del 2021



Firmado electrónicamente por:

**DARIO JOSE
MENDOZA
CHIPANTASI**

.....
Ing. Mendoza Chipantasi, Darío José

C.C.: 0603110834



Document Information

Analyzed document	Tesis Diego Rendon.pdf (D111048001)
Submitted	8/6/2021 10:45:00 PM
Submitted by	
Submitter email	darendon@espe.edu.ec
Similarity	6%
Analysis address	djmendoza_espe@analysis.orkund.com



Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / 4. TESIS -CHAMORRO - VILLALBA.pdf Document 4. TESIS -CHAMORRO - VILLALBA.pdf (D77342878) Submitted by: dcloza@espe.edu.ec Receiver: dcloza.espe@analysis.orkund.com		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / PROYECTO DE TITULACIÓN.pdf Document PROYECTO DE TITULACIÓN.pdf (D21857366) Submitted by: dcloza@espe.edu.ec Receiver: dcloza.espe@analysis.orkund.com		3
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS_MECATRONICA_NARANJO_TELLO.pdf Document TESIS_MECATRONICA_NARANJO_TELLO.pdf (D30557100) Submitted by: jossbellfabiantello@hotmail.com Receiver: amgordon.espe@analysis.orkund.com		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS.pdf Document TESIS.pdf (D58740839) Submitted by: nfcadena3@espe.edu.ec		11



Firmado electrónicamente por:
DARIO JOSE
MENDOZA
CHIPANTASI

.....
Ing. Mendoza Chipantasi, Darío José

C.C.: 0603110834



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Rendón Chicaiza, Diego Armando**, con cédula de ciudadanía N° 1803791001, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ANIMATRÓNICA CON PERCEPCIÓN SENSORIAL CAPAZ DE REALIZAR GESTOS Y EXPRESIONES PARA FACILITAR LA COMUNICACIÓN DE NIÑOS Y NIÑAS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA)”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 06 de agosto del 2021

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Diego Armando Rendón Chicaiza'.

.....
Diego Armando Rendón Chicaiza

C.C.: 1803791001



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Rendón Chicaiza, Diego Armando**, con cédula de ciudadanía N° 1803791001, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ANIMATRÓNICA CON PERCEPCIÓN SENSORIAL CAPAZ DE REALIZAR GESTOS Y EXPRESIONES PARA FACILITAR LA COMUNICACIÓN DE NIÑOS Y NIÑAS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA)”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad

Latacunga, 06 de agosto del 2021

.....
Diego Armando Rendón Chicaiza

C.C.: 1803791001

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación lo dedico con mucho cariño a mis padres Xavier y Lleny, pilares fundamentales en mi vida, que con su esfuerzo me supieron demostrar el mejor camino a seguir y sus enseñanzas han sido y serán por siempre el tesoro más valioso que me han podido dar.

A mi hermana Jessica y a mi sobrino Juanito, por estar vigilantes de mis pasos y por siempre darme ánimos para poder cumplir mis metas.

Este logro y orgullo es para ustedes y para los que se nos adelantaron en este camino de la vida, gracias por estar pendientes y siempre presentes, pero más que nada, gracias por el cariño incondicional que me han entregado.

AGRADECIMIENTO

Primordialmente quiero agradecer a mis padres por darme su incondicional apoyo y por su dedicación para educarme correctamente, gracias por siempre creer en mí.

A mi hermana Jessica, por educarme como una segunda madre y escucharme como mi mejor amiga, por las infinitas palabras de aliento y por demostrarme que con trabajo duro todo es posible.

A mi sobrino Juanito, que con su corta edad se ha convertido en una persona muy especial en mi vida, su presencia ha tenido un importante significado en este momento.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas por brindarme educación de calidad y aportar en mi formación académica; especialmente al Ing. Darío Mendoza, Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica y tutor de mi trabajo de titulación, por compartir sus conocimientos durante mi carrera universitaria y por su oportuna tutela en el desarrollo de mi proyecto.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte Urkund	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos	8
Índice de tablas.....	14
Índice de figuras.....	18
Resumen	23
Abstract.....	24
Introducción	25
Antecedentes	25
Planteamiento del Problema	27
Descripción Resumida del Proyecto	28
Justificación e Importancia	29
Objetivos	30
<i>Objetivo General</i>	<i>31</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>31</i>
Hipótesis	31

<i>Variable Independiente</i>	31
<i>Variable Dependiente</i>	31
Estructura del Documento.....	32
Fundamentos teóricos e investigación	33
Trastorno del Espectro Autista (TEA)	33
<i>Sintomatología</i>	34
<i>Diagnóstico</i>	34
<i>Niveles de Gravedad</i>	36
<i>Tipo de Tratamientos</i>	37
Robótica	38
<i>Robot</i>	38
<i>Robots Sociales</i>	39
<i>Robots Humanoides</i>	40
<i>Percepción Sensorial en Robots</i>	41
Animatrónica	41
Valle Inquietante	44
<i>Relación con los Trastornos del Espectro Autista</i>	45
Expresión Faciales de la Emoción.....	45
<i>Sistema de Codificación de Acción Facial (FACS)</i>	46
Visión Artificial	48
<i>Procesamiento Digital de Imágenes</i>	49
<i>Detección Facial</i>	51
<i>Reconocimiento Facial</i>	52

	10
Metodología de Diseño	54
<i>Función de la Calidad</i>	<i>55</i>
<i>Arquitectura del Sistema</i>	<i>55</i>
<i>Método Ensayo y Error</i>	<i>55</i>
Hardware del Proyecto	56
<i>Servomotor</i>	<i>56</i>
<i>Arduino UNO</i>	<i>57</i>
<i>Módulo PCA9685</i>	<i>58</i>
<i>Arducam IMX291</i>	<i>58</i>
<i>Resistencia Sensible a la Fuerza</i>	<i>59</i>
<i>Módulo DFPlayer Mini.....</i>	<i>60</i>
<i>Técnicas de Fabricación</i>	<i>60</i>
<i>Material de Impresión 3D.....</i>	<i>61</i>
<i>Caucho de Silicona</i>	<i>62</i>
<i>Moldeado Artístico.....</i>	<i>62</i>
Software del Proyecto.....	64
<i>Blender</i>	<i>64</i>
<i>Autodesk Fusion 360</i>	<i>65</i>
<i>Cura</i>	<i>65</i>
<i>KiCad</i>	<i>65</i>
<i>Python</i>	<i>66</i>
<i>OpenCV</i>	<i>66</i>
<i>Arduino</i>	<i>66</i>

	11
Diseño y selección de componentes	67
Metodología	67
Requerimientos del Sistema	67
<i>Identificación de Necesidades.....</i>	<i>67</i>
<i>Métricas</i>	<i>68</i>
<i>Matriz Necesidades-Métricas</i>	<i>69</i>
Planteamiento de Especificaciones	71
Arquitectura del Sistema.....	72
Generación y Selección de Conceptos	72
Módulo 1: Estructura	73
<i>Estética</i>	<i>73</i>
<i>Fabricación</i>	<i>74</i>
<i>Material del Rostro</i>	<i>75</i>
Módulo 2: Movimiento	77
<i>Mecanismo Ojos</i>	<i>77</i>
<i>Mecanismo Boca.....</i>	<i>80</i>
<i>Mecanismo Cuello.....</i>	<i>81</i>
Módulo 3: Eléctrica y Electrónica	83
<i>Actuadores</i>	<i>83</i>
<i>Tarjeta de Control</i>	<i>84</i>
<i>Suministro de Energía</i>	<i>86</i>
Módulo 4: Visión Artificial	88
<i>Software de Programación</i>	<i>88</i>

	12
<i>Cámara</i>	89
<i>Detección Facial</i>	91
<i>Reconocimiento Facial</i>	91
Módulo 5: Interacción	92
<i>Aplicación</i>	92
<i>Comunicación por Voz</i>	94
Concepto Final	95
Diseño Mecánico	96
<i>Diseño del Mecanismo de Ojos</i>	99
<i>Diseño del Mecanismo de la Boca</i>	102
<i>Diseño del Mecanismo del Cuello</i>	104
<i>Dimensionamiento de Actuadores</i>	105
Análisis Mecánico del Diseño	109
<i>Análisis de la Estructura Base de la Boca</i>	109
<i>Análisis del Elemento Elevador del Cuello</i>	111
Diseño Electrónico	115
Diseño del Sistema de Control	119
Diseño Simulado	136
Construcción.....	138
Construcción Mecánica	138
Construcción Electrónica	145
Construcción Estética	148
<i>Elaboración de la Piel</i>	152

Programación	159
<i>Programación de GUIs</i>	160
Pruebas y análisis de resultados	161
Pruebas de Funcionamiento	161
Valoración de Usuarios	164
Método de Evaluación	164
<i>Procedimiento de Pruebas</i>	167
Resultados.....	168
<i>Interpretación de Resultados</i>	171
<i>Tabulación de Encuestas</i>	173
Validación de Hipótesis	182
Conclusiones y recomendaciones	188
Conclusiones.....	188
Recomendaciones.....	190
Bibliografía	191
Anexos	201

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Síntomas Frecuentes de los Trastornos del Espectro Autista</i>	34
Tabla 2 <i>Niveles de Gravedad de los Trastornos del Espectro Autista</i>	36
Tabla 3 <i>Expresiones Universales por Combinación de Unidades de Acción</i>	48
Tabla 4 <i>Especificaciones Técnicas del Arduino UNO</i>	57
Tabla 5 <i>Propiedades Físicas y Mecánicas del ABS y PLA</i>	62
Tabla 6 <i>Necesidades del Usuario</i>	68
Tabla 7 <i>Características Técnicas del Sistema</i>	68
Tabla 8 <i>Simbología de Correlación entre Necesidades del Usuario y Métricas</i>	70
Tabla 9 <i>Simbología de Correlación entre Métricas</i>	70
Tabla 10 <i>Resultados Obtenidos de la Casa de la Calidad</i>	70
Tabla 11 <i>Especificaciones Generales del Sistema</i>	71
Tabla 12 <i>Arquitectura Modular del Proyecto</i>	72
Tabla 13 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Fabricación</i>	74
Tabla 14 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Fabricación</i>	74
Tabla 15 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Fabricación</i>	75
Tabla 16 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Material del Rostro</i>	76
Tabla 17 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Material del Rostro</i>	76
Tabla 18 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Material del Rostro</i>	77
Tabla 19 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Mecanismo Ojos</i>	78
Tabla 20 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Mecanismo Ojos</i>	79
Tabla 21 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Mecanismo Ojos</i>	79
Tabla 22 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Mecanismo Boca</i>	80

Tabla 23 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Mecanismo Boca</i>	80
Tabla 24 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Mecanismo Boca</i>	81
Tabla 25 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Mecanismo Cuello</i>	81
Tabla 26 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Mecanismo Cuello</i>	82
Tabla 27 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Mecanismo Cuello</i>	82
Tabla 28 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Actuadores</i>	83
Tabla 29 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Actuadores</i>	83
Tabla 30 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Actuadores</i>	84
Tabla 31 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Tarjeta de Control</i>	85
Tabla 32 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Tarjeta de Control</i>	85
Tabla 33 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Tarjeta de Control</i>	86
Tabla 34 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Suministro de Energía</i>	86
Tabla 35 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Suministro de Energía</i>	87
Tabla 36 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Suministro de Energía</i>	87
Tabla 37 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Software de Programación</i>	88
Tabla 38 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Software de Programación</i>	88
Tabla 39 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Software de Programación</i>	89
Tabla 40 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Cámara</i>	90
Tabla 41 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Cámara</i>	90
Tabla 42 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Cámara</i>	91
Tabla 43 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Aplicación</i>	92
Tabla 44 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Aplicación</i>	93
Tabla 45 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Aplicación</i>	93

	16
Tabla 46 <i>Ponderación de Criterios del Submódulo Comunicación por Voz</i>	94
Tabla 47 <i>Ponderación de Soluciones del Submódulo Comunicación por Voz</i>	94
Tabla 48 <i>Conclusión de la Selección del Submódulo Comunicación por Voz</i>	95
Tabla 49 <i>Resumen Selección de Conceptos</i>	95
Tabla 50 <i>Especificaciones Técnicas del Micro Servo MG90S</i>	106
Tabla 51 <i>Especificaciones Técnicas del Servomotor MG995</i>	108
Tabla 52 <i>Parámetros para Exportar Modelos</i>	138
Tabla 53 <i>Desglose de Elementos Mecánicos por Imprimir</i>	139
Tabla 54 <i>Elementos de la Parte Electrónica por Imprimir</i>	146
Tabla 55 <i>Nomenclatura de Servomotores</i>	148
Tabla 56 <i>Desglose de Elementos de la Parte Estética por Imprimir</i>	150
Tabla 57 <i>Paquetes Instalados en el Entorno Virtual</i>	160
Tabla 58 <i>Capacidades Mecánicas del Robot</i>	161
Tabla 59 <i>Combinación de Unidades de Acción del Robot</i>	163
Tabla 60 <i>Datos de los Usuarios (Niños)</i>	165
Tabla 61 <i>Resultados de las Actividades de la Interfaz de Control (Niños)</i>	168
Tabla 62 <i>Resultados de las Encuestas para las Preguntas de Criterio Cerrado</i>	170
Tabla 63 <i>Resultados de las Encuestas para las Preguntas Cualitativas</i>	170
Tabla 64 <i>Frecuencias Observadas de las Pruebas de Funcionamiento</i>	183
Tabla 65 <i>Frecuencias Esperadas de las Pruebas de Funcionamiento</i>	184
Tabla 66 <i>Frecuencias Observadas de las Preguntas de Criterio Cerrado</i>	185
Tabla 67 <i>Frecuencias Esperadas de las Preguntas de Criterio Cerrado</i>	185
Tabla 68 <i>Frecuencias Observadas de las Preguntas Cualitativas</i>	186

Tabla 69 <i>Frecuencias Esperadas de las Preguntas Cualitativas</i>	186
--	-----

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Robot Foca Terapéutico PARO</i>	40
Figura 2 <i>Audio-Animatronic de Abraham Lincoln</i>	42
Figura 3 <i>Robot Humanoide Animatrónico Social MILO</i>	43
Figura 4 <i>Valle Inquietante, Relación entre Semejanza Humana y Afinidad del Perceptor</i>	44
Figura 5 <i>Principales Unidades de Acción para Generar Expresiones Faciales</i>	47
Figura 6 <i>Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes</i>	50
Figura 7 <i>Ejemplo del Proceso de Detección Facial</i>	51
Figura 8 <i>Ejemplo del Proceso de Reconocimiento Facial</i>	52
Figura 9 <i>Fases del Proceso Genérico de Desarrollo de Producto</i>	54
Figura 10 <i>Partes de un Servomotor</i>	56
Figura 11 <i>Control de Posición del Servomotor mediante PWM</i>	57
Figura 12 <i>Módulo Servocontrolador PCA9685</i>	58
Figura 13 <i>Cámara USB Arducam IMX291</i>	59
Figura 14 <i>Sensor FSR</i>	59
Figura 15 <i>Pines del Módulo DFPlayer Mini</i>	60
Figura 16 <i>Proceso de Moldeado y Vaciado Artístico</i>	64
Figura 17 <i>Casa de la Calidad del Proyecto</i>	69
Figura 18 <i>Modelo de Ejemplo para el Aspecto Estético</i>	73
Figura 19 <i>Rango de Movimientos para el Mecanismo de los Ojos</i>	78
Figura 20 <i>Modelo Estético de la Cabeza Animatrónica</i>	97
Figura 21 <i>Armazón de la Cabeza del Robot Dividida en Sectores</i>	98
Figura 22 <i>Estructura del Torso Dividida en Sectores</i>	98

Figura 23 <i>Modelo Mecánico de la Cabeza Animatrónica</i>	99
Figura 24 <i>Vista Independiente del Mecanismo de Ojos</i>	100
Figura 25 <i>Composición Interna del Globo Ocular</i>	100
Figura 26 <i>Límites de Movilidad del Globo Ocular</i>	101
Figura 27 <i>Movilidad de los Párpados</i>	101
Figura 28 <i>Movilidad Independiente de las Cejas</i>	102
Figura 29 <i>Vista Independiente del Mecanismo de la Boca</i>	103
Figura 30 <i>Movilidad del Mecanismo de la Boca</i>	103
Figura 31 <i>Movimientos Naturales del Cuello Humano</i>	104
Figura 32 <i>Vista Independiente del Mecanismo del Cuello</i>	105
Figura 33 <i>Distancia entre la Carga y el Eje de Giro del Actuador de Elevación</i>	106
Figura 34 <i>Sistema de Engranajes para la Rotación del Cuello</i>	108
Figura 35 <i>Esfuerzo Von-Mises de la Estructura Base de la Boca</i>	110
Figura 36 <i>Desplazamiento de la Estructura Base de la Boca</i>	110
Figura 37 <i>Factor de Seguridad de la Estructura Base de la Boca</i>	111
Figura 38 <i>Diagrama de Cuerpo Libre para el Brazo del Servomotor</i>	112
Figura 39 <i>Elementos para el Cálculo del Momento de Inercia</i>	113
Figura 40 <i>Esfuerzo Von-Mises del Brazo del Servomotor</i>	114
Figura 41 <i>Desplazamiento del Brazo del Servomotor</i>	114
Figura 42 <i>Factor de Seguridad del Brazo del Servomotor</i>	115
Figura 43 <i>Esquema Básico de Conexiones del Robot</i>	115
Figura 44 <i>Diagrama Electrónico de la Cabeza Animatrónica</i>	116
Figura 45 <i>Diseño de Placa de Circuito Impreso</i>	119

	20
Figura 46 <i>Diagrama de Flujo de la Interfaz de Control</i>	120
Figura 47 <i>Pantalla Inicial de la Interfaz de Control</i>	121
Figura 48 <i>Pantalla de Presentación de Actividades</i>	122
Figura 49 <i>Pantalla de Saludo de Presentación del Robot</i>	122
Figura 50 <i>Plantillas de Emociones Básicas</i>	123
Figura 51 <i>Submenú de Reconocer Expresiones</i>	124
Figura 52 <i>Gráficos de Emociones para la Plantillas de Ilustraciones #1</i>	125
Figura 53 <i>Plantillas de Reconocer Expresiones con Ilustración #1</i>	125
Figura 54 <i>Gráficos de Emociones para la Plantillas de Ilustraciones #2</i>	126
Figura 55 <i>Plantillas de Reconocer Expresiones con Ilustración #2</i>	127
Figura 56 <i>Plantillas de ¿Cómo me Siento?</i>	128
Figura 57 <i>Pantalla de Control Manual del Robot</i>	129
Figura 58 <i>Pantalla de Control Automático del Robot</i>	129
Figura 59 <i>Pantalla de Instrucciones de Uso</i>	130
Figura 60 <i>Pantalla de Información General</i>	131
Figura 61 <i>Mensaje de Confirmación de Salida</i>	131
Figura 62 <i>Diagrama de Flujo de la Interfaz de Visión</i>	132
Figura 63 <i>Pantalla de Seguimiento de Rostro</i>	133
Figura 64 <i>Procedimiento para el Seguimiento de Rostro</i>	133
Figura 65 <i>Pantalla de Reconocimiento Facial</i>	134
Figura 66 <i>Registro de Datos de Nuevos Usuarios</i>	135
Figura 67 <i>Mensaje de Inicio de Registro</i>	135
Figura 68 <i>Mensaje de Eliminación de Datos</i>	136

Figura 69 <i>Procedimiento para el Reconocimiento Facial</i>	136
Figura 70 <i>Ensamble Simulado de la Cabeza Animatrónica</i>	137
Figura 71 <i>Ensamble del Mecanismo de Ojos</i>	142
Figura 72 <i>Montaje de Cejas en el Mecanismo de Ojos</i>	142
Figura 73 <i>Ensamble del Mecanismo de la Boca</i>	143
Figura 74 <i>Montaje de Cejas, Ojos, Boca, Labios y Articulación Universal</i>	144
Figura 75 <i>Ensamble del Mecanismo del Cuello</i>	144
Figura 76 <i>Vistas de Placa de Circuito Impreso</i>	145
Figura 77 <i>Elaboración de Placa de Circuito Impreso</i>	145
Figura 78 <i>Elementos Parte Electrónica</i>	147
Figura 79 <i>Modelo de la Cabeza Animatrónica con Estructuras Externas</i>	149
Figura 80 <i>Ensamble Estructura Externa de Cabeza y Torso</i>	152
Figura 81 <i>Moldes del Rostro de la Cabeza Animatrónica</i>	153
Figura 82 <i>Mezcla de Silicona con Pintura Acrílica</i>	154
Figura 83 <i>Vaciado de Silicona Dentro del Molde Negativo del Rostro</i>	155
Figura 84 <i>Colocación del Molde Positivo del Rostro</i>	155
Figura 85 <i>Moldes de la Oreja Izquierda del Robot</i>	156
Figura 86 <i>Vaciado de Piel de las Orejas del Robot</i>	156
Figura 87 <i>Solidificación y Preparación de la Piel del Rostro</i>	157
Figura 88 <i>Instalación de Máscara y Orejas en la Estructura Externa</i>	158
Figura 89 <i>Ubicación del Pelaje de la Cabeza Animatrónica</i>	159
Figura 90 <i>Emociones Universales de la Cabeza Animatrónica</i>	163
Figura 91 <i>Distancia Entre el Usuario y el Robot</i>	166

Figura 92 <i>Análisis de Aciertos para Actividad ¿Cómo me siento?</i>	172
Figura 93 <i>Análisis del Tiempo Promedio de los Participantes</i>	172
Figura 94 <i>Resultados de la Pregunta 1</i>	173
Figura 95 <i>Resultados de la Pregunta 2</i>	174
Figura 96 <i>Resultados de la Pregunta 3</i>	174
Figura 97 <i>Resultados de la Pregunta 4</i>	175
Figura 98 <i>Resultados de la Pregunta 5</i>	175
Figura 99 <i>Resultados de la Pregunta 6</i>	176
Figura 100 <i>Resultados de la Pregunta 7</i>	176
Figura 101 <i>Resultados de la Pregunta 8</i>	177
Figura 102 <i>Resultados de la Pregunta 9</i>	177
Figura 103 <i>Resultados de la Pregunta 10</i>	178
Figura 104 <i>Resultados de la Pregunta 11</i>	178
Figura 105 <i>Resultados de la Pregunta 12</i>	179
Figura 106 <i>Resultados de la Pregunta 13</i>	179
Figura 107 <i>Resultados de la Pregunta 14</i>	180
Figura 108 <i>Resultados de la Pregunta 15</i>	180
Figura 109 <i>Resultados de la Pregunta 16</i>	181
Figura 110 <i>Resultados de la Pregunta 17</i>	181
Figura 111 <i>Resultados de la Pregunta 18</i>	182

Resumen

El presente trabajo de titulación exhibe el diseño y construcción de una cabeza animatrónica capaz de realizar expresiones faciales que representen las seis emociones básicas (felicidad, ira, tristeza, asco, sorpresa y miedo), con el objetivo de facilitar la comunicación de niños y niñas con Trastorno del Espectro Autista (TEA). El trabajo está compuesto por elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control; mismos que se orientan para controlar a los actuadores colocados al interior del robot para realizar los gestos sobre un rostro de silicona y, también, a los exteriormente ubicados para mover el cuello. La cabeza animatrónica tiene una apariencia caricaturesca con la intención de verse confiable y amigable con los usuarios; además, su control se efectúa mediante una interfaz gráfica de usuario programada en Python, misma que presenta varias actividades de expresión facial enfocadas a describir los puntos clave para reconocer las emociones básicas. El sistema de visión artificial cuenta con su propia interfaz, implementada para el seguimiento de rostros y reconocimiento de usuarios. Finalmente, el propósito del proyecto, de presentar una alternativa asequible a la sociedad para el tratamiento de niños y niñas con TEA enfocado en la enseñanza de expresiones faciales, se evalúa con pruebas de funcionamiento y encuestas a los participantes, del mismo modo se utiliza la prueba del Chi-Cuadrado para validar la hipótesis propuesta, la cual confirma los resultados obtenidos en las pruebas y afirma el funcionamiento de la cabeza animatrónica.

Palabras clave:

- **TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA (TEA)**
- **ANIMATRÓNICA**
- **ROBOT SOCIAL**
- **EMOCIONES BÁSICAS**

Abstract

The present graduation work exhibits the design and construction of an animatronic head capable of making facial expressions that represent the six basic emotions (happiness, anger, sadness, disgust, surprise and fear), with the aim of facilitating communication between children with Autism Spectrum Disorder (ASD). The work is composed of mechanical, electrical, electronic and control elements; which are oriented to control the actuators placed inside the robot to perform gestures on face made out of silicone and, also, those externally placed to move the neck. The animatronic head has a cartoonish appearance intended to look reliable and user-friendly; in addition, its control is done through a graphical user interface programmed in Python, which presents several facial expression activities focused on describing the key points to recognize basic emotions. The artificial vision system has its own interface, implemented for face tracking and user recognition. Finally, the purpose of the project, to present an affordable alternative to society for the treatment of children with ASD focused on the teaching of facial expressions, is evaluated with performance tests and surveys to the participants, in the same way the Chi-squared test is used to validate the proposed hypothesis, which confirms the results obtained in the tests and affirms the operation of the animatronic head.

Key words:

- **AUTISM SPECTRUM DISORDER (ASD)**
- **ANIMATRONICS**
- **SOCIAL ROBOT**
- **BASIC EMOTIONS**

CAPÍTULO I

1. Introducción

El presente capítulo contempla los antecedentes, el planteamiento del problema, la justificación e importancia del desarrollo de una cabeza animatrónica enfocada a facilitar la comunicación de niños y niñas con Trastorno del Espectro Autista (TEA). A continuación, se presenta la descripción general del proyecto, se define el objetivo general y los objetivos específicos para completar el trabajo de titulación, se plantea la hipótesis y finalmente se expone la estructura del documento.

1.1. Antecedentes

A lo largo de los años se han desarrollado varios trabajos que tienen por objetivo brindar una solución al problema social que representa el TEA, el Projecte Autisme la Garriga (2016) lo define como “un trastorno neurobiológico del desarrollo que ya se manifiesta durante los tres primeros años de vida”, refiriéndose al TEA como una afección que dificulta la manera en que una persona se comunica y socializa con otras.

Mayo Clinic (2018), acota que “no hay cura para el trastorno del espectro autista, y no existe un tratamiento único para todos los pacientes”, es decir, una persona que tiene TEA se encuentra en una zona del espectro diferente al de los demás. Los tratamientos, realizados con ayuda de un terapeuta, son individuales y se enfocan primordialmente en áreas de la conducta, comportamiento, comunicación y social. También existen medicamentos y medicina alternativa que buscan controlar los síntomas.

En el Media Lab del MIT, Estados Unidos, se desarrolló el proyecto “EngageME: aprendizaje automático personalizado y robots humanoides para medir el afecto y la participación de niños con autismo”, en el cual se han utilizado robots humanoides como NAO y

herramientas tecnológicas para analizar las diferentes expresiones faciales, tonos de voz, temperatura corporal, entre otros, entrenando un algoritmo que puesto a prueba ha alcanzado un entendimiento del 60% entre los niveles de afecto y conducta percibidos por el robot y los mostrados por los niños participantes del proyecto (MIT Media Lab, 2018).

Investigadores de la Universidad Sohar – Omán y de la Universidad de Tecnología – Iraq, han presentado el trabajo titulado “Implementación evaluativa de robot humanoides para niños autistas: una revisión”, en el cual supervisan el uso de robots como un método interactivo de aprendizaje y los resultados sugieren que los niños con autismo aumentan sus habilidades emocionales, sociales y mentales de mejor manera con la asistencia de robots sociales que solo con ayuda humana y que el tratamiento más adecuado se da al trabajar a la par con el terapeuta y el robot humanoide (Yousif et al., 2019).

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se realizó el proyecto titulado “Diseño y construcción de un robot que clasifique tarjetas con rutinas basadas en pictogramas para niños con Trastorno del Espectro Autista (TEA) a través de visión artificial”, donde el humanoide llamado FRANKIE instruye rutinas básicas de comportamiento humano mientras interactúa con los infantes, los resultados demuestran una reducción de 36% en el tiempo promedio para terminar dichas rutinas, mostrando que las herramientas tecnológicas brindan beneficios no solo en los tiempos sino también en la efectividad de las sesiones acompañadas por un humanoide (Caicedo y Maldonado, 2019).

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, el trabajo “Diseño, construcción e implementación de un robot animatrónico humanoide para el mejoramiento de la terapia de niños y niñas con síndrome del trastorno del espectro autista (TEA)” desarrolla un robot animatrónico capaz de replicar el movimiento de los brazos, enfocado a la terapia de

niños con TEA. Los resultados de este trabajo sugieren que el robot incide de forma positiva a las sesiones volviéndolas más entretenidas para los usuarios (Cadena y Oleas, 2019).

1.2. Planteamiento del Problema

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a los trastornos del espectro autista (TEA) como una afección, causada por factores ambientales o genéticos, que aparecen en los primeros años de vida y se presentan como una alteración del comportamiento, dificultando significativamente la capacidad de las personas para comunicarse y de participar en actividades cotidianas dentro de la sociedad. Además, estima que uno de cada 160 niños en el mundo tiene TEA, pero esa cifra es una aproximación ya que no representa a los individuos de países con bajos o medios recursos donde no se cuenta con diagnósticos a temprana edad (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2019).

En Ecuador, el Dr. Andrés Jiménez Gómez (2019) menciona que “en la organización Mundial de la Salud, en 2018 se reportaron 1.521 casos de autismo en el Ecuador (...) sin contar a quienes lo padecen y no lo saben o han sido mal diagnosticados”, es decir, pueden existir más casos pero por la complejidad de diagnosticarlos es difícil tener una cifra exacta y, que a pesar de no existir una solución, se pueden dar tratamientos de expresión y déficit de atención.

El problema se da por la escasa disponibilidad de artefactos tecnológicos que aporten en el tratamiento de TEA en países con bajos y medios ingresos, inclusive en los países de origen de estas tecnologías estos dispositivos se encuentran en etapas de prototipado complicando su comercialización y si se llega a solventar esta cuestión, seguirá existiendo el impedimento económico que hace a estos robots un lujo en muchos hogares; y del lenguaje, ya que la mayoría está orientado a su ambiente dificultando la adaptación al sector hispanohablante. Así, en Ecuador persiste el bajo desarrollo de proyectos inclusivos que incorporen a robots sociales y

en especial robots que enseñen a los niños con TEA a reconocer las emociones en sus propios rostros y en los rostros de las demás personas.

1.3. Descripción Resumida del Proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y construcción de una cabeza animatrónica con percepción sensorial capaz de realizar gestos y expresiones que permita facilitar la comunicación de niños y niñas con Trastorno del Espectro Autista (TEA). Se empieza por investigar aspectos relevantes sobre el tratamiento de este trastorno, además de los parámetros estéticos visuales que debe cumplir el robot para verse atractivo para las personas con TEA y de los tipos de actividades que el robot debe ejecutar para ser útil en terapias de la comunicación y entendimiento de emociones por expresiones faciales. Considerando que el robot está enfocado para asistir los dos primeros niveles de TEA de los tres definidos, siendo: Nivel 1: necesita ayuda, Nivel 2: necesita ayuda notable y Nivel 3: necesita ayuda muy notable; y está destinado para que trabaje con niños y niñas en edad escolar (entre 5 a 10 años).

El trabajo contará con seis etapas principales: implementar un sistema de actuadores en una estructura que asemeje una cara, adaptar un sistema de percepción sensorial la piel de la cabeza animatrónica, implementar un sistema de visión artificial, experimentar varios movimientos a fin de representar las distintas emociones de felicidad, ira, tristeza, asco, sorpresa, desprecio y miedo, preparar pruebas para verificar el funcionamiento del robot, y elaborar y revisar un manual de usuario.

La primera etapa es el implementar un sistema de actuadores en una estructura que asemeje una cara, la cabeza no debe mostrar facciones muy realistas ni ficticias para no caer en la incertidumbre, que en el peor de los casos haría confundir a los niños y niñas y no se podría ejecutar la terapia con comodidad.

La segunda etapa es adaptar un sistema de percepción sensorial en la piel del robot que pueda reaccionar ante estímulos fuertes o delicados como caricias, a fin de mostrar a los infantes el correcto acercamiento físico que se debe dar entre personas que establecen una relación de confianza. La piel debe formarse con material flexible capaz de moverse a la par con el sistema de actuadores.

La tercera etapa reside en experimentar combinaciones de movimientos del sistema a fin de encontrar los adecuados para representar las expresiones faciales básicas basadas en un rostro humano, cabe mencionar que estos movimientos deben ser tanto autónomos como manuales, autónomos para replicar las expresiones de los niños y niñas, y manuales para que el terapeuta pueda ensayar distintos movimientos que no sean parte de los programados.

La cuarta etapa consiste de implementar un sistema de visión artificial que detecte la cara del usuario e identifique su expresión y actúe de forma independiente ya sea para llamar la atención o replicar una emoción.

La quinta etapa es preparar pruebas que demuestren el correcto funcionamiento de la cabeza animatrónica y el nivel de interacción entre los usuarios y el robot, a partir de los resultados considerar un rediseño para ajustar o corregir cualquier fallo encontrado.

Finalmente, la sexta y última etapa es el elaborar un manual de usuario que detalle de forma concreta el uso del robot, con el objetivo de facilitar su manipulación en nuevos entornos o por nuevos usuarios que no conozcan la utilidad de la cabeza animatrónica.

1.4. Justificación e Importancia

Las terapias en el país utilizan métodos de aprendizaje convencionales como el Tratamiento y Educación de Niños con Autismo y Problemas Asociados de Comunicación (TEACCH, por sus siglas en inglés) creada hace más de 40 años por el Dr. Eric Schopler donde se

adecúa el tiempo, espacio y sistema de trabajo con el objetivo de maximizar la adaptación de los infantes hacia su entorno (Asociación Navarra de Autismo, 2016). Pero Cadena y Oleas (2019) mencionan que esta metodología puede “producir cansancio, frustración y aburrimiento en los programas de educación y aprendizaje, es necesario el desarrollo de nuevas herramientas tecnológicas que permitan poseer mayor cantidad de opciones para el tratamiento” (p. 4).

Resulta de especial interés identificar como la creación y uso de nuevas tecnologías flexibles y de bajo costo ayudan en las terapias, en su mayoría tradicionales, para lograr superiores resultados en el tratamiento de personas con algún trastorno del espectro autista, en especial de los niños y niñas, ya que los síntomas se manifiestan desde tempranas edades y se extienden hasta la vida adulta. Las terapias basadas en robots han sido estudiadas por distintos grupos por más de una década y se han desarrollado equipos que pueden ser usados en la vida diaria y que tienen la finalidad de poder ser fácilmente programables por profesionales del autismo, sin formación técnica, capaces de funcionar por el tiempo que duren las sesiones (Waltz, 2018).

El proyecto busca proporcionar un robot animatrónico que pueda mostrar las principales emociones de felicidad, ira, tristeza, asco, sorpresa, desprecio y miedo mediante gesticulaciones faciales; además de contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías, tanto para la universidad como para la sociedad en el campo de robots sociales de bajo costo y accesibles en el mercado que interactúen adecuadamente con niños y niñas con TEA, facilitando la terapia con ejecución de rutinas preestablecidas enfocadas al entrenamiento del lenguaje físico que se expresa a través del rostro, para ayudar a los usuarios a tomar parte en la sociedad y no ser aislados en su vida adulta.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar y construir una cabeza animatrónica con percepción sensorial capaz de realizar gestos y expresiones para facilitar la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA).

1.5.2. Objetivos Específicos

- Definir los parámetros estéticos que debe cumplir el robot a fin de ser atractivo para los niños y niñas con TEA.
- Diseñar y construir una estructura de soporte para los componentes cumpliendo con los parámetros estéticos.
- Instalar un sistema de percepción sensorial y de actuadores capaz de replicar las expresiones faciales de felicidad, ira, tristeza, asco, sorpresa, desprecio y miedo.
- Plantear un sistema de visión artificial para que el robot sea autónomo y uno de control que permita al usuario controlar al robot.
- Verificar la funcionalidad del robot mediante evaluaciones que pongan a prueba su destreza en mostrar emociones.

1.6. Hipótesis

¿El diseño y construcción de una cabeza animatrónica con percepción sensorial capaz de realizar gestos y expresiones facilitará la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA)?

1.6.1. Variable Independiente

Cabeza animatrónica con percepción sensorial.

1.6.2. Variable Dependiente

Comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA).

1.7. Estructura del Documento

El documento está conformado por seis capítulos. El primer capítulo está compuesto por la introducción, los antecedentes, el planteamiento del problema, la descripción general del proyecto, justificación e importancia, los objetivos y la hipótesis. El segundo capítulo expone los fundamentos teóricos para los temas principales del proyecto, mismos que sirven de sustento en el diseño y desarrollo del presente trabajo de titulación.

El tercer capítulo se enfoca en el diseño y selección de componentes de la cabeza animatrónica, se inicia por plantear la metodología de diseño e identificar los requerimientos del sistema; a continuación, se formaliza un diseño final que incorpora la parte estética, mecánica, eléctrica, electrónica y de control. Prosigue el cuarto capítulo, donde se detallan los pormenores de la construcción de la cabeza animatrónica a partir de los conceptos seleccionados.

El quinto capítulo expone las pruebas de funcionamiento y sus resultados, seguido de un análisis para determinar si el desempeño del robot es el esperado y, de ser necesario, considerar un rediseño. Para terminar, el sexto capítulo refleja las conclusiones y recomendaciones que se alcanzan al culminar el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO II

2. Fundamentos teóricos e investigación

El presente capítulo expone una investigación de diferentes aspectos centrados al TEA, su clasificación, diagnóstico y tratamientos. Además, se precisan los conceptos de la robótica, la animatrónica y del valle inquietante con su respectiva relación con los TEA. También, se hace hincapié en la expresión facial de las diferentes emociones. Por último, se describe la visión artificial y se definen los programas de computadora utilizados en el desarrollo del presente trabajo de titulación.

2.1. Trastorno del Espectro Autista (TEA)

El término autismo fue definido formalmente por primera vez por el Dr. Leo Kanner en 1943 en su estudio “Trastornos Autistas del Contacto Afectivo”. El estudio describe la conducta de 11 niños en el rango de edades de dos a ocho años que expresaban un comportamiento altamente individualista, singular a su entorno, incapaces de interactuar con los demás, con un obsesivo deseo de mantener la monotonía de sus acciones y que parecían relacionarse de mejor manera con objetos inanimados que con personas (Cohmer, 2014).

En terminología médica, el TEA es detallado como “una afección neurológica y de desarrollo que comienza en la niñez y dura toda la vida. Afectando cómo una persona se comporta, interactúa con otros, se comunica y aprende” (Biblioteca Nacional de Medicina EE.UU., 2020). En definitiva, es una discapacidad del desarrollo que engloba varias condiciones, mismas que previamente eran catalogadas y tratadas por separado, como el trastorno autista, el trastorno generalizado del desarrollo no especificado y el trastorno de Asperger; asimismo, el TEA llega a ser 4.5 veces más común en niños que en niñas (Departamento de Salud y Servicios Humanos EE.UU., 2014).

2.1.1. Sintomatología

Los síntomas del TEA son variados, siendo muchas veces el proceder social el indicativo más evidente; así, una persona con TEA puede manifestar diferentes comportamientos que son marcados en tres niveles de gravedad, donde las conductas demasiado individualistas o ajenas a su entorno son consideradas como características más notables. En la Tabla 1 se muestran los síntomas más frecuentes, pero también se recalca que estos difieren entre cada persona y que los individuos con TEA pueden exhibir grandes fortalezas como “ser capaces de aprender detalladamente cosas, recordar información por largos periodos de tiempo (...) y tener gran memoria visual y auditiva” (Departamento de Salud y Servicios Humanos EE.UU., 2018).

Tabla 1

Síntomas Frecuentes de los Trastornos del Espectro Autista

Sector	Manifestación
Comunicación e interacción social	<ul style="list-style-type: none"> • Escaso contacto visual, tendencia de ignorar a las personas. • No compartir objetos ni actividades con otros. • No responder cuando se les llama por su nombre. • Tono de voz inusual (monótono).
Comportamientos restringidos o repetitivos	<ul style="list-style-type: none"> • Conducta repetitiva involuntaria de movimientos o palabras. • Prolongado e intenso interés en determinados temas. • Irritación a cambios en su rutina, por más leve que sea.

Nota. Adaptado de “Trastornos del espectro autista”, por el Departamento de Salud y Servicios Humanos EE.UU., 2018.

2.1.2. Diagnóstico

Debido a que los TEA, por ser trastornos del neurodesarrollo, no son diagnosticables mediante pruebas médicas, los profesionales de la salud recurren a otras técnicas clínicas para observar, analizar e interpretar el comportamiento de la persona; estos se componen de

instrumentos, cuestionarios y entrevistas, uno de ellos es el Cuestionario de Autismo en la Infancia-Modificado (M-CHAT, por sus siglas en inglés) usado para identificar banderas de alarma a temprana edad y también la Herramienta de Detección del Autismo en Bebés y Niños Pequeños (STAT, por sus siglas en inglés), que a diferencia del anterior, se enfoca en la detección de posibles candidatos para una revisión exhaustiva (Ehmke, 2020).

Los criterios de diagnóstico para TEA son basados en el Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales en su quinta edición (DSM-5, por sus siglas en inglés), documento, regularmente revisado desde su primera edición en el año 1952 por la Asociación Americana de Psiquiatría (APA, por sus siglas en inglés), que provee a médicos e investigadores una base sobre los síntomas y las valoraciones de trastornos mentales, procurando ser una herramienta viable para obtener diagnósticos acertados (Asociación Americana de Psiquiatría [APA], 2020).

A diferencia de su cuarta versión, el DSM-5 agrupa al trastorno autista, el trastorno de Asperger y el trastorno generalizado del desarrollo en los TEA, el cambio intenta mejorar la sensibilidad y especificidad de los diagnósticos (APA, 2013, sección de Prefacio). El manual presenta cinco criterios principales de diagnóstico para la detección del TEA, resaltando diagnósticos que se manifiestan en el presente o por antecedentes del paciente, así, la APA (2013) los describe de la siguiente manera:

- persistentes deficiencias en la comunicación e interacción social;
- patrones restringidos y repetitivos de comportamiento, intereses o actividades;
- los síntomas causan discapacidad significativa en las áreas social, ocupacional o en áreas importantes del funcionamiento regular;
- los síntomas deben estar presentes en el periodo de desarrollo temprano; y

- estas perturbaciones no son mejor explicadas por discapacidad intelectual (trastorno del desarrollo intelectual) o retraso global del desarrollo. (pp. 50–51)

2.1.3. Niveles de Gravedad

Como se muestra en la Tabla 2, el DSM-5 especifica los niveles de gravedad de los TEA en determinados rangos con las condiciones sociales y de comportamiento asociadas.

Tabla 2

Niveles de Gravedad de los Trastornos del Espectro Autista

Nivel de gravedad	Comunicación social	Comportamientos restringidos y repetitivos
Grado 3 “Requiere ayuda muy notable”	Severas deficiencias en las habilidades de comunicación social verbal y no verbal, causando graves impedimentos en la funcionalidad; muy limitada iniciación de interacciones sociales y respuesta mínima al acercamiento social de otros.	Inflexibilidad del comportamiento, dificultad extrema de aceptar cambios u otros comportamientos restringidos/repetitivos. Intensa angustia/dificultad para cambiar enfoque o acción.
Grado 2 “Requiere ayuda notable”	Notables deficiencias en las habilidades de comunicación social verbal y no verbal; limitada iniciación de interacciones sociales y reducida o anormal respuesta al acercamiento social de otros.	Inflexibilidad del comportamiento, dificultad para aceptar cambios u otras restringidas/repetitivas conductas. Angustia y/o dificultad para cambiar enfoque o acción.
Grado 1 “Requiere ayuda”	Sin apoyo, las deficiencias en la comunicación social causan impedimentos notables. Dificultad iniciando interacciones sociales y claros ejemplos de respuesta atípica o no exitosa al acercamiento social de otros.	Inflexibilidad del comportamiento causa interferencia significativa del funcionamiento en uno o más contextos. Desafíos de organización y planificación obstaculizan la independencia.

Nota. Adaptado de *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* [Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales] (5ª ed., p. 52), por Asociación Americana de Psiquiatría, 2013, American Psychiatric Publishing.

En adición a la gravedad, APA (2013) menciona que la falta de habilidades sociales previene que los niños y niñas con TEA se vinculen íntegramente dentro de su entorno; su

repetitivo comportamiento y sensibilidad sensorial pueden llegar a interferir con actividades cotidianas en el hogar, sean o no estas acompañadas por algún tipo de discapacidad intelectual, acarreando una dificultad de establecer independencia en la vida adulta (p. 57).

2.1.4. Tipo de Tratamientos

Debido a la no uniformidad de condiciones y a la diversidad de necesidades que pueden tener las personas con TEA, los tratamientos disponibles solamente se encauzan en: aumentar las capacidades de desempeño y mejorar las habilidades de desarrollo y aprendizaje de cada individuo. Además, existen: terapias destinadas al comportamiento y comunicación, con el objetivo de controlar los problemas de actitud y enseñar a las personas con TEA como desenvolverse en determinadas situaciones; y terapias educativas y familiares, que buscan fomentar habilidades útiles en la vida diaria mediante intervenciones por parte de profesionales y actividades con ayuda de los padres para mejorar su interacción con familiares y con las demás personas (Mayo Clinic, 2018).

El tratamiento de mayor empleo es el psicopedagógico, aplicado a través de diversos métodos, como el Sistema de Comunicación por el intercambio de Imágenes (PECS, por sus siglas en inglés) implementado en casos con dificultades para comunicarse eficientemente por medio del lenguaje; y el modelo TEACCH, que es usado en la etapa escolar para impulsar la autonomía a través de la organización del tiempo y espacio realizando diferentes actividades fundamentadas en la información visual (Rodríguez y Calvo, 2018).

Complementariamente, existen tratamientos farmacológicos menos eficaces que los terapéuticos pero que buscan controlar otras manifestaciones psicosociales del TEA; estos son: antibióticos, para calmar problemas digestivos; antipsicóticos, para reducir los niveles de irritabilidad e hiperactividad; anticomiciales, para reducir la agitación aunque estos no cuentan

con resultados comprobados; antidepresivos, para tratar indicios obsesivo-compulsivos pero con la desventaja de presentar más efectos adversos y, finalmente, la administración de sustancias antipurinérgicas como la suramina, que en pequeñas dosis es útil para reducir los comportamientos restringidos y repetitivos del individuo (Robles López et al., 2019).

2.2. Robótica

La robótica es una ciencia que combina muchas disciplinas y que, como plantea Reyes (2011), se encarga de estudiar específicos sistemas mecánicos, denominados manipuladores y que cuenta con amplios campos de aplicaciones, tanto en ámbitos industriales, académicos y domésticos (p. 3). Existen más definiciones aceptadas, pero todas comparten un enfoque similar, que es el de producir aparatos sustitutivos del personal humano para realizar algún trabajo, que por lo general se desarrolla en el sector industrial (Real Academia Española, s. f.)

2.2.1. Robot

A lo largo de la historia, el ser humano ha pensado y creado un sinfín de invenciones mecánicas, muchas de las cuales muestran cierta independencia y que tienen el propósito de imitar la vida humana en alguna manera, dichos artefactos reciben el nombre de robot, término introducido en el siglo XIX por el escritor checo Karel Capek pero originado por su hermano Josef Capek, y que hace referencia a un grupo de trabajadores artificiales destinados a realizar labores tediosas (Margolius, 2017, p. 5; Zabala, 2007, p. 17).

Existen muchas más definiciones sobre el término robot, una de las más conocidas es la propuesta por la Asociación de Industrias Robóticas (RIA, por sus siglas en inglés) que plantea a un robot como un “manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas” (Reyes, 2011, p. 4). Asimismo, no es posible extender una

definición general que englobe con certeza todo aquello que se considere como un robot, esto debido a la cuantiosa variedad de tipos de robots existentes en la actualidad, mismos que llegan a ser clasificados, en términos generales, según su uso como: industriales, espaciales, médicos, domésticos, sociales y agrícolas; según el medio donde ejercen la acción como: terrestres, acuáticos, aéreos e híbridos; y, finalmente, según su nivel de inteligencia como: autónomos, semiautónomos e híbridos (Zabala, 2007, pp. 19–22).

2.2.2. Robots Sociales

Entre la amplia diversidad de robots, clasificados según su uso, se encuentran los robots sociales, diseñados específicamente para interactuar con seres humanos en ámbitos sociales y, por ende, con alta capacidad de comunicación verbal y no verbal, siendo su aspecto estético amigable un factor clave para llegar a entablar un vínculo cercano con sus usuarios; por ende, deben ser capaces de mostrar emociones mediante gestos, tonos, lenguaje corporal, etcétera (Zabala, 2007, p. 20). Por esta razón y debido a que los robots sociales son usados en el sector asistencial y de servicios, estos requieren ser fáciles de programar, seguros, adecuados para manipular objetos y capaces de adaptarse a entornos cambiantes, donde deben mostrar cierto aprendizaje en ámbitos no establecidos (Torras, 2014).

Uno de los robots sociales más conocido en la actualidad es PARO, desarrollado en 1993 como un robot terapéutico por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada de Japón (AIST, por sus siglas en inglés), el cual personifica a una cría de foca arpa como se muestra en la Figura 1. Este robot tiene el propósito de reducir estrés en pacientes y sus cuidadores, además de actuar como moderador social entre los mismos, y de ejercer un efecto psicológico positivo en pacientes con trastornos del habla, depresión y/o demencia en personas de edad avanzada (PARO Robots, 2014; Shibata, 2012).

Figura 1

Robot Foca Terapéutico PARO



Nota. Reproducido de *Paro Therapy Robot* [Fotografía], por T. Trowbridge, 2010, Flickr.

2.2.3. Robots Humanoides

El término humanoide hace referencia a robots inteligentes con características físicas semejantes a las humanas, ya sean bípedos de cuerpo completo o móviles de medio cuerpo con cabeza, brazos y torso; y con la capacidad de ejecutar tareas de la forma en que un humano las realizaría (Yoshida, 2018). El robot WABOT-1 fue un proyecto desarrollado por la Universidad de Waseda, Japón en 1970, y es considerado como el primer robot antropomórfico inteligente del mundo, mismo que estaba conformado por un sistema de control de extremidades, un sistema de visión, uno de conversación, manos y piernas artificiales; entre sus funciones podía caminar moviendo sus extremidades inferiores, medir distancias y direcciones, además de reconocer y manipular objetos (Instituto de Robótica Humanoide, s. f.).

Existen en la actualidad muchos tipos de robots que pueden ser etiquetados de manera general como humanoides, pero de ser así, esta categoría variaría enormemente en términos de

habilidades cognitivas y físicas, por lo que no es posible tener una clara interpretación del término, pero si es factible declarar que este tipo de robots se destacan por sus capacidades intelectuales, de personificación y motrices; a pesar de su difusa clasificación los humanoides tienen áreas de aplicación bien definidas que son, entre otras, ayudar en las tareas del hogar, ayudar en labores de rescate, entretenimiento, participar en investigaciones y experimentos, cuidar y asistir a personas mayores o con algún tipo de enfermedad, y sustituir a personal humano en trabajos desagradables, peligrosos o aburridos (Eaton, 2015, p. 34; Yoshida, 2018).

2.2.4. *Percepción Sensorial en Robots*

Se refiere a la implementación de las habilidades innatas de los seres vivos en robots por medio de sensores capaces de receptar información del entorno y transformarlos en acciones; siendo la vista con el uso cámaras, el oído con micrófonos y el tacto con sensores especializados, los principales sentidos a seguir. Dicha información por sí sola no es suficiente, por más detallada que sea necesita de programas que disequen los puntos fundamentales dependiendo de la aplicación a la que se enfoca el robot, de estos, la vista es el campo con mayor investigación, todo desde la detección de colores hasta el reconocimiento de objetos (Bejerano, 2014; Gomariz, 2019)

2.3. *Animatrónica*

Como expone el Diccionario Merriam-Webster (s. f.), la palabra animatrónica describe a “una marioneta o figura similar que está animada por medio de dispositivos electromecánicos”. Recíprocamente, es una tecnología multidisciplinaria que reúne a la mecatrónica, la anatomía y la animación para crear dispositivos que simulen la conducta de los seres humanos, animales o cosas con movimientos realistas, sean estos preprogramados o controlados manualmente; los robots animatrónicos están presentes principalmente en áreas del entretenimiento, publicidad y

cinematografía, pero tienen un amplio rango de aplicaciones, siendo el costo y la complejidad de construcción las principales limitantes en su empleo (Kaspe et al., 2016, pp. 266–267).

La primera interpretación del término se da en los años sesenta de la mano de Walt Disney Imagineering con los llamados Audio-Animatronics, robots con movimientos y sonidos preestablecidos usados para entretener a los visitantes de parques temáticos; el primer personaje humano de Audio-Animatronics fue una réplica del presidente de Estados Unidos de América Abraham Lincoln, mostrado en la Figura 2, y que fue presentado por Walt Disney en la Feria Mundial de Nueva York (Ayala, 2011).

Figura 2

Audio-Animatronic de Abraham Lincoln



Nota. Reproducido de *Honest Abe* [Fotografía], por N. Lanier, 2013, Flickr.

A pesar de las similitudes que tienen los robots animatrónicos con los humanoides, la principal diferencia reside en la diversidad de personajes, ya que los humanoides están limitados a simular características humanas mientras que los animatrónicos dan vida a cualquier objeto inanimado. Así también, existen dispositivos que agrupan varias categorías de la clasificación de robots pero todo dependiendo del criterio personal; en el caso del tratamiento de personas con TEA se encuentra a MILO, presentado en la Figura 3, catalogado como un robot humanoide animatrónico social, desarrollado para interactuar con niños con TEA ya que puede caminar, hablar y mostrar expresiones faciales sin llegar a impacientarse o cansarse; también, el robot se destina a la mejora de la conducta social y la identificación de emociones (Margolin, 2018).

Figura 3

Robot Humanoide Animatrónico Social MILO



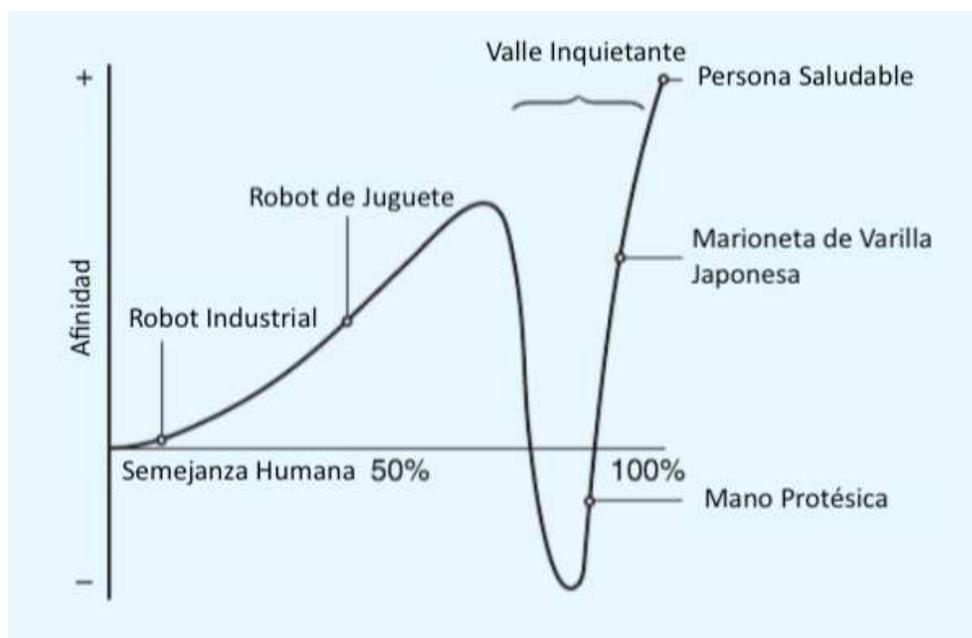
Nota. Reproducido de *The game changing power of robotics and social-emotional learning* [El poder cambiante de la robótica y el aprendizaje socioemocional] [Fotografía], por R. Margolin, 2018, Robots4Autism.

2.4. Valle Inquietante

Concepto introducido al campo de la robótica por el profesor Masahiro Mori en 1970, el cual explica la reacción de observantes hacia robots que se ven y actúan como humanos, en particular se enfatiza en una respuesta inicial de empatía pero que cambia hacia la repugnancia a medida de que el robot se acerca, pero falla en alcanzar, una apariencia realista (Mori et al., 2012, p. 98). Como se observa en la Figura 4, la primera cresta desde el origen del valle se forma por entidades con ligeros rasgos humanos, pero al aumentar la semejanza se llega a un punto donde la figura artificial empieza a generar disconformidad en el receptor, hasta llegar a un valor de afinidad negativo o el punto de repulsión, pero este incrementa la afinidad al tender a un aspecto mucho más semejante al humano.

Figura 4

Valle Inquietante, Relación entre Semejanza Humana y Afinidad del Perceptor



Nota. Adaptado de "The Uncanny Valley [From the Field]" (p. 99), por M. Mori et al., 2012, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19 (2).

En el caso de existir movimiento en la figura artificial, la afinidad del perceptor tiende a amplificarse en las crestas y el valle, además de crecer, el valle se angosta; un ejemplo de este incremento puede evidenciarse con un cadáver, al ser estático se encuentra en el punto más bajo del valle pero al agregar movilidad se transforma en un zombi y la afinidad decae aún más; por tanto, los aspectos importantes al existir movimiento en el robot, aparte de los estéticos, son la velocidad, aceleración y desaceleración (Mori et al., 2012, p. 99).

2.4.1. Relación con los Trastornos del Espectro Autista

El efecto del valle inquietante no llega a evidenciarse en niños con TEA, como Feng et al. (2018) destacan en su publicación, dicha ausencia puede atribuirse a la reducida sensibilidad a notar cambios en los gestos faciales y la limitada experiencia visual de rostros; así, concluyen que la preferencia de niños con TEA, de un grupo de 26 niños entre las edades de 4.9 y 7.2 años, hacia rostros continuó siendo mayormente la misma, mostrando inclinación por rostros con diferentes tamaños de ojos, ya sea con imágenes caricaturescas o humanas, dichas imágenes tenían como áreas de interés a los ojos, nariz y regiones de la boca (pp. 5, 8-10).

2.5. Expresión Faciales de la Emoción

Ekman y Oster (1981) condensaron varios estudios sobre las expresiones faciales de la emoción, señalando que existen expresiones faciales universales para la ira, el asco, la alegría, la tristeza o malestar, el miedo y la sorpresa; añadiendo que hay variaciones producidas por las normas expresivas de la cultura donde se cría la persona (p. 120). Estas expresiones son innatas y cruciales para la formación de relaciones interpersonales y, al tener estructuras musculares complejas es posible diferenciar dichas emociones entre sí, pero resulta de mayor facilidad reconocer la alegría, la sorpresa, el enojo y el asco (Iglesias-Hoyos et al., 2016).

Asimismo, el Dr. Ekman propuso el concepto de las micro expresiones como breves o leves rasgos, difíciles de notar y que suelen ocurrir cuando se intenta suprimir la proyección de cualquier emoción, por esta razón creó el Sistema de Codificación de Acción Facial (FACS, por sus siglas en inglés) para clasificar, a grandes rasgos, las expresiones faciales mediante unas Unidades de Acción (AU, por sus siglas en inglés) (Mallitasig, 2018).

2.5.1. Sistema de Codificación de Acción Facial (FACS)

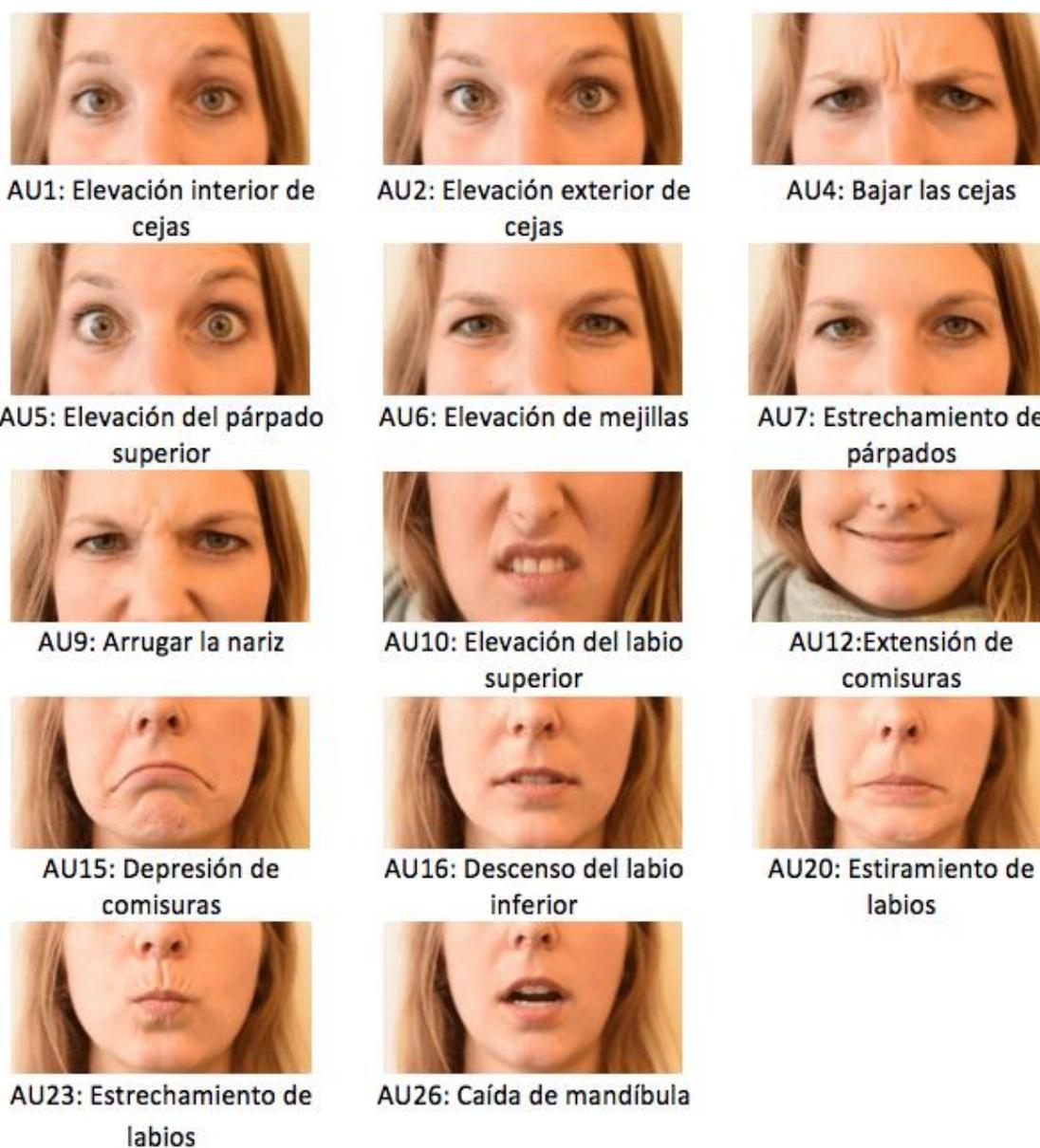
Es una teoría usada para describir el comportamiento facial de un ser humano y, por ende, funciona como sistema que detalla los movimientos de los músculos faciales, específicos o en grupo, y sus miles de posibles combinaciones, mismas que dan paso para representar todas las expresiones faciales (Leo et al., 2018, p. 7). Así también, el análisis de las expresiones faciales llegan a estimar otros aspectos como: la intensidad, derivada en cinco niveles; la duración, que es dependiente de la emoción; y la asimetría facial, que sigue los ejes del rostro para los sectores izquierdo, derecho, superior e inferior (Losa, 2013, pp. 25–26).

El Dr. Ekman define a estos movimientos musculares, de contracción y relajación, como las unidades de acción (AU) y estipuló 44 diferentes unidades como principales. De este grupo, se pueden denotar 14 AU, asociadas a los movimientos de las cejas, párpados, labios y boca, mismas que se involucran directamente en la formación de las seis expresiones faciales universales, recalcando que estas pueden variar, ligera o significativamente, de una persona a otra (Wu et al., 2019, p. 3).

La Figura 5 presenta el nombre del movimiento facial asociado a cada uno de las 14 principales AU, mismas que influyen en la formación de las seis expresiones universales; por otra parte, la Tabla 3 indica, en líneas generales, la emoción resultante de la combinación entre las diferentes unidades de acción.

Figura 5

Principales Unidades de Acción para Generar Expresiones Faciales



Nota. Adaptado de *Facial Action Coding System (FACS) – A Visual Guidebook* [Sistema de codificación de acción facial (FACS) – Una guía visual], por B. Farnsworth, 2019, iMotions A/S.

Tabla 3*Expresiones Universales por Combinación de Unidades de Acción*

Emoción	Descripción	AU
Felicidad	Levantamiento de mejillas con extensión de comisuras.	6 + 12
Ira	Cejas bajadas, párpados estrechados con la parte superior elevada y estrechamiento de labios con el labio superior elevado.	4 + 5 + 7 + 10 + 23
Tristeza	Cejas interiores y mejillas levantadas, cejas bajadas y comisuras extendidas para abajo.	1 + 4 + 6 + 15
Asco	Nariz arrugada, labio superior elevado con descenso de comisuras y del labio inferior.	9 + 10 + 15 + 16
Sorpresa	Cejas interiores y exteriores levantadas, párpado superior elevado y caída de mandíbula.	1 + 2 + 5 + 26
Miedo	Cejas bajadas con la parte interna y externa levantada, párpados estrechados con la parte superior elevada, estiramiento de labios con la boca ligeramente abierta por caída de la mandíbula.	1 + 2 + 4 + 5 + 7 + 20 + 26

Nota. Adaptado de “*Intelligent Facial Action and emotion recognition for humanoid robots* [Acción facial inteligente y reconocimiento de emociones para robots humanoides]” (p. 743), por Zhang et al., 2014, International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Adaptado de *Facial Action Coding System (FACS) – A Visual Guidebook* [Sistema de codificación de acción facial (FACS) – Una guía visual], por B. Farnsworth, 2019, iMotions A/S.

2.6. Visión Artificial

Conjunto de técnicas desarrolladas para que las máquinas puedan ver por medio de la obtención, procesamiento y análisis de imágenes digitales del mundo real; tiene la finalidad de proporcionar información necesaria a las máquinas para resolver una o varias tareas asignadas (INFAIMON S.L., 2018; Maduell i García, 2012, p. 5). Los componentes principales de la visión artificial son: la iluminación, forma de alumbrar el entorno para denotar o anular características del objeto a examinar; la lente, encargada de captar y proyectar la imagen hacia el sensor, es

intercambiable o fija; el sensor de imagen, dispositivo sensible al espectro visible y que se encarga de transformar la luz en una imagen digital bidimensional, o conjunto de $N \times M$ píxeles; el procesamiento, son algoritmos ejecutados mediante software para extraer puntos específicos de la imagen; y las comunicaciones, que se refieren a las conexiones entre los elementos del sistema (Cognex Corporation, 2016, pp. 11–16; Maduell i García, 2012, pp. 12–13, 17).

Los sistemas de visión artificial están distribuidos en los siguientes niveles: 1) Nivel bajo, el valor de los píxeles entrega información necesaria para refinar la imagen; 2) Nivel intermedio, continua el proceso del nivel anterior con la intención de segmentar la imagen, generalmente en este nivel se obtienen bordes o contornos; y 3) Nivel alto, comprende la fase de interpretación, que asigna un significado a la información de los niveles anteriores (Fernández, 2017, p. 18).

2.6.1. *Procesamiento Digital de Imágenes*

Fernández (2017) presenta los pasos a seguir para transformar la información analógica de una imagen hacia un formato digital que el ordenador pueda entender y procesar; estos son:

1. Digitalización, transformación de la señal continua de la imagen analógica hacia una imagen digital o señal discreta para que sea empleada por un ordenador;
2. Preprocesamiento, pretende adecuar la imagen digitalizada con operaciones de supresión de ruido y realce de contraste, para mejorar la calidad de información en la imagen y aumentar la probabilidad de éxito en las siguientes fases;
3. Segmentación, abarca a la extracción de información por unidades o partes presentes en la imagen, es dependiente del problema que se quiere resolver;
4. Representación, fase donde las partes segmentadas son parametrizadas;
5. Descripción, se extraen características para la posterior identificación;

6. Reconocimiento, trata la clasificación de objetos detectados en la fase anterior, agrupando en la misma clase a los objetos con características parecidas; y
7. Interpretación, se encarga de proporcionar un significado a las clases definidas en el reconocimiento. (pp. 27-38)

Algunos pasos, como la representación, descripción, reconocimiento e interpretación, se combinan y establecen las fases del procedimiento de una imagen digital, como se muestran en la Figura 6. Este procedimiento tiene el objetivo de mejorar la calidad visual de una imagen, facilitando la extracción y manipulación de información; adicionalmente, cuenta con una base de conocimiento que se relaciona con todas las fases del procedimiento y que es capaz de albergar información, sencilla o compleja, sobre tareas o características de operación del sistema de visión artificial.

Figura 6

Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes



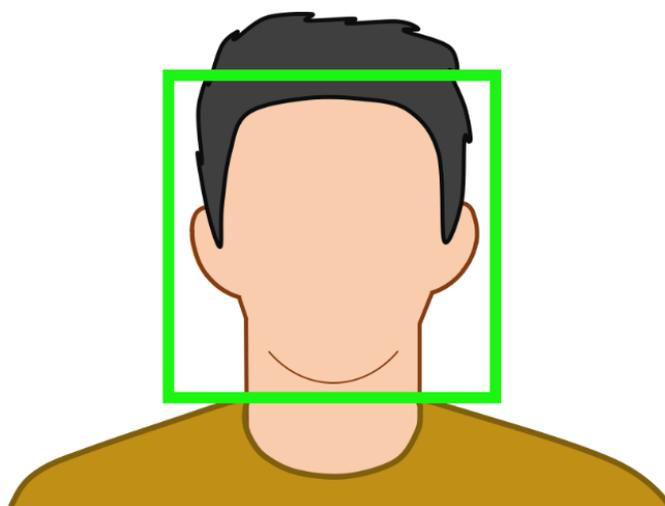
Nota. Adaptado de *Introducción a la Visión Artificial* (p. 39), por N. Fernández, 2017, Universidad de Córdoba.

2.6.2. Detección Facial

Es una aplicación de la visión artificial que proporciona a una máquina la capacidad de distinguir y localizar rostros dentro de una imagen o video. La Figura 7 presenta una ilustración de ejemplo de la localización de rostros.

Figura 7

Ejemplo del Proceso de Detección Facial



El proceso de detección facial puede ser realizado utilizando diferentes métodos, pero tres algoritmos de detección facial se destacan entre las posibilidades, estos algoritmos son:

- Haar-Cascade, propuesto en 2001 por Viola y Jones e incluido en OpenCV como una herramienta pre entrenada de identificación de objetos que recurre en una serie de clasificadores simples aplicados uno tras de otro (Huamán, 2020).
- Histograma de gradientes orientados (HoG, por sus siglas en inglés) con la librería Dlib. La dirección, medida entre 0 a 180 grados, y magnitud del gradiente son estimadas de una región de 8x8 celdas, seguida de una normalización de bloque (Fabien, 2019). Dlib fue originada en 2002 por Davis King y está orientada como una librería de propósito general multiplataforma de código abierto (Dlib C++ Library, 2015).

- Redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) con Dlib. Las CNN tienen una arquitectura basada en la corteza visual de los animales y comprometen la aplicación de varios filtros para entregar como resultado valores binarios. Además, es denotado como el algoritmo más preciso, pero a su vez, el menos rápido (Fabien, 2019).

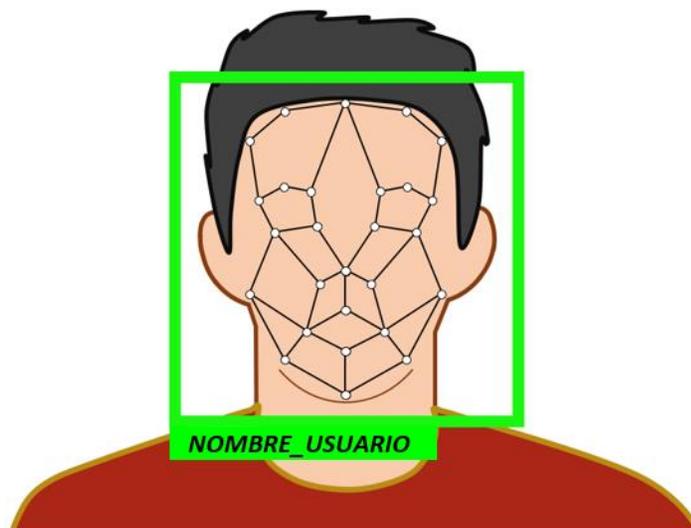
2.6.3. Reconocimiento Facial

Operación de la visión artificial que se encarga de verificar la identidad de un individuo utilizando su rostro como referencia, para ello emplea un algoritmo que extrae y almacena los detalles fisiológicos distintivos de un rostro presente en imágenes, videos o en tiempo real, y los compara con una base de datos, a fin de identificar si el rostro es conocido o no; estos sistemas varían en su habilidad de reconocer rostros en condiciones adversas de luz, baja resolución de imagen y ángulo de visión desfavorable (Electronic Frontier Foundation, 2017).

En la Figura 8 se presenta una ilustración de ejemplo que denota el proceso de reconocimiento facial.

Figura 8

Ejemplo del Proceso de Reconocimiento Facial



Al igual que la detección de rostros, el reconocimiento facial puede ser implementado mediante varios métodos, entre los que destacan:

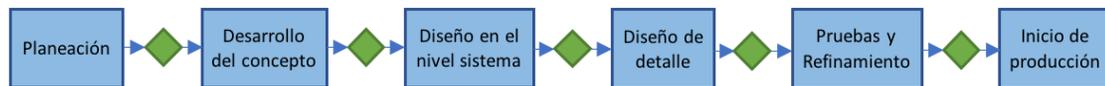
- Eigenfaces, método que analiza y extrae las características de un rostro dentro de un espacio dimensional bajo. Aplica un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) para obtener los rasgos más importantes y la dirección en la que más varían los datos, con la suposición que las distancias intra-cara (entre imágenes de la misma persona) serán menores que las inter-cara (entre imágenes de distintas personas) (Moosa, 2018; Tsesmelis, 2020).
- Fisherfaces, similar a Eigenfaces pero con un Análisis Discriminante Lineal (LDA, por sus siglas en inglés) que permite reducir la dimensionalidad del algoritmo capturando sólo información discriminante y con una independencia a cambios en las expresiones faciales y a variaciones de iluminación (OpenCV, 2020).
- LBPH (Histograma de Patrón Local Binario), operador de texturas que etiqueta los píxeles de una imagen mediante el umbral de la vecindad; debido al uso de histogramas, se permite representar las imágenes en simples vectores de datos binarios que no se ven afectados por cambios en la iluminación. También es posible aplicar una comparación entre rostros por medio del valor de distancia entre los histogramas (Moosa, 2018; OpenCV, 2020).
- Face Recognition, desarrollado por Adam Geitgey y considerado como la librería de reconocimiento facial más simple del mundo; utiliza tecnología deep learning además de la librería Dlib, con sus modelos entrenados de detección de rasgos faciales y de codificación de rostros, llegando a una precisión del 99.38% con la referencia “Labeled Faces in the Wild” (Python Software Foundation, 2021).

2.7. Metodología de Diseño

El proceso genérico de desarrollo de un producto es una serie estructurada de seis partes o fases y es representada por diagramas de flujo, como se observa en la Figura 9, los mismos que son usados para explicar las actividades e información del desarrollo; además, es considerado como un método de procesamiento de información para identificar nuevas ideas de productos, desarrollar los más prometedores y así, intentar satisfacer las necesidades del cliente; el proceso finaliza cuando se obtiene y comunica toda la información necesaria para ayudar en el área de producción y ventas (Ulrich y Eppinger, 2013, pp. 8, 13).

Figura 9

Fases del Proceso Genérico de Desarrollo de Producto



Nota. Reproducido de “Proceso genérico de desarrollo de producto”, por K. T. Ulrich y S. D.

Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos* (5ª ed., p. 14), 2013, McGraw-Hill/Interamericana.

La fase inicial es la planeación en donde se identifican las oportunidades, continua el desarrollo del concepto que precisa las necesidades del mercado y propone alternativas para satisfacer dichas necesidades; sigue el diseño en el nivel sistema que presenta la arquitectura del propio sistema y su descomposición en módulos; después se tiene el diseño de detalle donde se formulan las especificaciones de la geometría, selección de materiales y componentes que incorpora el producto; prosiguen las pruebas y refinamiento, donde se construyen y evalúan prototipos con el fin de definir un producto sin fallas; y por último, el inicio de producción es donde oficialmente empieza la construcción del producto final y termina en su comercialización (Ulrich y Eppinger, 2013, p. 14).

2.7.1. Función de la Calidad

Para tener una definición del producto estructurada, que resuelva los requerimientos del usuario reduciendo costos innecesarios en su desarrollo y asegurando la calidad del diseño del proyecto, es indispensable la implementación del desarrollo de la función de calidad (QFD, por sus siglas en inglés), método de cuatro fases concebido por Yoji Akao, y que se conforma por la planificación del producto, el despliegue de componentes, la planificación del proceso y la planificación de la producción (Riba Romeva, 2002, p. 177).

2.7.2. Arquitectura del Sistema

La configuración modular, permite tener la flexibilidad de modificar el diseño de un componente, sin que este afecte a los demás y, que por ende, sea posible diseñar y fabricar todos los componentes del sistema de forma independiente; además, es caracterizado por separar al sistema en módulos y submódulos (Ulrich y Eppinger, 2013, pp. 185–186).

2.7.3. Método Ensayo y Error

Llamado también método científico, es una técnica exploratoria de investigación destinada a la resolución de problemas en todos los ámbitos; la misma consiste de un proceso relativamente sencillo, primero se selecciona un conjunto de posibles soluciones, el cual se ordena de manera decreciente según su probabilidad para resolver el problema, después se prueba la primera posible solución y, de persistir el problema, se prueba la siguiente hasta solucionar el problema o hasta terminar las alternativas, y finalmente, si el problema continúa, se propone un nuevo conjunto de alternativas; así, la efectividad del método depende de la calidad de alternativas de solución propuestas, de su orden y de los recursos disponibles, sin embargo, el método no garantiza la resolución del problema (Enciclopedia de Ciencias y Tecnologías en Argentina, 2017).

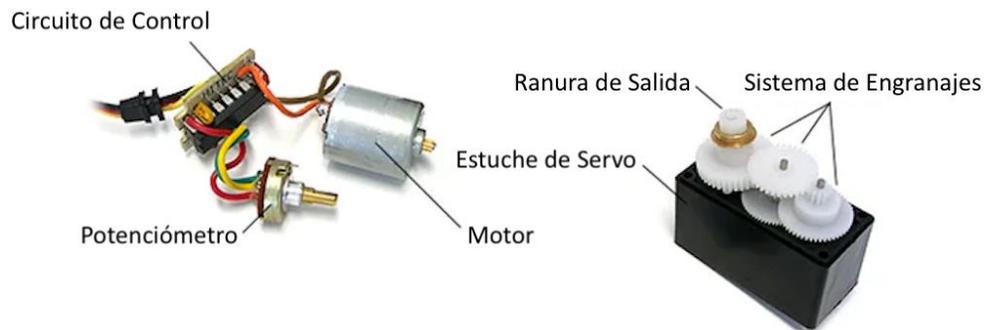
2.8. Hardware del Proyecto

2.8.1. Servomotor

Actuador electrónico utilizado para la transmisión de torque, capaz de ser controlado de forma precisa en velocidad y en posición. Como se aprecia en la Figura 10, el servomotor está compuesto por un motor de corriente continua acoplado a un sistema de engranajes, que se encarga de generar el movimiento; un potenciómetro, que varía su resistencia en relación al eje de salida; y por un circuito de control, que regula el movimiento y dirección de giro (Diosdado, 2018; Jameco Electronics, 2021)

Figura 10

Partes de un Servomotor

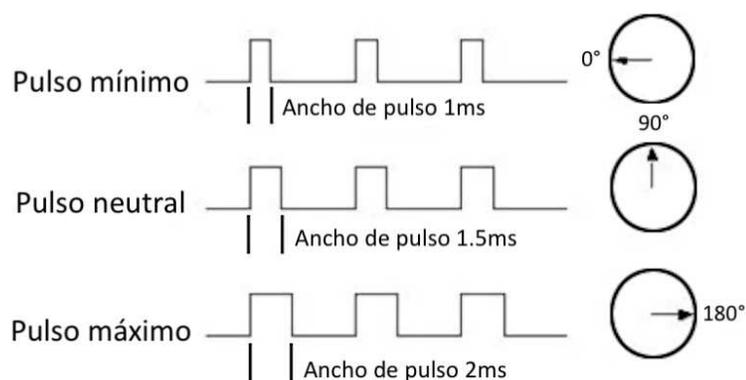


Nota. Adaptado de *How Servo Motors Work* [Cómo funcionan los servomotores], por Jameco Electronics, 2021.

Para el funcionamiento del servomotor se requiere de una señal de pulso eléctrico de ancho variable (PWM, por sus siglas en inglés), que regula la posición del eje dependiendo la duración del pulso medida en milisegundos; así, la Figura 11 describe el control de posición del servomotor con respecto a la señal PWM, donde el valor estándar del período es de 20 ms y la posición del eje llega a 0° con un pulso mínimo de 1 ms de duración, con un pulso neutral de 1 ms llega a 90° y con un pulso máximo de 2 ms llega a 180° (Jameco Electronics, 2021).

Figura 11

Control de Posición del Servomotor mediante PWM



Nota. Adaptado de *How Servo Motors Work* [Cómo funcionan los servomotores], por Jameco Electronics, 2021.

2.8.2. Arduino UNO

Primer modelo de placas USB desarrollada por Arduino, utiliza un microcontrolador ATmega328P, es programada mediante IDE de Arduino y cuenta con la capacidad alimentarse por una fuente externa de poder o por conexión USB (Arduino, 2021). En la Tabla 4 se presentan algunas de sus características técnicas.

Tabla 4

Especificaciones Técnicas del Arduino UNO

Característica	Valor
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines E/S digitales	14 (6 pines de salida PWM)
Pines analógicos	6
Corriente DC por pin E/S	20 mA
Frecuencia de resonador	16 MHz (cerámico)
Peso	25 gr

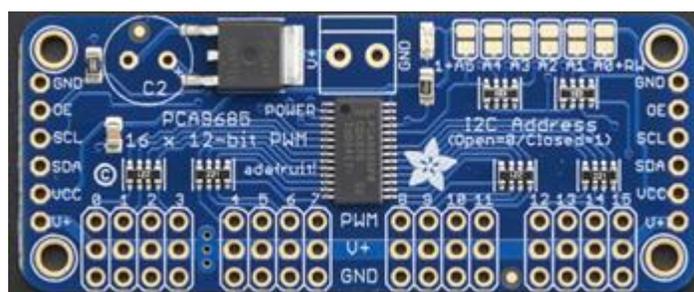
Nota. Adaptado de *Arduino UNO Rev3*, por Arduino, 2021.

2.8.3. Módulo PCA9685

Dispositivo controlador de servomotores, hace uso del protocolo de comunicación de circuito inter-integrado (I2C, por sus siglas en inglés) y cuenta con un chip PCA9685 como se muestra en la Figura 12, permitiendo controlar hasta 16 salidas PWM por módulo, o hasta un máximo de 992 salidas al encadenar 62 módulos con direcciones diferentes; es operado con 5-6 V y cada salida PWM, de 12 bits de resolución, cuenta con una resistencia de 220 Ω conectados en serie admitiendo una corriente máxima de 25 mA por cada pin (Earl, 2012).

Figura 12

Módulo Servocontrolador PCA9685



Nota. Adaptado de *Adafruit PCA9685 16-Channel Servo Driver*, por B. Earl, 2012, Adafruit.

2.8.4. Arducam IMX291

Perteneciente a la familia de cámaras USB Arducam, es un dispositivo capaz de capturar imágenes y video con un sensor de imagen CMOS 1/2.8" Sony IMX291, una resolución de 2MP (1945x1109), un rango dinámico de 80 dB, con sensibilidad infrarroja y una frecuencia de hasta 30 cuadros por segundo en formatos MJPG/YUY2/H.264; además, cuenta con una montura de lente M12, con un ángulo de visión de 100°, un rango de enfoque de 1m hasta el infinito y es apta para condiciones de baja iluminación (0.001 Lux). La cámara opera a 5V DC, en un rango de temperatura de -20°C hasta 70°C y con un consumo máximo de 300 mA (Arducam, s. f.).

Figura 13*Cámara USB Arducam IMX291*

Nota. Reproducido de *USB Low Light Wide Angle Camera Module 2MP Sony IMX291*, por Arducam, s. f.

2.8.5. Resistencia Sensible a la Fuerza

La resistencia sensible a la fuerza (FSR, por sus siglas en inglés) es un componente pasivo desarrollado por Interlink Electronics que permite detectar el valor de la fuerza aplicada en un área sensible; el modelo 402 se compone por dos capas con forma circular de 1/2" de diámetro, mismas que cuando se presionan disminuyen el valor de resistencia; el FSR excede 1 M Ω cuando no hay presión, con una presión ligera baja a 100 k Ω y llega a 200 Ω con una presión máxima, siendo su rango sensibilidad de fuerza de 0.2 a 20 N (Adafruit, 2021; Pololu, 2021).

Figura 14*Sensor FSR*

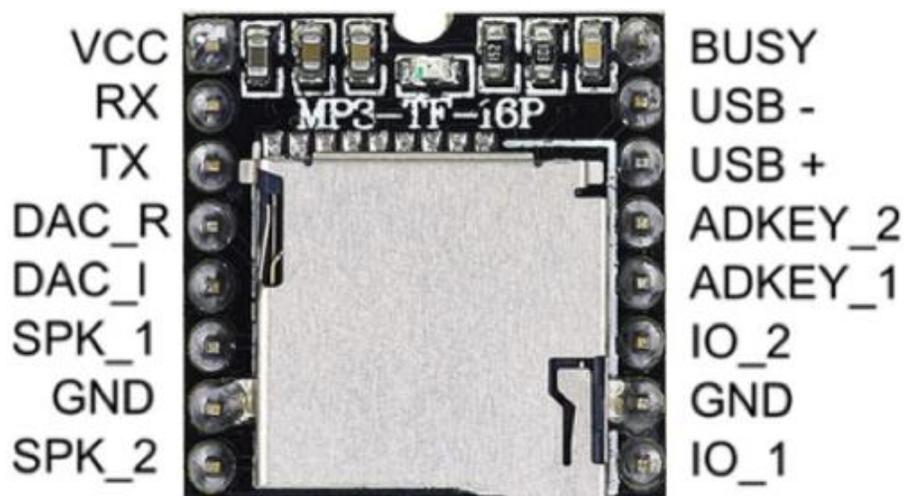
Nota. Reproducido de *Force Sensitive Resistor (FSR)* [Resistencia sensible a la fuerza (FSR)], por Adafruit, 2021.

2.8.6. Módulo DFPlayer Mini

Conocido también como módulo MP3-TF-16P, es un pequeño reproductor de archivos de audio compatible con diversos microcontroladores con comunicación serial, siendo capaz de soportar una tarjeta de memoria SD de hasta 32GB en la cual se pueden almacenar hasta 100 carpetas con un contenido máximo de 255 canciones en cada una; además, puede decodificar señales MP3/WAV/WMA con frecuencias de muestro admitidas de 8 a 48 kHz y permite tener una salida de audio en uno (mono) o dos canales (estéreo), siendo ecualizado hasta por 6 canales y con un control de volumen de 30 niveles (Hareendran, 2021).

Figura 15

Pines del Módulo DFPlayer Mini



Nota. Reproducido *Arduino Sound Machine* [Máquina de Sonido Arduino], por T. K. Hareendran, 2021, Electro Schematics.

2.8.7. Técnicas de Fabricación

En la actualidad existen diversos tipos de tecnologías con las que se pueden formar o manufacturan productos a partir de materias primas, entre las técnicas más conocidas se pueden considerar las siguientes:

- Impresión 3D, proceso para crear objetos tridimensionales a partir de modelos digitales y mediante la deposición de material en capas sucesivas; engloba varias tecnologías, siendo las más conocidas: la fabricación por filamento fundido, el procesamiento digital de luz y la estereolitografía (Romero, 2019).
- Mecanizado CNC, tecnología basada en la extracción de material de un objeto sólido principalmente hecho de metal, por medio de herramientas rotativas o de fresado, siendo un proceso de alta precisión y repetibilidad (Sicnova, 2019).
- Moldeo por fundición, a diferencia de los procesos aditivos o sustractivos de material, el moldeo es mucho más rápido y está enfocado a producciones en masa o que requieren mayor volumen; en este proceso de fabricación, el material fundido se vierte dentro de moldes donde se endurece (Tresde, 2019).

2.8.8. Material de Impresión 3D

Con el auge de la impresión 3D como una tecnología de prototipado económica y eficiente, es posible encontrar en el mercado un sinfín de materiales con características y áreas de aplicación diferentes; siendo consideradas como fundamentales al Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS, por sus siglas en inglés) y al Poliacido Láctico (PLA, por sus siglas en inglés). Estos materiales se diferencian por varios aspectos, entre los principales se tiene que el ABS es mucho más duro que el PLA e inclusive en algunos casos es más barato, pero tiene la desventaja de necesitar temperaturas de impresión superiores, por consiguiente, la temperatura de la bandeja de impresión también es mayor, dicha desventaja al final se traduce en costos más elevados por concepto de consumo eléctrico.

La Tabla 5 presenta las propiedades generales, concretamente de las características físicas y mecánicas, del ABS y del PLA.

Tabla 5*Propiedades Físicas y Mecánicas del ABS y PLA*

Atributo	Unidades	Valor Promedio (ABS)	Valor Promedio (PLA)
Densidad	g/cc	1.07	1.29
Resistencia a la tracción	MPa	40.4	64.5
Elongación al corte	%	28.8	59.6
Módulo de Young (elasticidad)	GPa	2.31	2.34
Resistencia a la fluencia	MPa	44.8	40
Resistencia a la flexión	MPa	72.7	76.4
Dureza Shore D	–	82.3	69.8
Conductividad térmica	W/(m·K)	0.163	0.0439
Temperatura de fusión	°C	235	182
Coefficiente de expansión térmica	µm/(m·°C)	88.8	114

Nota. Adaptado de *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded*

[Descripción de materiales para acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), moldeado], por MatWeb,

2021. Adaptado de *Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer* [Descripción de materiales para el biopolímero de ácido poliláctico (PLA)], por MatWeb, 2021.

2.8.9. Caucho de Silicona

Denominado simplemente como silicona, término consignado por el químico Frederick Kipping, es un polímero o plástico de origen sintético, generado a partir de la combinación del dióxido de silicio a altas temperaturas con carbono, hidrógeno y oxígeno, siendo obtenido en forma de gel, aceite o sólido; entre sus principales propiedades se consideran: buena resistencia térmica, presentando una temperatura estable en rangos desde -100°C hasta +250°C; baja toxicidad, al no depender químicos nocivos; aislante eléctrico en temperaturas desde -80°C hasta +180°C; e impermeable, por sus buenas características hidrofóbicas. Además, la silicona presenta altas propiedades mecánicas como son una alta elasticidad, resistencia al desgarro, resistencia a la abrasión, entre otras (Merefsa, s. f.; Ravanetto, 2021).

2.8.10. Moldeado Artístico

Es una de las técnicas escultóricas más antiguas que existe y consiste en la elaboración de moldes para la producción de volúmenes tridimensionales, es decir, el moldeado permite encontrar el volumen que ocupa un objeto dentro de un determinado espacio, mismo que se delimita por su propia forma; así, la proyección espacial del volumen de un objeto puede estar representada, dependiendo la complejidad del mismo, por dos o más espacios adyacentes, los cuales se utilizan para la reproducción del volumen del objeto. Dicha reproducción inicia con el moldeado, caracterizado por la formación de moldes positivos y negativos, donde el positivo se conforma por las partes físicas del objeto o información tangible y el negativo, al contrario, aporta la información intangible, lo que permite considerar al molde como la materialización de información tangible de un objeto en negativo; y la misma finaliza con el vaciado, donde se rellena el negativo a fin de obtener una reproducción o copia (Martínez Gómez de Albacete, 2013, pp. 1–3).

Como Besednjak (2011) afirma, el proceso de diseño y fabricación de moldes conlleva un análisis previo de diferentes aspectos, pudiendo resaltar los siguientes:

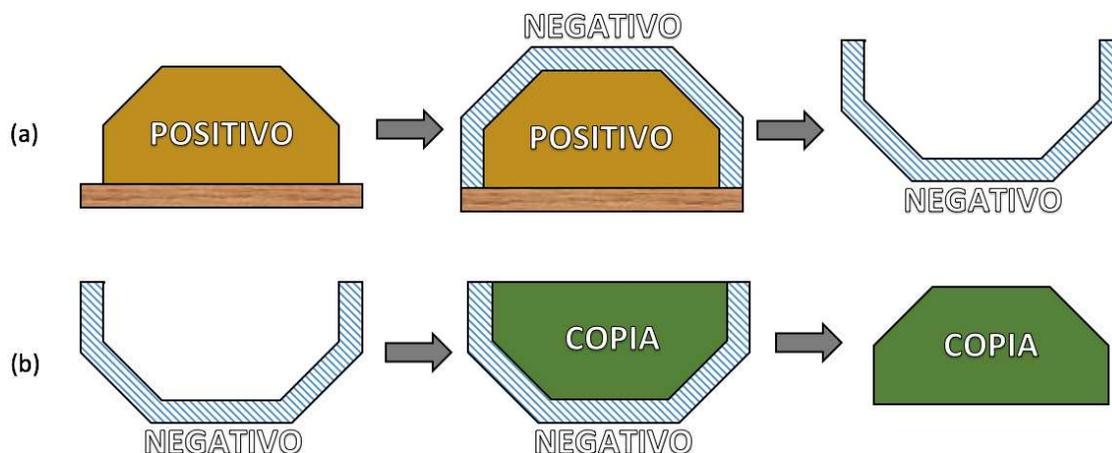
- método de producción, además de especificar el material de construcción, que puede ser madera, fibra de vidrio, o carbono, también define las condiciones a las que este se expone;
- tamaño y complejidad del diseño, describe tanto el tamaño y espesor de pared del molde, así como su complejidad, misma que delimita el número de particiones que debe tener a fin permitir un desmoldeo sencillo;
- coste del producto, condicionado por el número de unidades a producir y directamente relacionado en la definición de peso y material del molde; y

- requerimientos de acabado superficial, propone diferentes especificaciones para la superficie del molde, estas pueden ser de brillo o de resistencia ante agentes químicos, agua o fuego, etc. (Besednjak, 2011, pp. 1–3)

La Figura 16 muestra, a grandes rasgos, las técnicas para la elaboración de moldes, sean estos rígidos o flexibles, y la posterior reproducción tridimensional del objeto en un material determinado.

Figura 16

Proceso de Moldeado y Vaciado Artístico



Nota. (a) Moldeado de un objeto. (b) Vaciado de una reproducción.

2.9. Software del Proyecto

2.9.1. Blender

Suite de creación 3D gratuita y de código abierto bajo licencia pública general GNU GPL, con raíces en la Fundación Blender en 2002 y enfocada al modelado, animación, simulación, renderizado y más procesos referentes al campo 3D; a más de ser gratuito para aplicaciones comerciales o educativas, el software es multiplataforma, haciendo posible su ejecución en computadoras de sistemas operativos Linux, Windows y Macintosh (blender.org, 2021).

2.9.2. Autodesk Fusion 360

Herramienta computacional desarrollada por la empresa Autodesk que engloba los procesos de diseño asistido por computador, manufactura asistida por computador e ingeniería asistida por computador (CAD/CAM/CAE, respectivamente, por sus siglas en inglés); además, es un servicio basado en la nube por lo que es posible acceder y controlar la información desde cualquier lugar por un ordenador con sistema operativo Windows o Macintosh, también se caracteriza por trabajar con ensambles, animaciones, simulaciones, uniones y estudios de movimiento, entre otras herramientas (Autodesk Inc., 2021).

2.9.3. Cura

Software de impresión 3D gratuito y de código abierto ideado para preparar modelos CAD para su posterior fabricación, siendo compatible con archivos STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, JPG, PNG y con la integración de complementos para varios programas de diseño como SolidWorks, Siemens NX y Autodesk Inventor; el software está destinado a cortar o rebanar digitalmente un modelo 3D en capas, siendo posible aplicar y configurar más de 400 especificaciones avanzadas, esto para convertir el modelo a un lenguaje de máquina que la impresora puede entender (Ultimaker BV, 2021).

2.9.4. KiCad

Suite de código abierto multiplataforma para la automatización de diseño electrónico, inicialmente desarrollado por Jean-Pierre Charras y publicado por primera vez en 1992. Programa capaz de trabajar tanto con planos esquemáticos, como con placas de circuito impreso y con archivos de extensión Gerber. Software con extensas capacidades de diseño destinado para profesionales del diseño electrónico pero con el propósito de reducir la complejidad de diseño para nuevos usuarios (kicad.org, 2021).

2.9.5. Python

Lenguaje de programación de alto nivel y de código abierto con licencia Python que es compatible con GPL, desarrollado en 1991 por el programador holandés Guido van Rossum y creado con la noción de ser un lenguaje fácil de aprender, entre sus características más notables están: una sintaxis sencilla, amplio rango de paquetes y librerías estándar, capacidad de comprensión de código escrito en C y C++, gran variedad de entornos de desarrollo integrado (IDE) multiplataforma (Challenger-Pérez et al., 2014, pp. 2–3, 5–8, 10).

2.9.6. OpenCV

Librería de visión por computador de código abierto con licencia BSD, que incluye desde algoritmos clásicos hasta algoritmos de visión artificial y aprendizaje de máquina de última generación, mismos que se usan en la detección y reconocimiento facial, identificación de objetos, seguidor de movimiento, entre más de 2500 algoritmos optimizados; disponible para Windows, Macintosh, Linux y Android, con interfaces para diferentes lenguajes de programación como C++ (nativo), Python, Java y MATLAB (OpenCV, 2021).

2.9.7. Arduino

Plataforma de hardware y software de código abierto, nacida en el Instituto de Diseño de Interacción Ivrea en Italia; herramienta de bajo costo adaptada para programación de simples microcontroladores de 8-bits hasta sistemas embebidos, enfocada a estudiantes y diseñada para prototipado rápido, con un lenguaje de programación basado en Wiring pero puede ser extendido mediante librerías de C++ y con un IDE de programación multiplataforma (Arduino, 2018).

CAPÍTULO III

3. Diseño y selección de componentes

El capítulo detalla el diseño de una cabeza animatrónica para facilitar la comunicación de niños y niñas con TEA. Se inicia por explicar la metodología de diseño a seguir, después se indican los requerimientos del sistema, el planteamiento de especificaciones y la arquitectura del sistema. Se prosigue con la generación y selección de conceptos y, finalmente, se concreta un diseño final de la cabeza animatrónica para su posterior construcción.

3.1. Metodología

La metodología de diseño considerada para este trabajo de titulación se basa en el proceso genérico de desarrollo de un producto, que mediante una formulación estructurada es capaz de describir los requerimientos del sistema, la generación de alternativas, la arquitectura del sistema, las especificaciones, y finalmente, las pruebas y refinamiento, a fin de obtener un diseño que satisfaga las necesidades del usuario.

3.2. Requerimientos del Sistema

Antes de definir las necesidades del usuario, primero es importante reiterar que cada individuo con TEA tiene un comportamiento propio, así como también una forma propia de identificar y manifestar sus emociones y que, a pesar de encontrarse en cualquiera de los tres niveles de gravedad, sus capacidades y deficiencias también llegan a ser únicas.

3.2.1. Identificación de Necesidades

Conocido también como voz del usuario, es una parte fundamental dentro del diseño y corresponde a la fase de desarrollo del concepto. Se enfoca en agrupar todas las demandas del usuario, sin diferenciar entre deseos o necesidades como se observa en la Tabla 6, mismas que luego serán traducidas en términos de las métricas del sistema y pueden ser de tres tipos:

básicas (B) consideradas obvias, unidimensionales (U) que aumentan la satisfacción, y estimulantes (E) que complacen al usuario, pero su ausencia no genera insatisfacción.

Tabla 6

Necesidades del Usuario

N.	Demandas	Tipo
1	El robot debe hacer expresiones faciales de fácil comprensión.	B
2	El robot debe hablar, pero no muy rápido.	U
3	El robot debe enfocarse en la educación y brindar refuerzos positivos.	U
4	El robot debe ser seguro para niños.	U
5	El robot debe ser interactivo con los niños.	U
6	El robot debe tener una apariencia amigable y atractiva para los niños.	B
7	El robot debe realizar movimientos controlados o no bruscos.	B
8	El robot no debe ser ruidoso ni sobre estimulante.	B
9	El robot debe tener un comportamiento repetitivo.	U
10	El robot debe ser sencillo de controlar o manejar.	E
11	El robot debe permitir realizar nuevos movimientos con facilidad.	U
12	El robot debe reconocer y seguir un rostro.	B
13	El robot debe ser liviano y compacto.	E
14	El robot no debe tener un alto costo.	U

3.2.2. Métricas

También conocidas como la voz del ingeniero, son aquellas características técnicas de diseño que aseguran que el sistema satisface las necesidades del usuario, mismas que deben poder medirse o cuantificarse. En la Tabla 7 se muestra el listado de métricas del sistema.

Tabla 7

Características Técnicas del Sistema

N.	Métricas	Unidades
1	Dimensiones	Milímetros (mm)
2	Masa total	Kilogramos (kg)
3	Nivel de ruido	Decibelios (dB)
4	Movimiento del robot	Grados de libertad (GDL)
5	Sintetizador de voz	Palabras por minuto
6	Diseño de interfaz	Subjetivo
7	Diseño de mecanismos	Subjetivo
8	Diseño estético	Subjetivo

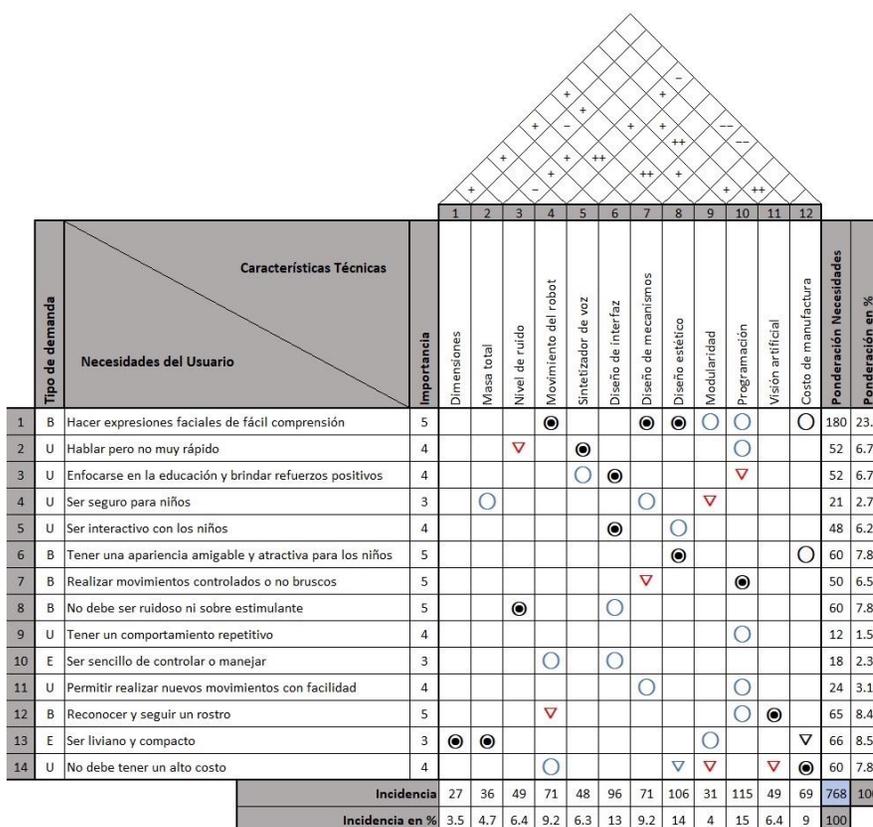
N.	Métricas	Unidades
9	Modularidad	Número de partes
10	Programación	Subjetivo
11	Visión artificial	Cuadros por segundo (fps)
12	Costo de manufactura	Dólares (US \$)

3.2.3. Matriz Necesidades-Métricas

En la Figura 17 se presenta la matriz QFD o casa de la calidad para el presente trabajo de titulación, donde se introducen las necesidades del usuario con sus valores de importancia correspondientes y las características técnicas; además se exponen las correlaciones entre las métricas propuestas, estableciendo así los compromisos técnicos a cumplir.

Figura 17

Casa de la Calidad del Proyecto



En la Tabla 8 y Tabla 9 se observa la simbología de correlación. La Tabla 10 precisa los resultados de las métricas, ordenados de mayor a menor según su valor de incidencia.

Tabla 8

Simbología de Correlación entre Necesidades del Usuario y Métricas

Símbolo	Factor de incidencia	Valor numérico
●	Fuerte	9
○	Medio	3
▽	Bajo	1
	Nulo	0

Tabla 9

Simbología de Correlación entre Métricas

Símbolo	Tipo de correlación
++	Muy positiva
+	Positiva
-	Negativa
--	Muy negativa
	No correlacionada

Tabla 10

Resultados Obtenidos de la Casa de la Calidad

Orden	Métrica	Porcentaje de Incidencia
1	Programación	15
2	Diseño estético	14
3	Diseño de interfaz	13
4	Diseño de mecanismos	9.2
5	Movimiento del robot	9.2
6	Costo de manufactura	9
7	Visión artificial	6.4
8	Nivel de ruido	6.4
9	Sintetizador de voz	6.3
10	Masa total	4.7
11	Modularidad	4
12	Dimensiones	3.5

Los puntos más importantes para el diseño en relación a los requerimientos del usuario son la programación, el diseño estético, el diseño de interfaz y de mecanismos. De importancia media se considera el movimiento del robot, el costo de manufactura, la visión artificial y el nivel de ruido. Los aspectos como el sintetizador de voz, la masa total, la modularidad y las dimensiones son de importancia baja para el diseño.

3.3. Planteamiento de Especificaciones

En la Tabla 11 se detallan las especificaciones generales del sistema, donde se indican los parámetros de diseño con los que debe cumplir el proyecto para satisfacer al usuario y con sus respectivos resultados.

Tabla 11

Especificaciones Generales del Sistema

N.	Parámetro	Especificación
1	Lenguaje de comunicación	Español
2	Grados de libertad	Mínimo 10
3	Costo de manufactura	Máximo \$300
4	Velocidad del sistema de visión	Mínimo 20 fps
5	Volumen de voz	Máximo de 70 dB
6	Velocidad de habla	Entre 100 a 150 ppm
7	Masa total	Máximo 5 kg
8	Arquitectura	Modular, mínimo 3
9	Dimensiones	Máximo 60x60x60 cm

Antes de plantear la arquitectura del sistema, es importante aclarar algunos puntos de la descripción resumida del proyecto; primero, como producto de la investigación, es posible determinar que el diseño estético de la cabeza animatrónica no está condicionado por el valle de incertidumbre, no obstante, este debe tener un aspecto amigable para los niños. Después, se precisa la combinación del sistema de visión artificial con el de percepción sensorial para formar un solo sistema, dividido en: visión, a cargo de la detección y el reconocimiento facial, dejando

sin efecto a la identificación de expresiones para reducir la complejidad de implementación del sistema; tacto, para que el robot detecte y reaccione ante estímulos medidos por un sensor de presión colocado en la estructura del robot, sin discriminar si son fuertes o delicados; y el habla, capacidad proporcionada mediante un parlante para impartir avisos e instrucciones básicas. Además, para evitar ambigüedad entre las emociones de asco y desprecio, el robot utiliza el concepto propuesto por el Dr. Ekman, que precisa la existencia de seis emociones universales, siendo estas: la felicidad, la ira, la tristeza, el asco, la sorpresa y el miedo.

3.4. Arquitectura del Sistema

Para la composición del sistema se valora el esquema modular como se muestra en la Tabla 12, el cual presenta los módulos y submódulos del proyecto con sus respectivas funciones.

Tabla 12

Arquitectura Modular del Proyecto

N.	Módulo	Submódulo	Funciones
1	Estructura	Estética Fabricación Material del rostro	Especificar materiales que garanticen una adecuada funcionalidad y la concreta aceptación del usuario.
2	Movimiento	Mecanismo ojos Mecanismo boca Mecanismo cuello	Brindar la movilidad necesaria para completar las acciones con las que se emiten las expresiones faciales.
3	Eléctrica y Electrónica	Actuadores Tarjeta de control Suministro de energía	Coordinar el movimiento adecuado de los actuadores y las funciones del robot.
4	Visión Artificial	Software de programación Cámara Detección facial Reconocimiento facial	Asegurar la detección de un rostro y concreta su reconocimiento.
5	Interacción	Aplicación Comunicación por voz	Gestionar el vínculo entre el usuario y la cabeza animatrónica.

3.5. Generación y Selección de Conceptos

Se proponen alternativas de solución con características diferentes para cada uno de los módulos del proyecto con sus respectivos submódulos, y se establecen criterios para evaluar y seleccionar las alternativas con mayor ponderación, dicha evaluación toma valores numéricos de 1, 0.5 y 0 como pesos de mayor a menor relevancia respectivamente para cada criterio.

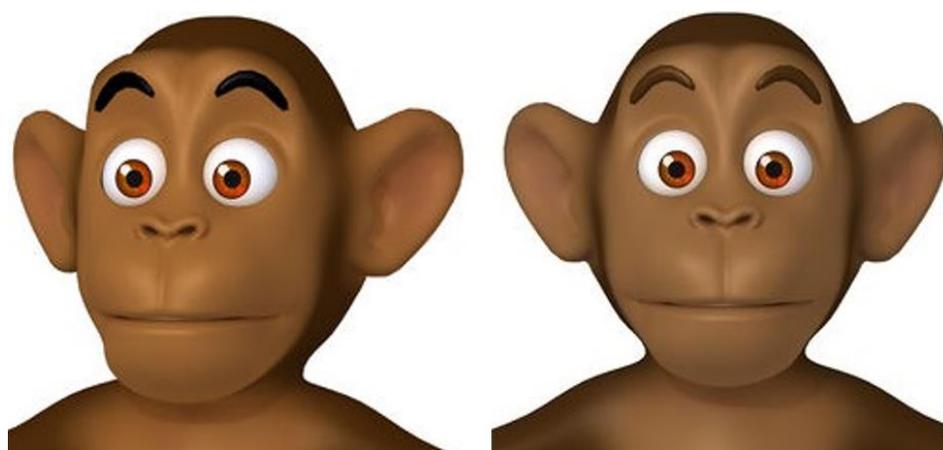
3.6. Módulo 1: Estructura

3.6.1. Estética

Este submódulo se refiere al aspecto estético que debe tener el robot a fin de ser atractivo para los niños y niñas con TEA; considerando lo que Feng et al. (2018) afirman, los niños con un desarrollo típico prefieren más a personajes con rostros caricaturescos, mientras que los niños con TEA no muestran alguna preferencia al tipo de rostro, pero los personajes de caricatura pueden exagerar más las señales sociales y disminuir la ansiedad en la interacción con niños dentro del espectro (p. 11). En la Figura 18 se muestra un modelo de ejemplo de un mono con facciones o rasgos caricaturescos.

Figura 18

Modelo de Ejemplo para el Aspecto Estético



Nota. Adaptado de *Monkey modelo 3D* [Gráfico], por Cartoon3DModels, 2020, Free3D.

3.6.2. Fabricación

Hace referencia al tipo de tecnología de fabricación para la estructura de soporte y los mecanismos del robot, para ello se consideran tres alternativas, siendo estas (A) impresión 3D, (B) mecanizado CNC y (C) moldeo por fundición. En la Tabla 13 se presentan los criterios de valoración con los que deben cumplir dichas soluciones, siendo: (a) costo, el proyecto debe ser económico; (b) disponibilidad, el proceso de fabricación debe ser accesible; y (c) tiempo, el tiempo de fabricación debe ser corto.

Tabla 13

Ponderación de Criterios del Submódulo Fabricación

Criterio	Costo	Disponibilidad	Tiempo	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Costo > Disponibilidad = Tiempo</i>				
Costo	-	1	1	3	0.50
Disponibilidad	0	-	0.5	1.5	0.25
Tiempo	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

La Tabla 14 presenta la ponderación de las soluciones para cada uno de los criterios.

Tabla 14

Ponderación de Soluciones del Submódulo Fabricación

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución B = Solución C</i>				
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	0.5	1.5	0.25
Solución C	0	0.5	-	1.5	0.25
			Total	6	1
Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución B > Solución C</i>				
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1

Tiempo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución C = Solución A > Solución B					
Solución A	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución B	0	-	0	1	0.16
Solución C	0.5	1	-	2.5	0.42
Total				6	1

En la Tabla 15 se muestran los resultados de la selección del submódulo de fabricación, mismos que se formulan del producto entre las ponderaciones de cada solución con el peso del respectivo criterio de selección; así, es posible determinar a la solución A (impresión 3D) como la tecnología de fabricación que mejor se ajusta al proyecto, la conclusión se da principalmente por los términos de costo y disponibilidad. La solución C se sitúa en segundo lugar de prioridad seguida de cerca por la solución B.

Tabla 15

Conclusión de la Selección del Submódulo Fabricación

Conclusión	Costo	Disponibilidad	Tiempo	Σ	Prioridad
Solución A	0.50*0.50	0.50*0.25	0.42*0.25	0.48	1
Solución B	0.25*0.50	0.33*0.25	0.16*0.25	0.25	3
Solución C	0.25*0.50	0.17*0.25	0.42*0.25	0.27	2

3.6.3. Material del Rostro

Este submódulo detalla el tipo de material para la piel de la cabeza animatrónica, misma que también sirve de cubierta tanto para la estructura de soporte como para los mecanismos del robot; para ello se estiman como posibles soluciones a las siguientes alternativas: (A) látex, (B) caucho de silicona y (C) sólido por impresión 3D. La Tabla 16 muestra la ponderación de criterios para el presente submódulo; dichos criterios son (a) costo por kg, (b) flexibilidad del material, (c) resistencia del material y (d) disponibilidad.

Tabla 16*Ponderación de Criterios del Submódulo Material del Rostro*

Criterio	Costo	Flexibilidad	Resistencia	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Flexibilidad > Costo > Resistencia = Disponibilidad</i>					
Costo	-	0	1	1	3	0.30
Flexibilidad	1	-	1	1	4	0.40
Resistencia	0	0	-	0.5	1.5	0.15
Disponibilidad	0	0	0.5	-	1.5	0.15
				Suma	10	1

La Tabla 17 presenta la ponderación de las soluciones para cada uno de los criterios.

Tabla 17*Ponderación de Soluciones del Submódulo Material del Rostro*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución B > Solución C</i>				
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1

Flexibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A = Solución B > Solución C</i>				
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	0	0	-	1	0.16
			Total	6	1

Resistencia	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución C > Solución B > Solución A</i>				
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Total	6	1

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución B = Solución C > Solución A</i>				
Solución A	-	0	0	1	0.16
Solución B	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución C	1	0.5	-	2.5	0.42
			Total	6	1

En la Tabla 18 se sintetizan los resultados de selección para el tipo de material con el que se formará la piel de la cabeza animatrónica. Siguiendo el orden de prioridades se tiene que la solución B (caucho de silicona) es la más acertada por sus características de flexibilidad y disponibilidad, seguida por la solución A y finalmente la solución C.

Tabla 18

Conclusión de la Selección del Submódulo Material del Rostro

Conclusión	Costo	Flexibilidad	Resistencia	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0.50*0.30	0.42*0.40	0.17*0.15	0.16*0.15	0.37	2
Solución B	0.33*0.30	0.42*0.40	0.33*0.15	0.42*0.15	0.38	1
Solución C	0.17*0.30	0.16*0.40	0.50*0.15	0.42*0.15	0.25	3

3.7. Módulo 2: Movimiento

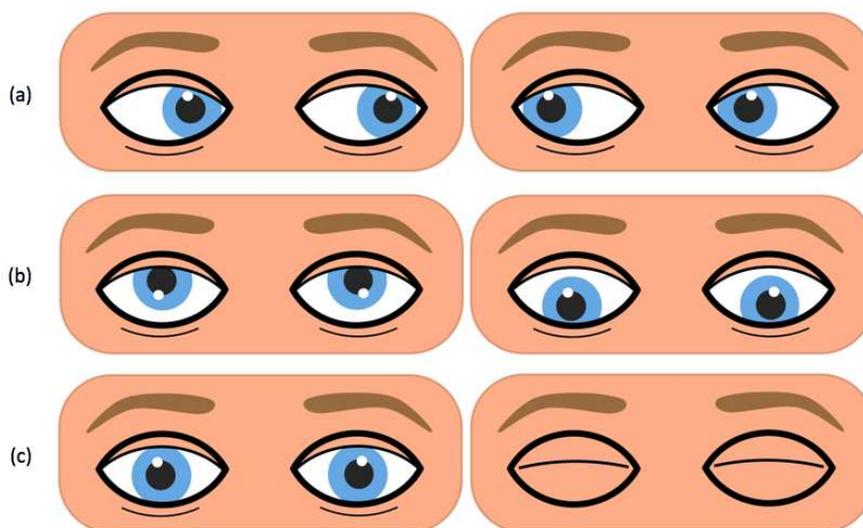
3.7.1. Mecanismo Ojos

El submódulo expone el tipo de movilidad que debe ocurrir en la región de los ojos, conformada por el globo ocular y los párpados de cada ojo, para expresar las emociones correctamente. Las alternativas de diseño son (A) movimiento independiente de los ojos y de cada párpado por separado, (B) movimiento paralelo de ojos e independiente de párpados y (C) movimiento paralelo de ojos y párpados. Adicionalmente, se considera que el movimiento del globo ocular, representado por la pupila, es el subir, bajar e ir de izquierda a derecha; mientras que los párpados, superior e inferior, deben abrir y cerrar los ojos, dichos movimientos son mostrados en la Figura 19.

El área de las cejas queda excluida de las alternativas de solución, pero se considera un movimiento de cejas ascendente y descendente, siendo este accionado mediante acople directo al actuador.

Figura 19

Rango de Movimientos para el Mecanismo de los Ojos



Nota. (a) Muestra el movimiento de la pupila de derecha a izquierda; (b) movimiento de la pupila de arriba hacia abajo; y (c) presenta el abrir y cerrar de los párpados.

Los criterios de valoración para las alternativas, anteriormente estimadas, se presentan con su ponderación en la Tabla 19; siendo estos (a) el bajo costo, (b) el tamaño reducido, (c) los grados de libertad y (d) la facilidad de elaboración.

Tabla 19

Ponderación de Criterios del Submódulo Mecanismo Ojos

Criterio	Costo	Tamaño	GDL	Elaboración	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Costo > GDL > Tamaño > Elaboración</i>					
Costo	-	1	1	1	4	0.40
Tamaño	0	-	0	1	2	0.20
GDL	0	1	-	1	3	0.30
Elaboración	0	0	0	-	1	0.10
	Suma				10	1

La Tabla 20 presenta la ponderación entre las soluciones de diseño para el mecanismo de los ojos con cada criterio.

Tabla 20*Ponderación de Soluciones del Submódulo Mecanismo Ojos*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución C > Solución B > Solución A					
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
Total				6	1
Tamaño	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución B = Solución C > Solución A					
Solución A	-	0	0	1	0.16
Solución B	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución C	1	0.5	-	2.5	0.42
Total				6	1
GDL	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A > Solución B > Solución C					
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
Total				6	1
Elaboración	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución B = Solución C > Solución A					
Solución A	-	0	0	1	0.16
Solución B	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución C	1	0.5	-	2.5	0.42
Total				6	1

La Tabla 21 muestra los resultados de selección para el submódulo, donde la solución C (movimiento paralelo de ojos y párpados) está mejor posicionada en el orden de prioridad por su menor costo de elaboración, después se encuentra la solución B y finalmente la solución A.

Tabla 21*Conclusión de la Selección del Submódulo Mecanismo Ojos*

Conclusión	Costo	Tamaño	GDL	Elaboración	Σ	Prioridad
Solución A	0.17*0.40	0.16*0.20	0.50*0.30	0.16*0.10	0.26	3
Solución B	0.33*0.40	0.42*0.20	0.33*0.30	0.42*0.10	0.36	2
Solución C	0.50*0.40	0.42*0.20	0.17*0.30	0.42*0.10	0.38	1

3.7.2. Mecanismo Boca

Submódulo que describe los movimientos de apertura y cierre de la boca, compuesta de una parte superior fija y una inferior móvil. Las alternativas de solución para este mecanismo son (A) simple, con un actuador que manipule la parte móvil; (B) simple con acople de labios por alambre y (C) simple con sincronización de labios rígidos. Los criterios de selección a considerar, mostrados en la Tabla 22, son los siguientes: (a) nivel de expresividad, (b) bajo costo y (c) facilidad de elaboración.

Tabla 22

Ponderación de Criterios del Submódulo Mecanismo Boca

Criterio	Expresividad	Costo	Elaboración	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Expresividad > Costo > Elaboración</i>				
Expresividad	-	1	1	3	0.50
Costo	0	-	1	2	0.33
Elaboración	0	0	-	1	0.17
			Suma	6	1

Las posibles soluciones para el submódulo de mecanismo de la boca, sus relaciones y respectivas ponderaciones se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Ponderación de Soluciones del Submódulo Mecanismo Boca

Expresividad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución C > Solución B > Solución A</i>				
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
			Total	6	1
Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución B > Solución C</i>				
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1

Elaboración	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	Solución A = Solución B > Solución C				
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	0	0	-	1	0.16
			Total	6	1

La Tabla 24 detalla los resultados para las alternativas, siendo la solución B (simple con acople de labios por alambre) la más idónea, principalmente por mostrar un adecuado nivel de expresividad, un bajo costo y facilidad de elaboración, por delante de la solución C y A.

Tabla 24

Conclusión de la Selección del Submódulo Mecanismo Boca

Conclusión	Expresividad	Costo	Elaboración	Σ	Prioridad
Solución A	0.17*0.50	0.50*0.33	0.42*0.17	0.32	3
Solución B	0.33*0.50	0.33*0.33	0.42*0.17	0.35	1
Solución C	0.50*0.50	0.17*0.33	0.16*0.17	0.33	2

3.7.3. Mecanismo Cuello

Para el movimiento del cuello del robot se estiman las siguientes alternativas: (A) fijo, sujeto a una base estática; (B) con movimientos de rotación, inclinación, extensión y flexión; y (C) solo con movimientos de rotación, extensión y flexión. La Tabla 25 pondera los criterios de selección, siendo estos: (a) bajo costo, (b) grados de libertad y (c) facilidad de implementación.

Tabla 25

Ponderación de Criterios del Submódulo Mecanismo Cuello

Criterio	Costo	GDL	Implementación	$\Sigma+1$	Ponderación
	GDL > Costo = Implementación				
Costo	-	0	0.5	1.5	0.25
GDL	1	-	1	3	0.50
Implementación	0.5	0	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

En la Tabla 26 se aprecia la ponderación de los criterios para las diferentes alternativas del mecanismo del cuello.

Tabla 26

Ponderación de Soluciones del Submódulo Mecanismo Cuello

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A > Solución C > Solución B					
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	0	1	0.17
Solución C	0	1	-	2	0.33
Total				6	1
GDL	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución B > Solución C > Solución A					
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	1	0	-	2	0.33
Total				6	1
Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A = Solución C > Solución B					
Solución A	-	1	0.5	2.5	0.42
Solución B	0	-	0	1	0.16
Solución C	0.5	1	-	2.5	0.42
Total				6	1

Los resultados de selección de mecanismo para el cuello se exponen en la Tabla 27, la misma que muestra que la solución C (solo con movimientos de rotación, extensión y flexión) es la más relevante por la relación de costo razonable y facilidad de implementación; seguida se posiciona la solución B y como última alternativa la solución A.

Tabla 27

Conclusión de la Selección del Submódulo Mecanismo Cuello

Conclusión	Costo	GDL	Implementación	Σ	Prioridad
Solución A	0.50*0.25	0.17*0.50	0.42*0.25	0.32	3
Solución B	0.17*0.25	0.50*0.50	0.16*0.25	0.33	2
Solución C	0.33*0.25	0.33*0.50	0.42*0.25	0.35	1

3.8. Módulo 3: Eléctrica y Electrónica

3.8.1. Actuadores

El submódulo trata sobre los componentes encargados de generar el movimiento de los mecanismos en la cabeza animatrónica, para el presente trabajo de titulación se valoran las siguientes alternativas: (A) servomotor, (B) motor de corriente continua y (C) motor paso a paso. En la Tabla 28 se desglosan las ponderaciones de los criterios de evaluación, los cuales son: (a) costo, (b) control, (c) tamaño y (d) precisión.

Tabla 28

Ponderación de Criterios del Submódulo Actuadores

Criterio	Costo	Control	Tamaño	Precisión	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Control > Costo > Precisión > Tamaño</i>					
Costo	-	0	1	1	3	0.30
Control	1	-	1	1	4	0.40
Tamaño	0	0	-	0	1	0.10
Precisión	0	0	1	-	2	0.20
				Suma	10	1

La Tabla 29 presenta la ponderación para cada solución en relación al criterio planteado.

Tabla 29

Ponderación de Soluciones del Submódulo Actuadores

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución B > Solución A > Solución C</i>				
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1
Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución B > Solución C</i>				
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1

Tamaño	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución B > Solución A > Solución C					
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0	0	-	1	0.17
Total				6	1

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	Σ+1	Ponderación
Solución A > Solución C > Solución B					
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	0	1	0.17
Solución C	0	1	-	2	0.33
Total				6	1

En la Tabla 30 se aprecian los resultados de selección, la misma indica que el tipo de actuador más conveniente es la solución A (servomotor) liderando por su control y precisión, seguido por la solución B por su costo y tamaño, en último lugar se tiene a la solución C.

Tabla 30

Conclusión de la Selección del Submódulo Actuadores

Conclusión	Costo	Control	Tamaño	Precisión	Σ	Prioridad
Solución A	0.33*0.30	0.50*0.40	0.33*0.10	0.50*0.20	0.43	1
Solución B	0.50*0.30	0.33*0.40	0.50*0.10	0.17*0.20	0.37	2
Solución C	0.17*0.30	0.17*0.40	0.17*0.10	0.33*0.20	0.20	3

3.8.2. Tarjeta de Control

Debido a que en el submódulo de actuadores se estima a los servomotores como mejor candidato, se requiere que la tarjeta de control se enfoque en estos, por ello se valoran las siguientes alternativas: (A) plataforma de desarrollo Arduino con módulo PCA9685, driver para controlar hasta 16 servomotores por PWM; (B) Mini Maestro 18 por Pololu; y (C) tarjeta SSC-32 por Lynxmotion, que permite controlar hasta 32 servomotores. Los criterios mostrados en la Tabla 31 son (a) disponibilidad, (b) velocidad de operación, (c) costo y (d) cantidad de servomotores capaz de controlar.

Tabla 31*Ponderación de Criterios del Submódulo Tarjeta de Control*

Criterio	Disponibilidad	Velocidad	Costo	Cantidad	$\Sigma+1$	Ponderación
<i>Costo > Disponibilidad > Velocidad = Cantidad</i>						
Disponibilidad	-	1	0	1	3	0.30
Velocidad	0	-	0	0.5	1.5	0.15
Costo	1	1	-	1	4	0.40
Cantidad	0	0.5	0	-	1.5	0.15
Suma					10	1

La Tabla 32 muestra la ponderación de soluciones con criterios de la tarjeta de control.

Tabla 32*Ponderación de Soluciones del Submódulo Tarjeta de Control*

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
<i>Solución A > Solución C > Solución B</i>					
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	0	1	0.17
Solución C	0	1	-	2	0.33
Total				6	1
Velocidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
<i>Solución C > Solución B > Solución A</i>					
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
Total				6	1
Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
<i>Solución A > Solución B > Solución C</i>					
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	1	2	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.17
Total				6	1
Cantidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
<i>Solución C > Solución B > Solución A</i>					
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	0	2	0.33
Solución C	1	1	-	3	0.50
Total				6	1

La Tabla 33 presenta los resultados de la selección, detallando a la solución A (Arduino con módulo PCA9685) como la mejor posicionada para el control de los servomotores por su bajo costo y alta disponibilidad, seguido en prioridad por la solución C y después la solución B.

Tabla 33

Conclusión de la Selección del Submódulo Tarjeta de Control

Conclusión	Disponibilidad	Velocidad	Costo	Cantidad	Σ	Prioridad
Solución A	0.50*0.30	0.17*0.15	0.50*0.40	0.17*0.15	0.40	1
Solución B	0.17*0.30	0.33*0.15	0.33*0.40	0.33*0.15	0.28	3
Solución C	0.33*0.30	0.50*0.15	0.17*0.40	0.50*0.15	0.32	2

3.8.3. Suministro de Energía

Para establecer el suministro de energía para el robot y sus componentes debe considerarse las anteriores alternativas de diseño, siendo los servomotores los actuadores selectos y la placa Arduino con PCA9685 para el control de los mismos. Así, el consumo depende mayormente del número de actuadores y del par al que se sometan, por ello se estiman las siguientes como posibles soluciones: (A) fuente de poder y (B) baterías. La Tabla 34 presenta a los criterios de valoración: (a) durabilidad, (b) costo, (c) capacidad de corriente y (d) tamaño.

Tabla 34

Ponderación de Criterios del Submódulo Suministro de Energía

Criterio	Durabilidad	Costo	Capacidad	Tamaño	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Durabilidad = Costo > Capacidad > Tamaño</i>					
Durabilidad	-	0.5	1	1	3.5	0.35
Costo	0.5	-	1	1	3.5	0.35
Capacidad	0	0	-	1	2	0.20
Tamaño	0	0	0	-	1	0.10
				Suma	10	1

La Tabla 35 muestra la comparación entre las posibles soluciones para el suministro energía en relación a los criterios presentados.

Tabla 35*Ponderación de Soluciones del Submódulo Suministro de Energía*

Durabilidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A > Solución B				
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
Total			3	1
Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución B > Solución A				
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
Total			3	1
Capacidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A > Solución B				
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
Total			3	1
Tamaño	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución B > Solución A				
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
Total			3	1

En la Tabla 36 se presentan los resultados para el submódulo de suministro de energía, la cual indica, por orden de prioridad, que la solución A (fuente de poder) es la alternativa que mejor se ajusta a los parámetros de diseño planteados, ya que muestra una adecuada capacidad de corriente, siendo capaz de proporcionar energía inclusive si se llegan a activar todos los actuadores y por su durabilidad, seguida se tiene a la solución B.

Tabla 36*Conclusión de la Selección del Submódulo Suministro de Energía*

Conclusión	Durabilidad	Costo	Capacidad	Tamaño	Σ	Prioridad
Solución A	0.67*0.35	0.33*0.35	0.67*0.20	0.33*0.10	0.52	1
Solución B	0.33*0.35	0.67*0.35	0.33*0.20	0.67*0.10	0.48	2

3.9. Módulo 4: Visión Artificial

3.9.1. Software de Programación

Este submódulo aborda el lenguaje de programación para las funciones de la cabeza animatrónica, principalmente se considera para el control de los actuadores y demás elementos de la parte electrónica; la programación es un punto de vital importancia al momento de proyectar las distintas expresiones faciales ya que genera y coordina los movimientos del robot, por esta razón se aprecian las siguientes posibilidades: (A) C++ y (B) Python.

La Tabla 37 exhibe las ponderaciones de los criterios de valoración, que son: (a) menor nivel de complejidad en la sintaxis, (b) flexibilidad y (c) rendimiento en términos de velocidad de ejecución y costo computacional.

Tabla 37

Ponderación de Criterios del Submódulo Software de Programación

Criterio	Complejidad	Flexibilidad	Rendimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Complejidad > Flexibilidad = Rendimiento</i>				
Complejidad	-	1	1	3	0.50
Flexibilidad	0	-	0.5	1.5	0.25
Rendimiento	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

En la Tabla 38 se presenta la ponderación de los diferentes criterios estimados para la selección del software de programación.

Tabla 38

Ponderación de Soluciones del Submódulo Software de Programación

Complejidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución B > Solución A</i>			
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
			Total	3
				1

Flexibilidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
	Solución B > Solución A			
Solución A	-	0	1	0.33
Solución B	1	-	2	0.67
	Total		3	1

Rendimiento	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
	Solución A > Solución B			
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
	Total		3	1

Los resultados de selección para la selección del software de programación se exponen en la Tabla 39, donde se muestra que la solución B (Python) tiene la mejor puntuación en el orden de prioridad, esto dado por su facilidad de escritura y lectura, además de ser flexible y poder ejecutarse en los diferentes sistemas operativos; aunque con un mejor rendimiento, la solución A se coloca como la siguiente alternativa.

Tabla 39

Conclusión de la Selección del Submódulo Software de Programación

Conclusión	Complejidad	Flexibilidad	Rendimiento	Σ	Prioridad
Solución A	0.33*0.50	0.33*0.25	0.67*0.25	0.42	2
Solución B	0.67*0.50	0.67*0.25	0.33*0.25	0.58	1

3.9.2. Cámara

El presente submódulo expone al dispositivo que actúa como la vista de la cabeza animatrónica, por esta razón se debe asegurar que el dispositivo sea capaz de dar una imagen clara a una velocidad adecuada, entre las posibles alternativas de solución se consideran: (A) Logitech C920, (B) Arducam IMX291, (C) Pixy2.

Los criterios de selección a contemplarse son: (a) bajo costo, (b) resolución, (c) ángulo de visión y (d) tamaño, mismos que se sintetizan en la Tabla 40.

Tabla 40*Ponderación de Criterios del Submódulo Cámara*

Criterio	Costo	Resolución	Ángulo	Tamaño	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Costo > Resolución = Ángulo > Tamaño</i>					
Costo	-	1	1	1	4	0.40
Resolución	0	-	0.5	1	2.5	0.25
Ángulo	0	0.5	-	1	2.5	0.25
Tamaño	0	0	0	-	1	0.10
				Suma	10	1

La Tabla 41 detalla el cotejo entre las posibles soluciones para el submódulo de cámara.

Tabla 41*Ponderación de Soluciones del Submódulo Cámara*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución B > Solución C > Solución A</i>				
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	1	0	-	2	0.33
			Total	6	1

Resolución	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución C > Solución B</i>				
Solución A	-	1	1	3	0.50
Solución B	0	-	0	1	0.17
Solución C	0	1	-	2	0.33
			Total	6	1

Ángulo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución B > Solución A > Solución C</i>				
Solución A	-	0	1	2	0.33
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	0	0	-	1	0.17
			Total	6	1

Tamaño	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución B > Solución C > Solución A</i>				
Solución A	-	0	0	1	0.17
Solución B	1	-	1	3	0.50
Solución C	1	0	-	2	0.33
			Total	6	1

Debido a los resultados de la Tabla 42, se estima que la solución B (Arducam IMX291) es la más adecuada, fundamentalmente por el ángulo de visión que posee y por su costo en el mercado, seguido en el orden de prioridad se tiene igualadas a las soluciones A y C.

Tabla 42

Conclusión de la Selección del Submódulo Cámara

Conclusión	Costo	Resolución	Ángulo	Tamaño	Σ	Prioridad
Solución A	0.17*0.40	0.50*0.25	0.33*0.25	0.17*0.10	0.29	2
Solución B	0.50*0.40	0.17*0.25	0.50*0.25	0.50*0.10	0.42	1
Solución C	0.33*0.40	0.33*0.25	0.17*0.25	0.33*0.10	0.29	3

3.9.3. Detección Facial

El submódulo está destinado a la selección del algoritmo de detección de rostros. Como se menciona en el segundo capítulo, se distinguen tres algoritmos como alternativas principales: (A) Haar-Cascade, (B) HoG y (C) CNN. Considerando como criterios para la selección la facilidad de instalación y la velocidad de desempeño es posible ponderar al método de Haar-Cascade como la alternativa más acertada, esto debido a que presenta un desempeño adecuado con una velocidad regular. Por estas razones, se considera acertado el algoritmo de Haar-Cascade para la etapa de detección, misma que tiene una función relativamente sencilla, analizar el entorno dado por la cámara e identificar si están o no rostros presentes. Cabe mencionar que OpenCV incluye diferentes tipos de algoritmos pre entrenados para detectar rostros, ojos y boca; en este caso se usa como alternativa al "haarcascade_frontalface_alt2.xml".

3.9.4. Reconocimiento Facial

Submódulo de visión artificial enfocado en el proceso reconocimiento facial de usuarios, el cual permite predecir si un rostro mostrado por cámara es conocido o no. Dicha tarea puede ser solucionada mediante herramientas de OpenCV como Eigenfaces, Fisherfaces, LBPH, pero un

inconveniente que surge estos es que, para formar la base de datos, requieren capturar varias veces el rostro del usuario en distintas posiciones para un adecuado reconocimiento, y debido que los niños y niñas con TEA podrían no seguir correctamente todas las indicaciones para el tiempo de captura de fotografías, se opta por una alternativa diferente, que requiera de solo una imagen para ofrecer un buen reconocimiento facial y que pueda desarrollarse en el software de programación seleccionado, como lo es la librería “Face Recognition”.

3.10. Módulo 5: Interacción

3.10.1. Aplicación

El submódulo trata sobre la herramienta necesaria para programar una interfaz gráfica por la cual el usuario pueda relacionarse con la cabeza animatrónica; misma que debe ser capaz de presentar distintas actividades de terapia, controlar al robot de forma manual y automática, y ejecutar las funciones de seguimiento, reconocimiento facial del usuario. Considerando que la herramienta debe funcionar con Python, lenguaje de programación seleccionado en el módulo anterior, es posible estimar las siguientes alternativas de solución: (A) PyQt, (B) Tkinter y (C) Kivy. La Tabla 43 muestra los distintos criterios de selección que deben cumplir las alternativas planteadas para el presente submódulo, mismas que son: (a) facilidad de programación, (b) detallada documentación y (c) fluidez con algoritmos de visión artificial.

Tabla 43

Ponderación de Criterios del Submódulo Aplicación

Criterio	Facilidad	Documentación	Fluidez	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Fluidez > Documentación > Facilidad</i>				
Facilidad	-	0	0	1	0.17
Documentación	1	-	0	2	0.33
Fluidez	1	1	-	3	0.50
			Suma	6	1

En la Tabla 44 se aprecia la ponderación de los respectivos criterios para las distintas alternativas para la selección del software de programación de la aplicación.

Tabla 44*Ponderación de Soluciones del Submódulo Aplicación*

Facilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A = Solución B > Solución C					
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	0	0	-	1	0.16
Total				6	1
Documentación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A = Solución B > Solución C					
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.42
Solución C	0	0	-	1	0.16
Total				6	1
Fluidez	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución B = Solución C > Solución A					
Solución A	-	0	0	1	0.16
Solución B	1	-	0.5	2.5	0.42
Solución C	1	0.5	-	2.5	0.42
Total				6	1

Los resultados de selección de herramienta de programación de interfaz gráfica para la aplicación del robot se presentan en la Tabla 45, donde se muestra que la solución B (Tkinter) es la adecuada por tener una detallada documentación y fluidez con los algoritmos de visión artificial; después se tiene un resultado igualado entre la solución A y la solución C.

Tabla 45*Conclusión de la Selección del Submódulo Aplicación*

Conclusión	Facilidad	Documentación	Fluidez	Σ	Prioridad
Solución A	0.42*0.17	0.42*0.33	0.16*0.50	0.29	2 = 3
Solución B	0.42*0.17	0.42*0.33	0.42*0.50	0.42	1
Solución C	0.16*0.17	0.16*0.33	0.42*0.50	0.29	2 = 3

3.10.2. Comunicación por Voz

Submódulo encargado de la selección del dispositivo para simular la capacidad del habla, el mismo que está encargado de emitir sonidos, avisos e instrucciones básicas al usuario mediante un parlante, para reforzar la interacción de los niños y niñas con el proyecto. Las alternativas de solución propuestas son: (A) módulo MP3 DFPlayer mini y (B) módulo ISD 1820. En la Tabla 46 se presentan las ponderaciones para cada uno de los criterios de selección, los cuales son: (a) bajo costo, (b) disponibilidad y (c) diversidad de sonidos.

Tabla 46

Ponderación de Criterios del Submódulo Comunicación por Voz

Criterio	Costo	Disponibilidad	Diversidad	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Costo > Disponibilidad = Diversidad</i>				
Costo	-	1	1	3	0.50
Disponibilidad	0	-	0.5	1.5	0.25
Diversidad	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

La Tabla 47 detalla la ponderación de las soluciones del submódulo de comunicación por voz con sus respectivos criterios.

Tabla 47

Ponderación de Soluciones del Submódulo Comunicación por Voz

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A = Solución B</i>			
Solución A	-	0.5	1.5	0.50
Solución B	0.5	-	1.5	0.50
		Total	3	1
Disponibilidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
	<i>Solución A > Solución B</i>			
Solución A	-	1	2	0.67
Solución B	0	-	1	0.33
		Total	3	1

Diversidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A = Solución B				
Solución A	-	0.5	1.5	0.50
Solución B	0.5	-	1.5	0.50
Total			3	1

La Tabla 48 describe los resultados de la selección de alternativas para la comunicación, mostrando que la solución A (módulo MP3 DFPlayer mini) es la alternativa mejor posicionada en términos de disponibilidad y diversidad de sonidos, seguida por la solución B.

Tabla 48

Conclusión de la Selección del Submódulo Comunicación por Voz

Conclusión	Costo	Disponibilidad	Diversidad	Σ	Prioridad
Solución A	0.50*0.50	0.67*0.25	0.50*0.25	0.54	1
Solución B	0.50*0.50	0.33*0.25	0.50*0.25	0.46	2

3.11. Concepto Final

Continuando con el proceso genérico de desarrollo de producto, se presenta la fase que precisa al concepto final; una vez terminada la generación y selección de conceptos se tiene el diseño de detalle, donde se expone un diseño concreto en las áreas de mecánica, electrónica y sistema de control. Antes de presentar dichos puntos, en la Tabla 49 se resumen las alternativas seleccionadas para cada submódulo.

Tabla 49

Resumen Selección de Conceptos

N.	Módulo	Submódulo	Concepto seleccionado
1	Estructura	Estética	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo con apariencia de mono y con rasgos caricaturesco
		Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> • Impresión 3D
		Material del rostro	<ul style="list-style-type: none"> • Caucho de silicona

N.	Módulo	Submódulo	Concepto seleccionado
2	Movimiento	Mecanismo ojos	• Movimiento paralelo de ojos y párpados
		Mecanismo boca	• Simple con acople de labios por alambre
		Mecanismo cuello	• Movimientos de rotación, extensión y flexión
3	Eléctrica y Electrónica	Actuadores	• Servomotor
		Tarjeta de control	• Arduino con módulo PCA9685
		Suministro de energía	• Fuente de poder
4	Visión Artificial	Software de programación	• Python
		Cámara	• Arducam IMX291
		Detección facial	• Algoritmo Haar-Cascade
		Reconocimiento facial	• Librería Face Recognition
5	Interacción	Aplicación	• Tkinter
		Comunicación por voz	• MP3 DFPlayer mini

3.12. Diseño Mecánico

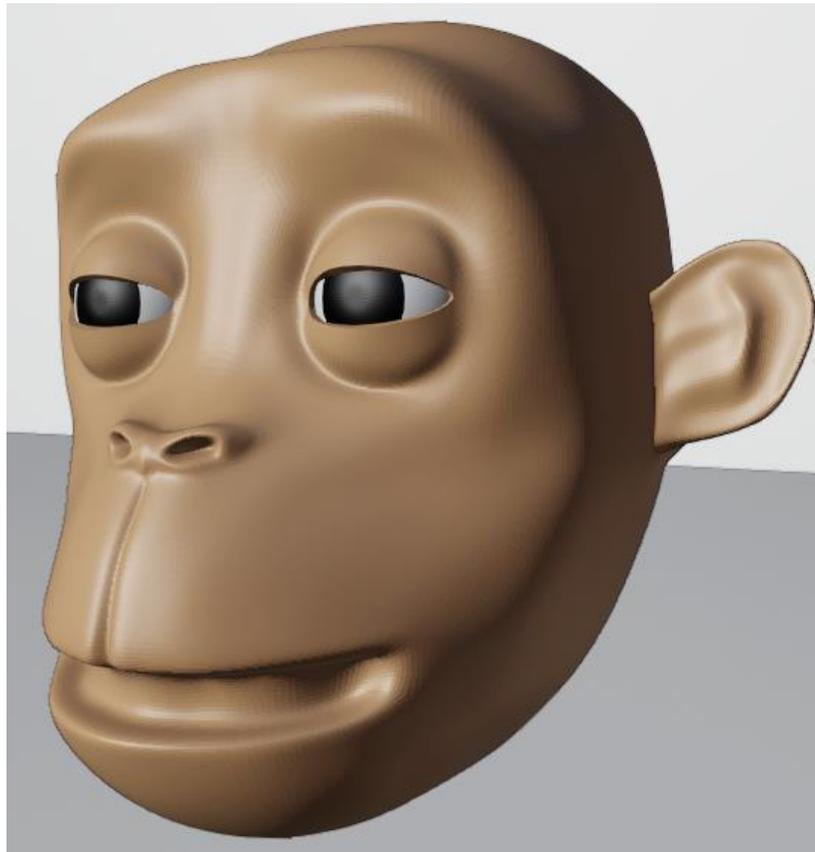
El diseño mecánico está compuesto por dos grupos, el primero, que trata el modelo estético del robot, y el segundo, que contiene el diseño de los mecanismos y la estructura de soporte de la cabeza. El diseño sigue el método de ensayo y error, técnica que permite encontrar una solución a un problema a partir de la prueba de diferentes alternativas, este proceso se aplica tanto para el modelo estético, como para los mecanismos de los ojos, boca, labios y cuello de la cabeza animatrónica.

El modelo estético, presentado en la Figura 20, es un punto fundamental del robot ya que es crucial en la interacción con el usuario, cualquier desacierto en su apariencia podría generar, en un caso extremo, desagrado en los usuarios. Por esto, y debido a que el proyecto está destinado a trabajar con niños y niñas en edad escolar, se opta por un modelo con atributos

caricaturescos y de semblante amigable, lo que facilita la ejecución de gestos faciales. Para el diseño del mismo se utiliza una herramienta especializada en modelado por computador como es el software libre Blender.

Figura 20

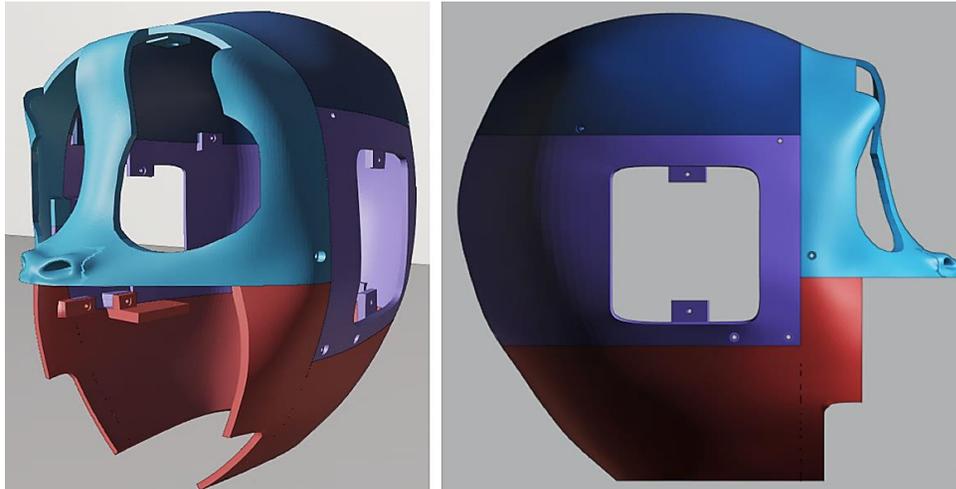
Modelo Estético de la Cabeza Animatrónica



A partir del modelo, es factible generar un armazón que tenga la función de proteger los elementos internos, brindar soporte al pelaje o recubrimiento exterior y, que sirva para sujetar la máscara de silicona al rostro del robot; dicha estructura se muestra en la Figura 21, donde no se consideran las orejas, y con el propósito de facilitar el ensamble final, está dividida en sectores, cada separación con un color diferente para favorecer la visualización, estos son: sector frontal (azul claro), superior (azul oscuro), medio (morado) e inferior (rojo).

Figura 21

Armazón de la Cabeza del Robot Dividida en Sectores

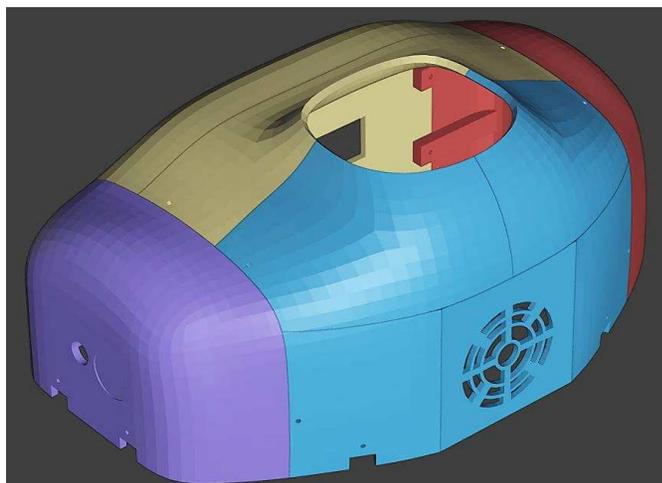


Nota. (Izquierda) Vista libre. (Derecha) Vista lateral de la estructura o armazón de la cabeza.

Posteriormente, se incorpora una estructura externa en forma de torso, mostrada en la Figura 22, la cual se encarga de resguardar el mecanismo del cuello e incorporar al parlante, sensor FSR y potenciómetro. El torso está dividido en cuatro partes, siendo estas: parte frontal del torso (azul claro), posterior (amarillo), hombro derecho (morado) y hombro izquierdo (rojo).

Figura 22

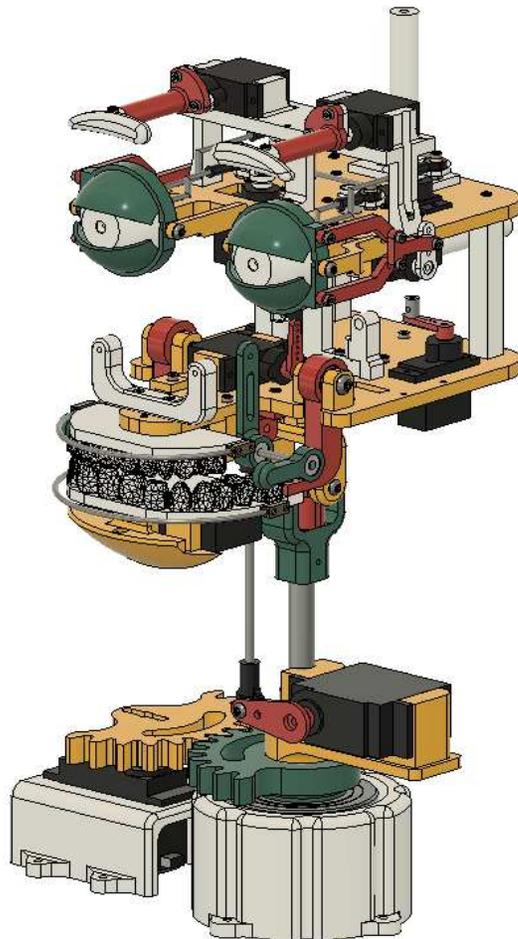
Estructura del Torso Dividida en Sectores



El modelo mecánico, diseñado en el software Fusion 360 y presentado en la Figura 23, detalla el diseño de partes, componentes y mecanismos que forman al robot, mismos que se realizan tomando en cuenta el tamaño interno del armazón de la cabeza y cuello, además de seguir los conceptos seleccionados en el módulo de movimientos.

Figura 23

Modelo Mecánico de la Cabeza Animatrónica

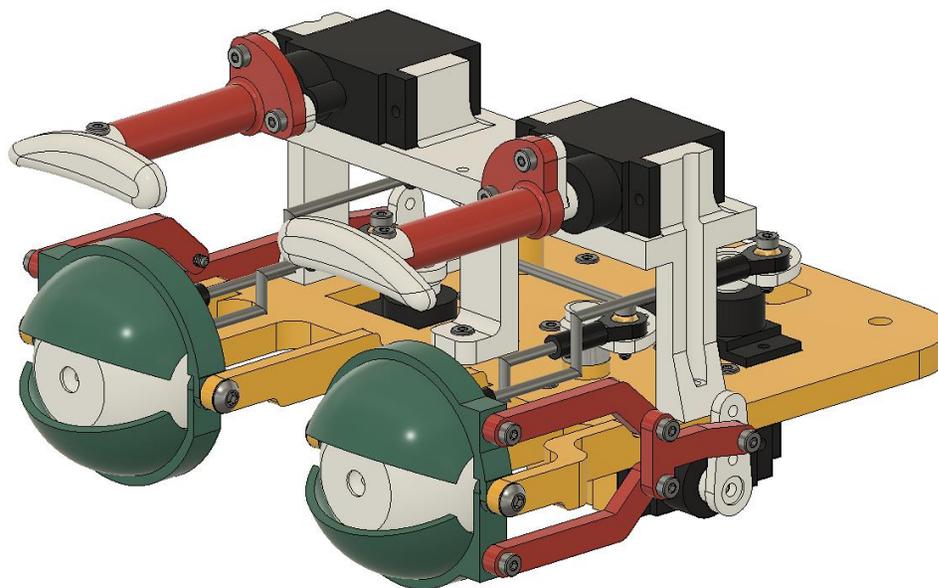


3.12.1. Diseño del Mecanismo de Ojos

El mecanismo de los ojos está compuesto por un sistema que duplica el movimiento de un ojo al otro, con movimiento de párpados y cejas independiente para cada caso; dicho sistema se encuentra sustentado por una estructura base como se aprecia en la Figura 24.

Figura 24

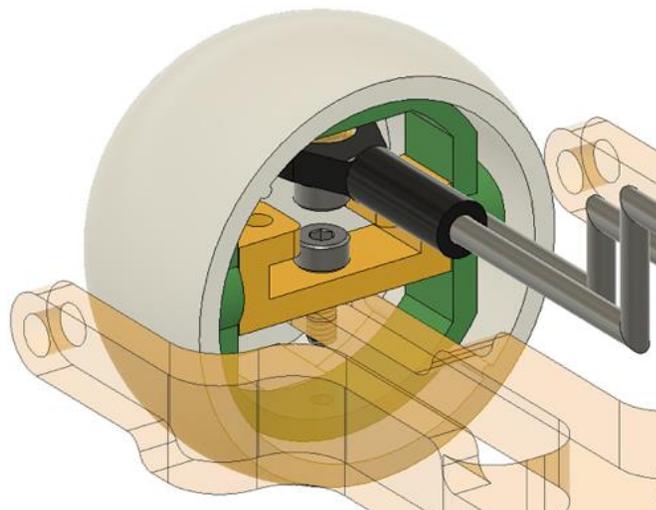
Vista Independiente del Mecanismo de Ojos



La Figura 25 presenta la composición interna del mecanismo de cada ojo, mismo que considera un diámetro de 32 mm para los globos oculares del robot y una distancia entre ojo y ojo de 70 mm.

Figura 25

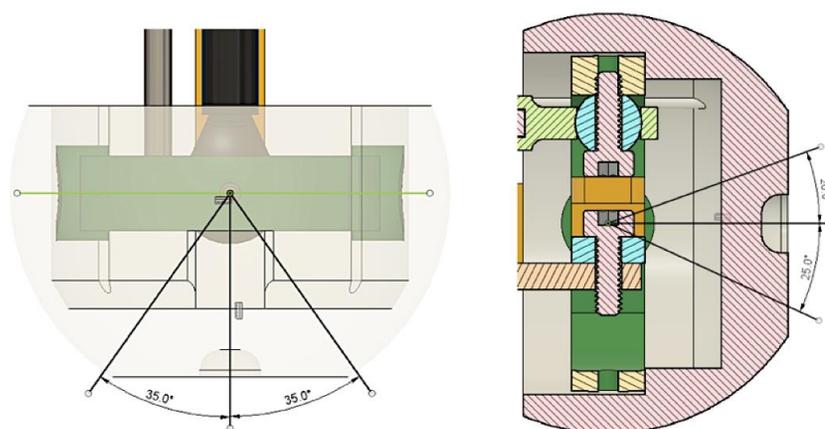
Composición Interna del Globo Ocular



En la Figura 26 se muestran los límites de rotación de los globos oculares con respecto al eje vertical y horizontal; tomando a la pupila como referencia, estos son capaces de rotar ± 35 grados en el eje vertical, con una movilidad total de 45 grados en dirección horizontal.

Figura 26

Límites de Movilidad del Globo Ocular

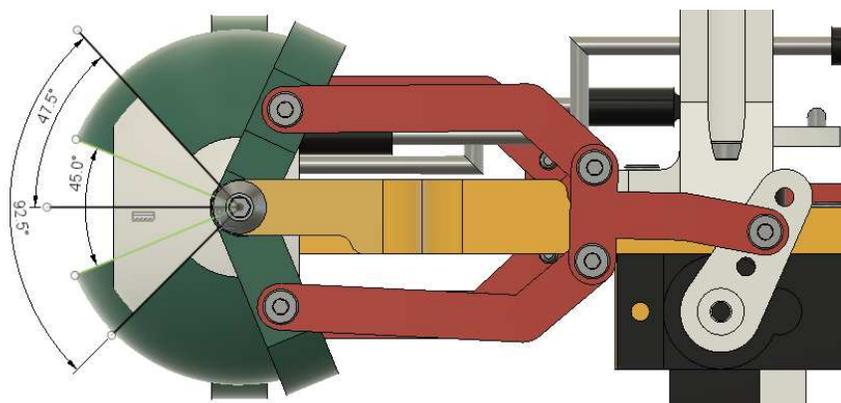


Nota. (Izquierda) Vista superior del rango vertical. (Derecha) Vista lateral del rango horizontal.

Los párpados, superior e inferior, son capaces de replicar la acción de parpadear, esto lo hacen al rotar 92.5 grados entre ellos y al cerrarse completamente; en estado de reposo estos tienen un desplazamiento angular de 45 grados, como se observa en la Figura 27.

Figura 27

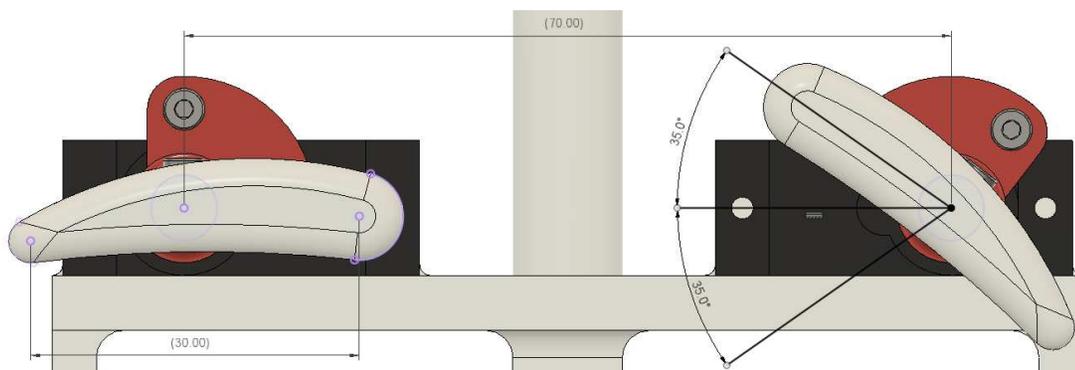
Movilidad de los Párpados



En el caso de las cejas, mostradas en la Figura 28, cada una es accionada por actuadores diferentes, tienen un largo aproximado de 30 mm y una separación de 70 mm, con un límite de rotación de ± 35 grados, rango adecuado que permite al robot expresar diversas emociones.

Figura 28

Movilidad Independiente de las Cejas



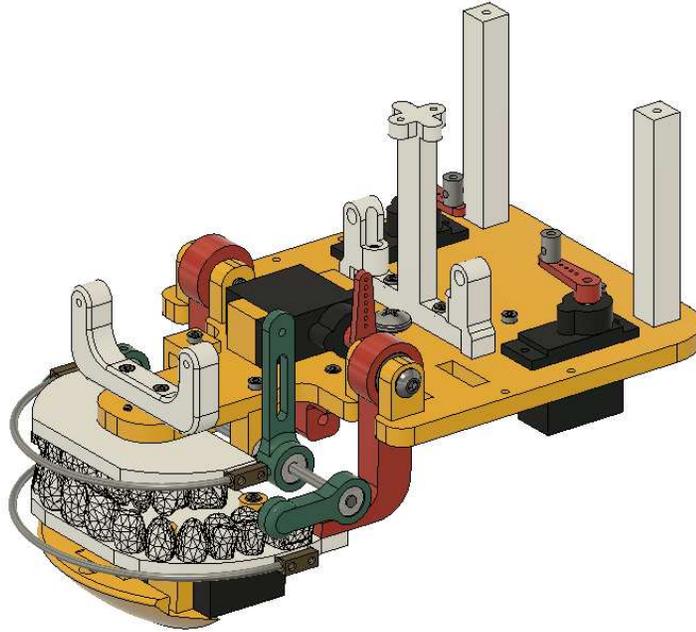
3.12.2. Diseño del Mecanismo de la Boca

El diseño trata de reducir, en lo posible, la complejidad de movimientos de la boca, por ello, se parte por simplificar el desplazamiento circular del maxilar inferior, para que este recree el abrir y cerrar de la mandíbula utilizando solo un actuador y un anclaje, con rodamientos, a un punto medio en la estructura base. Con respecto al movimiento de los labios, superior e inferior, fundamentales en la ejecución de expresiones faciales, se cuentan con acoples elaborados a partir de cuerdas de guitarra, que proporcionan una fácil manipulación y buena flexibilidad, así, el labio superior es accionado por el enlace de dos actuadores, uno para la derecha y otro para la izquierda, mientras que el labio inferior es únicamente activado por un actuador ubicado en la parte central.

Al igual que el mecanismo de los ojos, los elementos que proporcionan el movimiento de la mandíbula, los labios y las comisuras de la boca están apoyados en una estructura base, distanciada del soporte de los ojos por tres separadores, como se indica en la Figura 29.

Figura 29

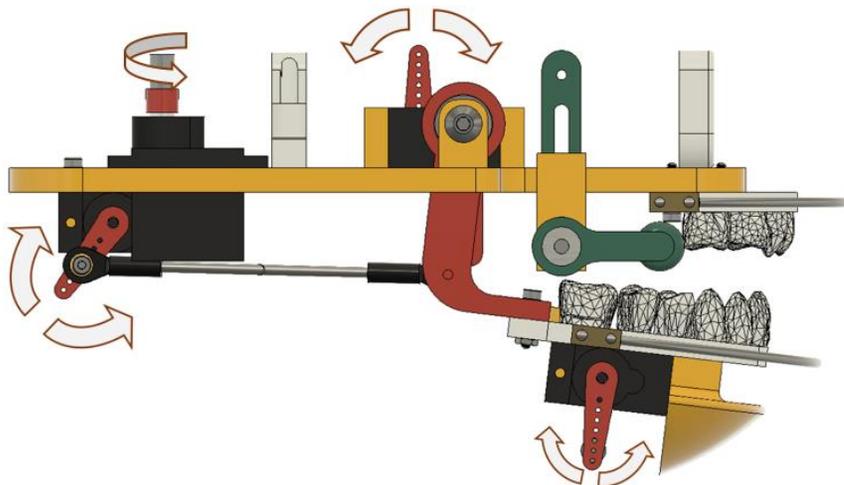
Vista Independiente del Mecanismo de la Boca



Asimismo, la Figura 30 exhibe los movimientos del mecanismo de la boca, donde el accionamiento de las comisuras se realiza con un solo actuador conectado a los extremos de cada labio, esto con la intención de tener un diseño económicamente más asequible.

Figura 30

Movilidad del Mecanismo de la Boca



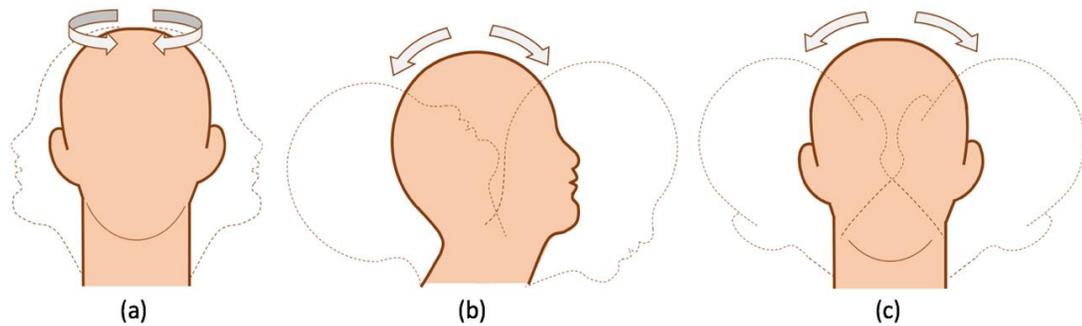
3.12.3. Diseño del Mecanismo del Cuello

Por simplicidad de diseño, el mecanismo del cuello únicamente se enfoca en cumplir con dos de los tres movimientos naturales que realiza el cuello de un ser humano; estos son los movimientos de rotación de derecha a izquierda y la extensión y flexión del cuello, quedando excluido del diseño la inclinación lateral.

Como material de referencia, la Figura 31 presenta un esquema del cuello humano con sus tres movimientos naturales.

Figura 31

Movimientos Naturales del Cuello Humano

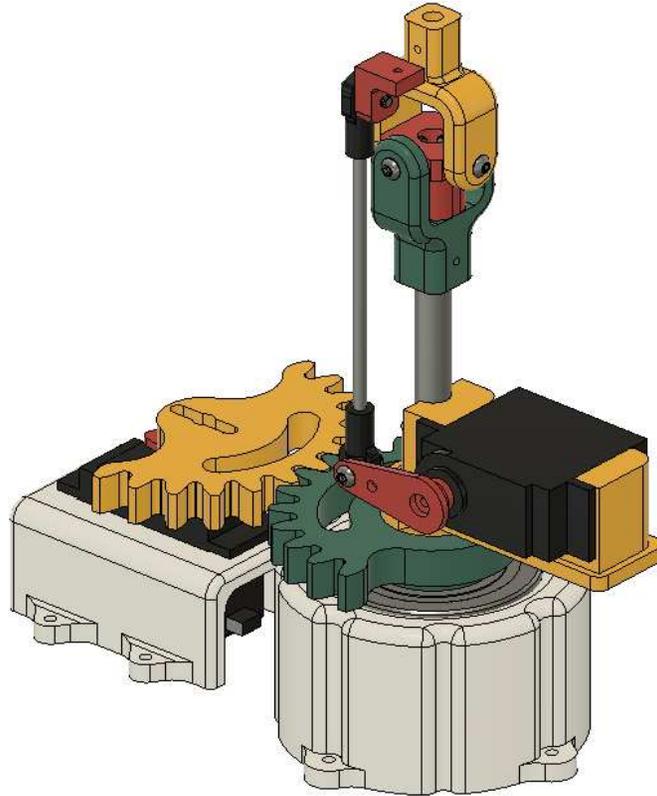


Nota. (a) Movimiento de rotación; (b) movimiento de extensión y flexión; y (c) movimiento de inclinación lateral.

Siguiendo la consideración planteada, se presenta un sistema para la rotación, extensión y flexión del cuello como se muestra en la Figura 32. El mecanismo cuenta con una articulación tipo universal, un sistema de engranajes y una base de soporte, esta última incorpora un rodamiento rígido de bolas el cual permite al cuello tener una libre rotación; asimismo, los movimientos para el mecanismo del cuello se realizan por medio de dos actuadores, uno ubicado en un soporte fijo y otro colocado en la base móvil.

Figura 32

Vista Independiente del Mecanismo del Cuello



3.12.4. Dimensionamiento de Actuadores

A raíz de que el servomotor fue el actuador seleccionado en el módulo de eléctrica y electrónica, se tiene que identificar las especificaciones técnicas que debe poseer para que la cabeza animatrónica funcione correctamente. Siendo de sustancial importancia calcular el torque que requiere cada actuador de cada uno de los mecanismos, donde se puede considerar como carga aplicada al peso que cada servomotor debe soportar. Así, teóricamente, el valor del torque está dado por:

$$\tau_t = F * d \quad (1)$$

Donde τ_t es el torque calculado del actuador en [Nm], F la fuerza aplicada a un punto en [N] y d la distancia entre el punto hacia el eje de giro en [m].

En lo referente a los actuadores para el movimiento de los ojos, párpados, cejas, labios, comisuras y mandíbula, se opta por omitir el cálculo del torque, esto debido a que las cargas a las que se exponen los actuadores son mínimas, y, de aplicar el cálculo teórico, se observaría un sobre dimensionamiento. No obstante, el juicio usado para elegir al actuador es el tamaño que debe tener, ya que no se cuenta con un mucho espacio dentro del robot; esta es la razón para seleccionar un actuador tipo micro servo, sus especificaciones son mostradas en la Tabla 50.

Tabla 50

Especificaciones Técnicas del Micro Servo MG90S

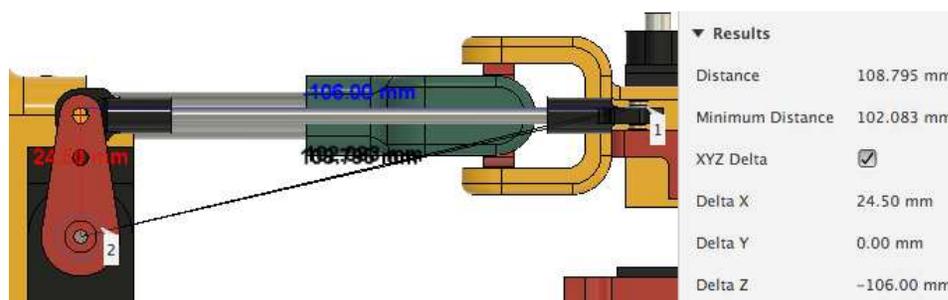
Características	Valores
Torque	1.8 kgf-cm (4.8 V); 2.2 kgf-cm (6 V)
Velocidad de giro	0.1 s / 60 grados (4.8 V); 0.08 s / 60 grados (6 V)
Corriente de funcionamiento	Sin carga: aprox. 70 mA. Bloqueo aprox. 400 mA
Ángulo de rotación	0 – 180 grados (Resolución: 1 grado)
Dimensiones	22.5 x 12 x 35.5 mm
Peso	13 gr

Nota. Adaptado de *MG90S Micro Servo*, por *Maker Portal*, 2021.

Con respecto al mecanismo del cuello, es necesario calcular el torque requerido por los actuadores, para ello y con la ayuda del software de diseño, se obtienen tanto las distancias como los valores del peso promedio que el actuador debe manipular; así, la Figura 33 indica la distancia entre la carga y el punto de giro para el movimiento de extensión y flexión del cuello.

Figura 33

Distancia entre la Carga y el Eje de Giro del Actuador de Elevación



El actuador de elevación se expone a una carga, resultante de la suma del peso de los mecanismos de los ojos y boca con sus actuadores, estimado mediante software en 0.44 kg, más el peso de la estructura exterior, con un valor aproximado de 350 gr; al aplicar la Ecuación (1), se obtiene:

$$\tau_t = (0.44 + 0.35) \text{ kg} * (9.81 \text{ m/s}^2) * (0.0245 \text{ m})$$

$$\tau_t = 0.1899 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Adicionalmente, al cálculo teórico se le incorporan factores correctivos que sirven para obtener el valor nominal del torque y para elegir al actuador adecuado, estos son: un factor de seguridad de 2, un rendimiento “e” de 80 % y finalmente, un porcentaje de pérdidas de 50 %.

Adjuntando dichos factores se obtiene la expresión para calcular el torque nominal:

$$\tau_n = \frac{F_{seguridad}}{e * Pérdidas} (\tau_t)$$

$$\tau_n = \frac{2}{(0.8)(0.5)} * \tau_t$$

$$\tau_n = 5 * \tau_t \quad (2)$$

Así, reemplazando valores en la Ecuación (2), el elemento actuador de elevación del cuello requiere tener un torque nominal de:

$$\tau_n = 5(0.1899 \text{ N} \cdot \text{m})$$

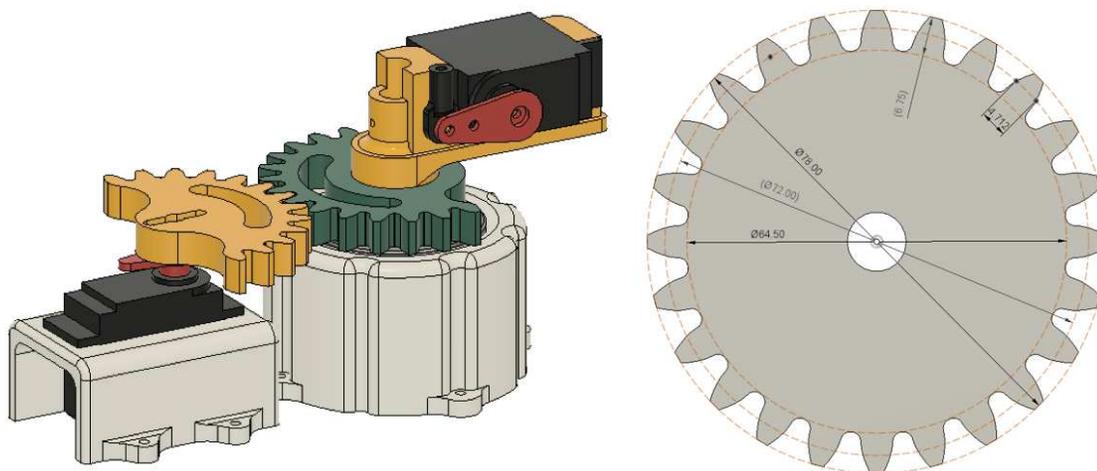
$$\tau_n = 0.9495 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow 9.68 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Por otra parte, para el diseño de la rotación del cuello, la opción lógica sería colocar bajo la base al actuador para que este genere la rotación, pero esto no es lo ideal por dos aspectos, el primero y más obvio, es que el cuello sería significativamente más alto afectando no solo a la estética sino también a la estabilidad de la cabeza, el segundo y más importante, es que los servomotores tienden a tener juego en su eje de rotación, lo que se traduce en vibraciones al

momento de ejercer la rotación. Por ello se opta por un movimiento realizado por engranajes rectos, este se diseña para una rotación máxima de 180 grados; así, la Figura 34 muestra las dimensiones del engranaje seleccionado con módulo ($m=3$) y un grosor de 10 mm.

Figura 34

Sistema de Engranajes para la Rotación del Cuello



El mecanismo de rotación del cuello tiene un rango de 180 grados, no obstante, en la práctica el desplazamiento angular es menor que el diseñado, debido al espacio del cableado de los actuadores. La Tabla 51 presenta las especificaciones técnicas del actuador seleccionado para satisfacer el trabajo del mecanismo del cuello.

Tabla 51

Especificaciones Técnicas del Servomotor MG995

Características	Valores
Torque	9.4 kgf-cm (4.8 V); 10 kgf-cm (6 V)
Velocidad de giro	0.17 s / 60 grados (4.8 V)
Corriente de funcionamiento	Sin carga: 350 mA. Bloqueo 1500 mA
Ángulo de rotación	180 grados \pm 5 grados
Dimensiones	40.4 x 19.9 x 37.5 mm
Peso	58 gr

Nota. Adaptado de *MG995 Standard Servo*, por Makeblock, 2016.

3.13. Análisis Mecánico del Diseño

Se describe el análisis estático que se hace en los elementos cruciales de la estructura, con el fin de constatar que el diseño mecánico es el adecuado. El análisis se realiza mediante computador, el software Fusion 360 permite generar simulaciones para evidenciar cambios en la deformación, el esfuerzo máximo y el factor de seguridad del robot.

3.13.1. Análisis de la Estructura Base de la Boca

La estructura base de la boca es el elemento encargado de soportar al mecanismo de los ojos y los demás componentes de la boca, comisura y labios. Por tanto, deben considerarse las propiedades del material elegido y las cargas puntuales a las que se somete la estructura. Las cargas se dan a partir de la masa de los componentes y la fuerza de gravedad, considerada como 9.81 m/s^2 , entonces se exponen las siguientes fuerzas:

$$F_{OE} = (0.550 \text{ kg}) \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) = 5.396 \text{ N}$$

$$F_{MI} = (0.0651 \text{ kg}) \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) = 0.639 \text{ N}$$

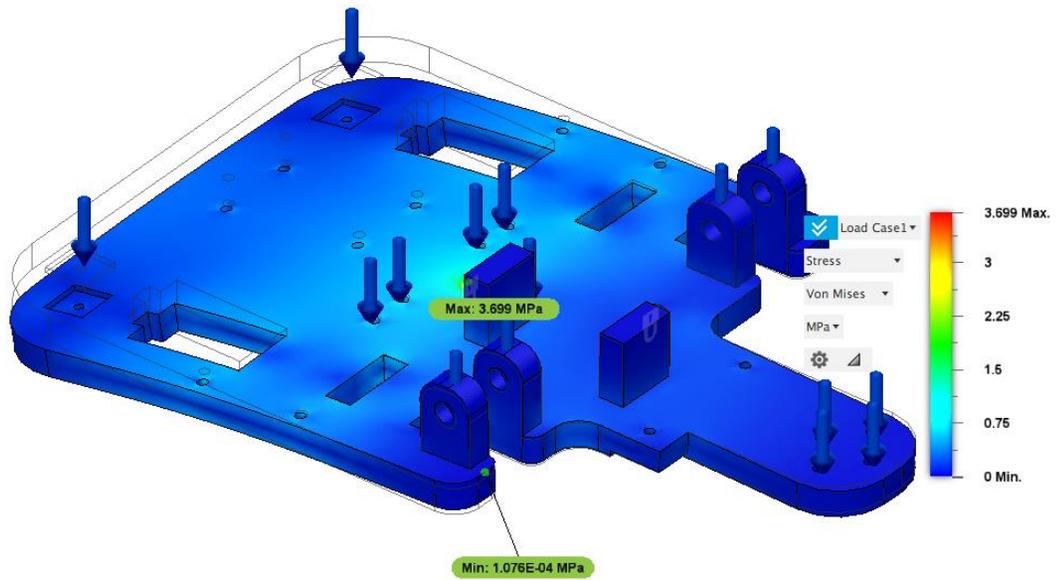
$$F_{CB} = (0.1264 \text{ kg}) \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) = 1.24 \text{ N}$$

Donde F_{OE} es la fuerza producida por las masas del armazón o estructura externa y del mecanismo de los ojos, F_{MI} es producida por la masa del maxilar inferior y sus elementos, y F_{CB} se refiere a la masa de los componentes apoyados en la estructura base de la boca más la masa de la misma.

Se enfatiza en que, a pesar de tener fuerzas tan bajas que no suponen un esfuerzo a la estructura, es conveniente realizar la simulación para examinar cómo se comporta el elemento; así, la Figura 35 presenta el esfuerzo máximo (3.699 MPa) al que se expone el elemento, siendo este menor al valor de resistencia a la fluencia o límite elástico del PLA (40 MPa).

Figura 35

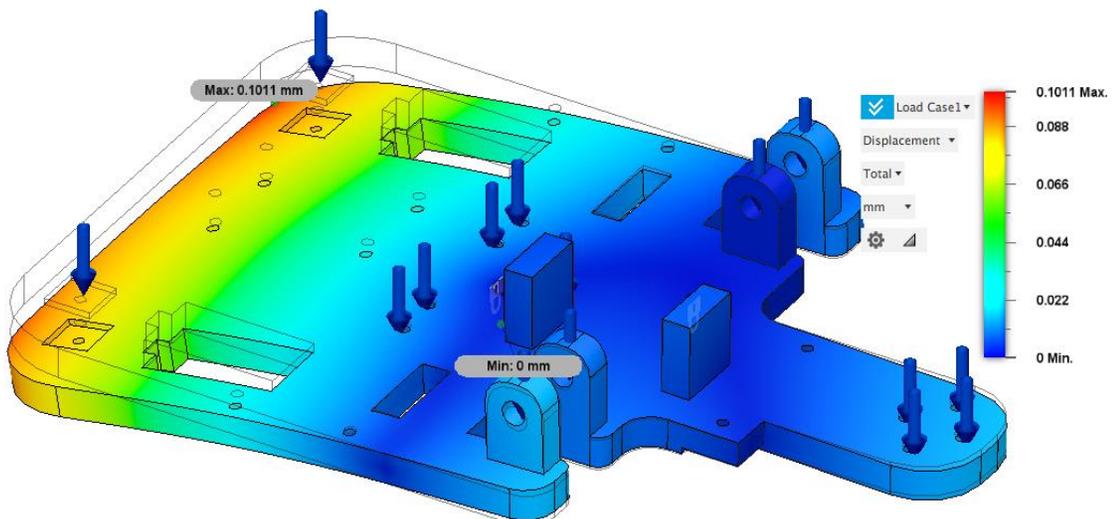
Esfuerzo Von-Mises de la Estructura Base de la Boca



Además, el desplazamiento, mostrado en la Figura 36, que sufre el elemento llega a ser mínimo con un valor de 0.1011 mm en la parte posterior, mismo que no representa ningún inconveniente en el diseño.

Figura 36

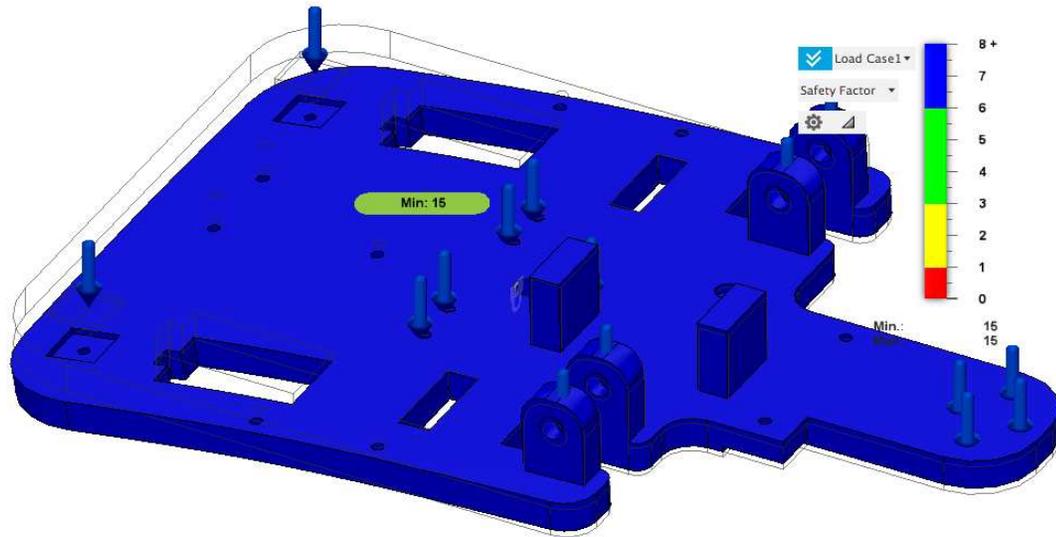
Desplazamiento de la Estructura Base de la Boca



De igual forma, la simulación del factor de seguridad que se muestra en la Figura 37, indica un valor de 15, presentando un sobredimensionado, pero no se consideran cambios en el material debido al bajo costo y fácil adquisición del PLA.

Figura 37

Factor de Seguridad de la Estructura Base de la Boca



3.13.2. Análisis del Elemento Elevador del Cuello

El brazo del servomotor que realiza la extensión y flexión del cuello es el elemento que está más involucrado con el correcto funcionamiento de la cabeza animatrónica. El brazo debe soportar la carga, correspondiente a la suma de todas las fuerzas de las masas, que se distribuye de igual manera con la articulación universal, por lo que se obtiene:

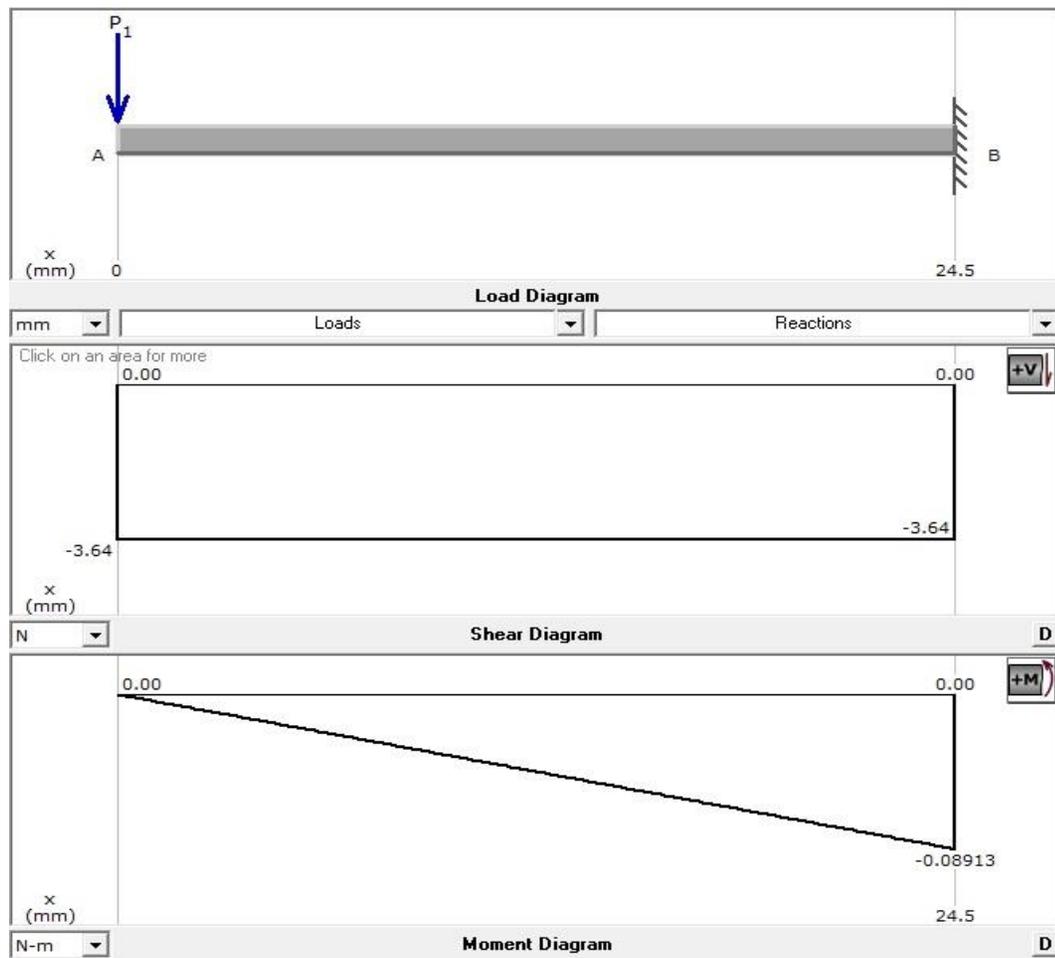
$$F_{brazo} = \frac{F_{OE} + F_{MI} + F_{CB}}{2}$$

$$F_{brazo} = \frac{5.396 + 0.639 + 1.24}{2} = 3.638 \text{ N}$$

En la Figura 38 se muestra el diagrama de cuerpo libre del elemento, donde se estima al brazo como si fuera una viga empotrada al servomotor y con la carga aplicada en un extremo.

Figura 38

Diagrama de Cuerpo Libre para el Brazo del Servomotor



Nota. (De arriba hacia abajo) Diagrama de cuerpo libre, fuerzas cortantes y momentos.

Para calcular el esfuerzo normal provocado por un momento flector de un elemento, es factible aplicar:

$$\sigma = M * \frac{c}{I} \quad (3)$$

Donde σ representa el esfuerzo normal, M es el momento flector máximo, c la distancia medida desde la fibra más lejana hacia el centroide e I es el momento de inercia con respecto al eje de giro. Del diagrama de momentos se puede observar un valor máximo de 0.08913 Nm.

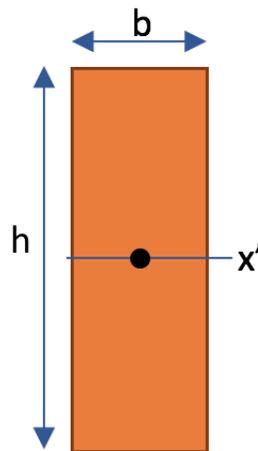
Del diagrama de momentos se puede observar un momento máximo de 0.08913 Nm, dicho valor está aplicado en un punto del elemento que es considerado como una sección rectangular de 2 mm de ancho y 15 mm de alto, para la misma se aplica la fórmula para calcular el momento de inercia, siendo esta:

$$I_x = \frac{1}{12} * b * h^3 \quad (4)$$

Donde I_x es el momento de inercia con respecto al eje x, b representa el ancho y h el alto de la sección rectangular; como se observan en la Figura 39.

Figura 39

Elementos para el Cálculo del Momento de Inercia



Así, al sustituir las distancias de la sección rectangular en la Ecuación (4), se consigue:

$$I_x = \frac{1}{12} (0.002 * 0.015^3) m^4$$

$$I_x = 5.625 \times 10^{-10} m^4$$

Reemplazando el momento de inercia en la Ecuación (3), se obtiene:

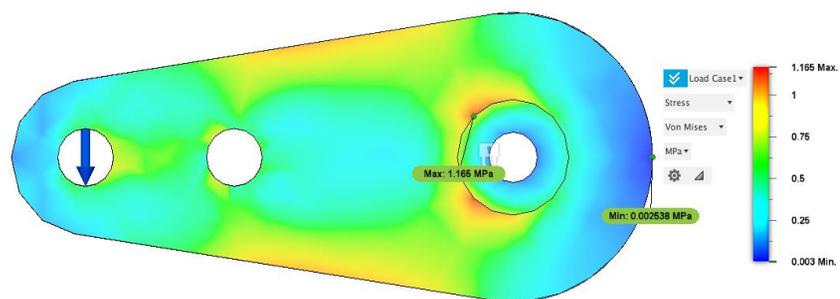
$$\sigma = (0.08913 N \cdot m) * \frac{0.0075 m}{5.625 \times 10^{-10} m^4}$$

$$\sigma = 1188400 \frac{N}{m^2} \rightarrow 1.1884 MPa$$

Como una manera de verificar el valor del esfuerzo calculado se indica una simulación por análisis de elementos finitos como se muestra en la Figura 40, el esfuerzo máximo que soporta el brazo del servomotor es de 1.165 MPa, valor similar al calculado, mismo que está muy por debajo de la resistencia del PLA, lo que claramente expresa que el elemento va a tener un funcionamiento óptimo.

Figura 40

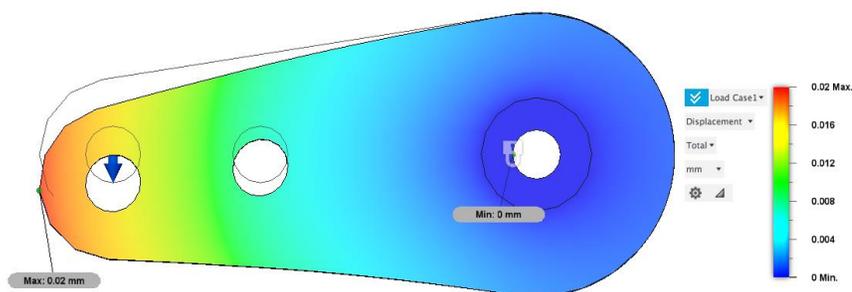
Esfuerzo Von-Mises del Brazo del Servomotor



En la Figura 41 se presenta el desplazamiento que se ejerce en el brazo al ser aplicada la carga, dicho desplazamiento imperceptible, con un valor máximo de 0.02 mm lo que garantiza el diseño del elemento.

Figura 41

Desplazamiento del Brazo del Servomotor

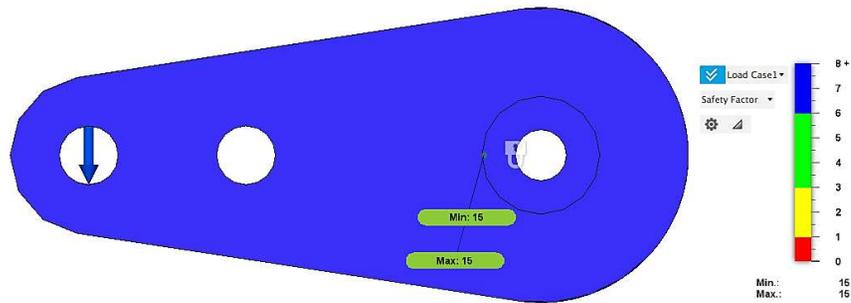


Además, otro factor que reafirma la certeza del diseño para el brazo del servomotor se observa en la Figura 42, donde se muestra un factor de seguridad del elemento de 15, valor que

llega a ser mucho mayor que el estimado y, debido a que el elemento tiene un tamaño pequeño no se expresa la cabida para una optimización morfológica.

Figura 42

Factor de Seguridad del Brazo del Servomotor

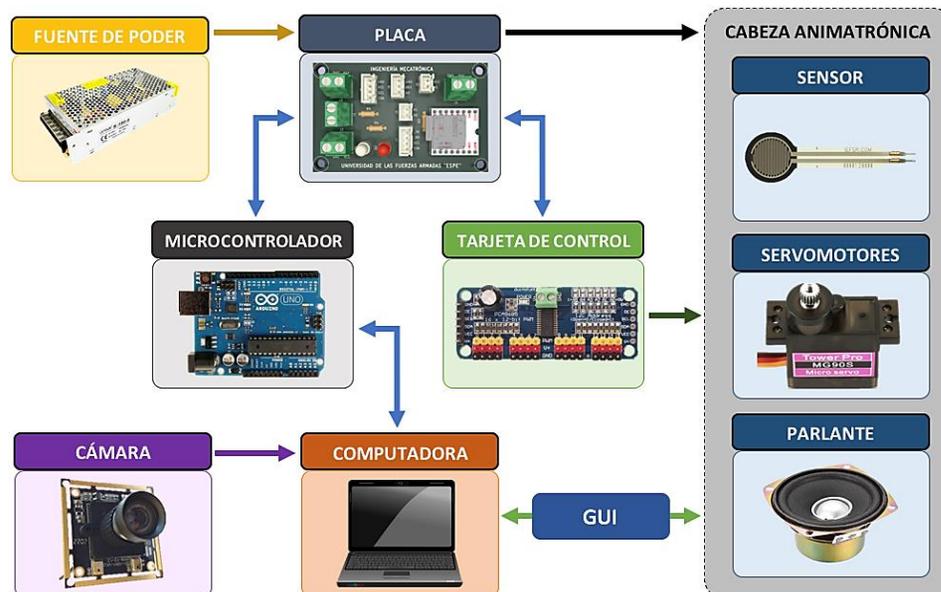


3.14. Diseño Electrónico

El diseño electrónico recopila todos los componentes electrónicos elegidos en la fase de generación de conceptos, como se muestran en la Figura 43, donde se ilustran sus conexiones simplificadas, con el propósito de favorecer el entendimiento del diseño.

Figura 43

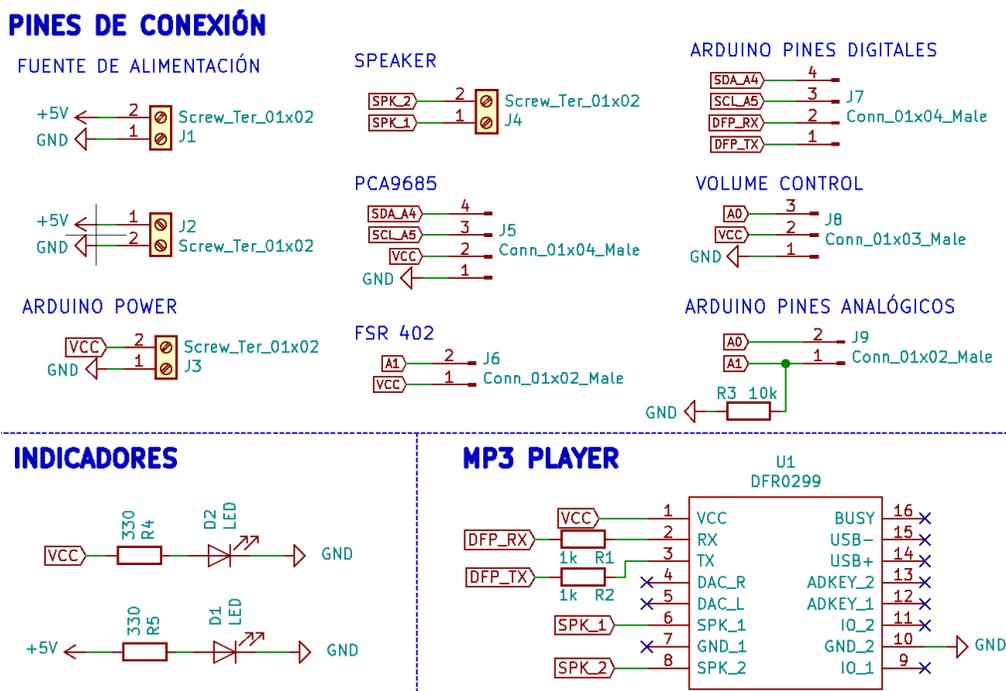
Esquema Básico de Conexiones del Robot



El esquema puede explicarse como un método que integra a los sistemas de control, de visión, electrónico y mecánico. En relación a la parte electrónica, la misma se descompone en la fuente de poder, microcontrolador, tarjeta de control de actuadores y placa impresa. Es preciso acotar otros componentes electrónicos, como el parlante de uso común 4Ω 2W para las tareas de comunicación por voz, y el sensor resistivo de fuerza FSR 402 para el tacto. La Figura 44 muestra el esquema del circuito electrónico del proyecto realizado en el software libre KiCad, donde se evidencian los pines de conexión, indicadores y reproductor MP3.

Figura 44

Diagrama Electrónico de la Cabeza Animatrónica



Para el dimensionamiento de la fuente de poder se requiere considerar el consumo total del sistema electrónico, mismo que resulta de la suma de la potencia eléctrica que requiere cada elemento, dicha potencia se expresa por la siguiente fórmula:

$$P = V * I \tag{5}$$

Donde P representa la potencia eléctrica, V es el voltaje e I es la corriente consumida. Es fundamental reconocer que los únicos componentes que se conectan en paralelo a la fuente, siendo de un voltaje constante de 5 V, son los actuadores del robot, los demás elementos son alimentados por la placa de desarrollo Arduino, misma que recibe su corriente del puerto USB del computador; así, el dimensionamiento de la fuente de poder depende de la corriente de los servomotores, que en el caso de llegar a los valores de bloqueo, son generalmente de 400 mA para el micro servo MG90S y de 1.5 A para el servomotor MG995.

Reemplazando la suma de corrientes de los actuadores en la Ecuación (5), se tiene:

$$P = 5 V * [(0.4 * 11) + (1.5 * 2)] A$$

$$P = 5 V * 7.4 A$$

$$P = 37 W$$

Por lo que, la fuente de poder para la alimentación de los actuadores debe ser de un valor mínimo de 37 W, por esta razón y por su fácil adquisición en el mercado se selecciona la fuente de poder modelo S-150-5 con su referente de 150 W.

Además, el diseño del circuito denota el uso de elementos estandarizados para facilitar su obtención, y de ser necesario, su reemplazo; así, los contactos usados son tipo terminales de tornillo MKDS 1.5/2, los conectores son macho-hembra de JST-XH 2.54 mm de 2, 3 y 4 pines, las resistencias axiales DIN 0207 y los indicadores led son tipo THT de 5mm. Para el cableado entre la PCB con el Arduino y el módulo PCA9685, se emplean cables hechos a mano con jumpers para placas de prueba, con puntas reemplazadas por conectores XH 2.54 mm.

Para calcular el ancho de pista de la placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) se opta por usar el estándar genérico de diseño de circuitos impresos IPC-2221, mismo que define dos ecuaciones, una para el área y otra para el ancho de pista. La primera ecuación

depende de la corriente máxima que circula por la pista, la temperatura del entorno donde opera y de tres constantes “ k_1, k_2, k_3 ”; la segunda, por el área, el grosor por pie cuadrado del material y una constante de diseño igual a 1.378, las mismas se detallan a continuación:

$$A = \left(\frac{I}{k_1 * \Delta T^{k_2}} \right)^{1/k_3} \quad (6)$$

$$A_P = \frac{A}{G * 1.378} \quad (7)$$

Donde A es el área de la pista calculada en milésimas de pulgada “mils”, I la corriente máxima, ΔT la variación de temperatura, A_P el ancho de la pista y G el grosor de la pista.

Las constantes para el cálculo del área dependen de la naturaleza de la placa, para PCBs con pistas externas se dan valores de: $k_1 = 0.0647$, $k_2 = 0.4281$ y $k_3 = 0.6732$. El diseño considera una variación máxima de temperatura de 10 °C; además, la corriente máxima se da cuando el robot expresa la emoción de asco, debido a que esta exige más a los actuadores, requiriendo el esfuerzo de los servomotores de las cejas, los párpados y la elevación del cuello; así, se puede detallar un valor aproximado de corriente máxima con las corrientes de funcionamiento, sin carga y en bloqueo, de los 11 servomotores MG90S y los 2 MG995, como:

$$I_{m\acute{a}x} = [4(0.4) + 7(0.07) + 0.35 + 1.5] = 3.94 \text{ A}$$

Reemplazando los valores de corriente, la variación de temperatura y las constantes “ k_1, k_2, k_3 ” en la Ecuación (6), se obtiene:

$$A = \left(\frac{3.94}{0.0647 * (10)^{0.4281}} \right)^{1/0.6732} = 103.51 \text{ mils}^2$$

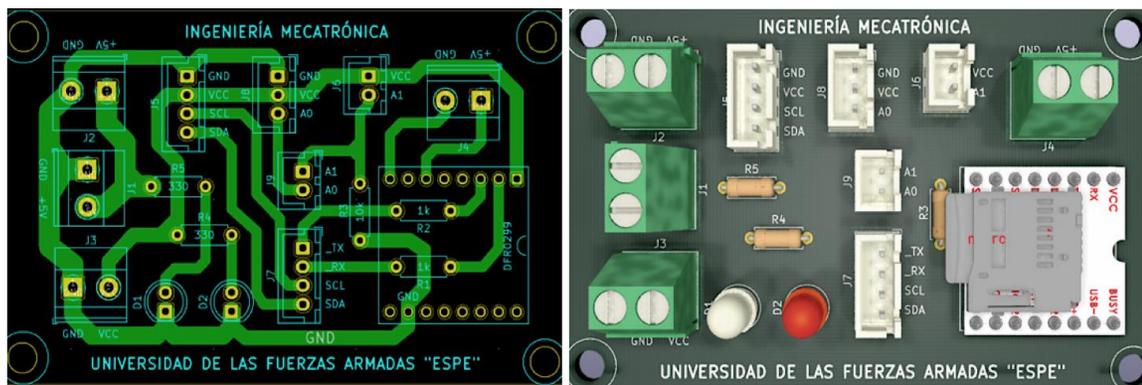
En la Ecuación (7) se sustituyen los valores del área y del grosor de pista, considerado de 1 onza por pie cuadrado, así se tiene:

$$A_P = \frac{103.51}{1 * 1.378} = 75.11 \text{ mils} \rightarrow 1.91 \text{ mm}$$

Por esta razón se opta por un ancho de pista de 2 mm, mismo que corresponde a las pistas conectadas con la fuente de poder para la alimentación de los actuadores, para las pistas que interactúan con el controlador, parlante y sensor, se utiliza un ancho de 1.5 mm, este valor está delimitado por las capacidades de fabricación del router CNC. La PCB del robot con su vista 3D y respectivos elementos se presentan en la Figura 45.

Figura 45

Diseño de Placa de Circuito Impreso



Nota. (Izquierda) Diseño de pistas de la PCB. (Derecha) Vista 3D de la PCB con sus componentes.

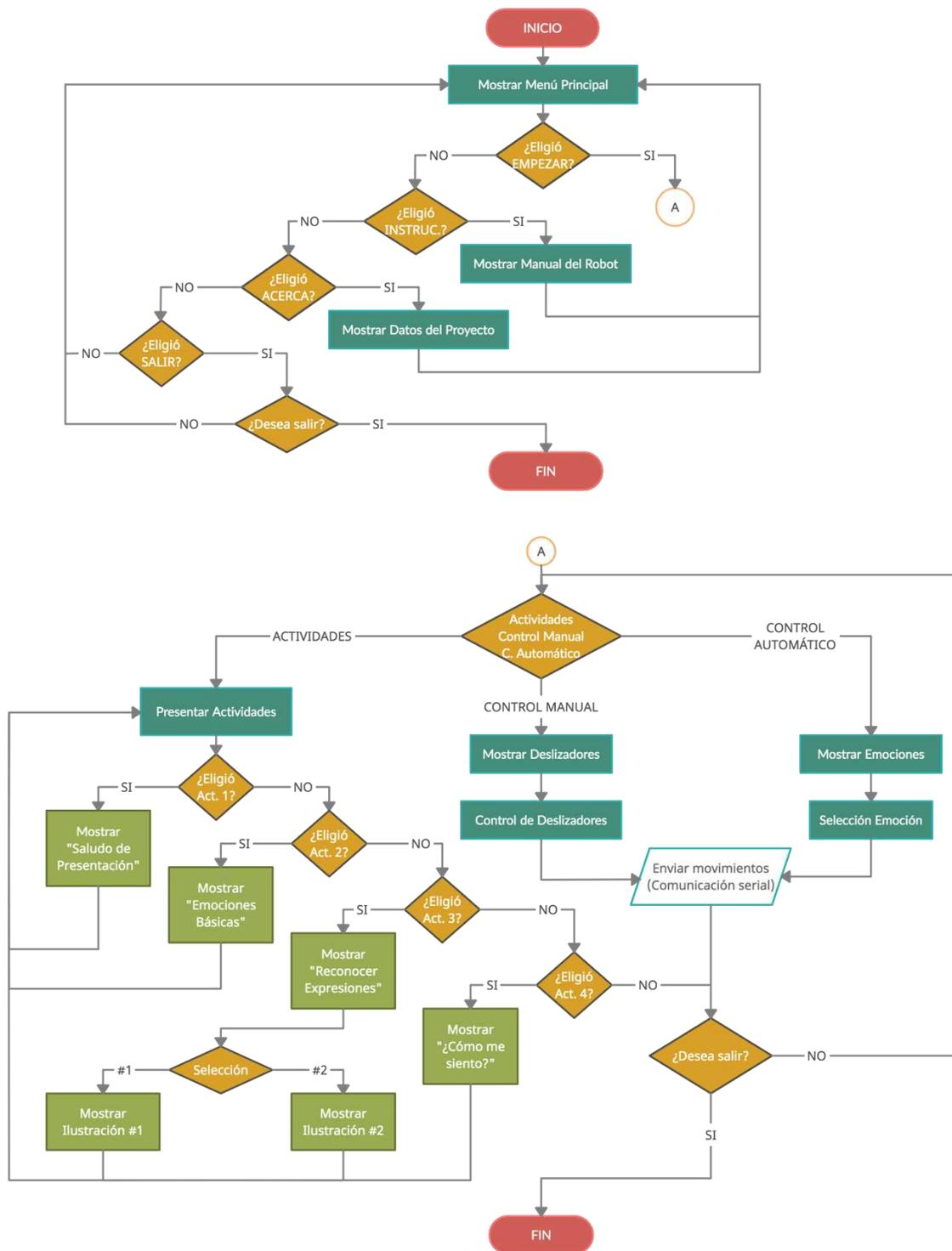
3.15. Diseño del Sistema de Control

La cabeza animatrónica puede ser controlada mediante deslizadores encontrados en la interfaz gráfica del usuario (GUI, por sus siglas en inglés), misma que está programada en Python con el paquete Tkinter. Se propone un diseño con la implementación de dos GUIs separadas para facilitar el uso del robot, la primera destinada a la introducción, actividades, control manual y control automático del robot; y la segunda orientada al sistema de visión artificial.

En la Figura 46 se muestra el diagrama de flujo de la GUI de control de los actuadores, la cual incorpora a la placa de desarrollo Arduino Uno y al módulo PCA9685 para controlar los 13 servomotores del robot mediante comunicación serial.

Figura 46

Diagrama de Flujo de la Interfaz de Control



La GUI de control inicia con la presentación de un menú principal como se observa en la Figura 47, donde en primera posición se coloca una lista desplegable que muestra todos los puertos de comunicación serial del computador, el mismo permite al usuario seleccionar el puerto del controlador conectado por USB, seguidamente se tienen las alternativas: “Empezar”, para pasar a la pantalla de control; “Instrucciones”, para mostrar diversas instrucciones para el uso del robot; “Acerca”, que expone información adicional del proyecto y la opción “Salir”, para cerrar la GUI, misma que requiere de una confirmación por medio de un mensaje por pantalla.

Figura 47

Pantalla Inicial de la Interfaz de Control



La opción “Empezar” introduce el siguiente panel donde se observan las pestañas de actividades, control manual y control automático del robot. La Figura 48 muestra la pantalla con las diferentes actividades del robot, mismas que están orientadas a familiarizar al usuario con las emociones básicas; para cada área se proponen varios ejercicios que conllevan el uso de la cabeza animatrónica para facilitar el trabajo de enseñanza de emociones.

Figura 48

Pantalla de Presentación de Actividades



En la Figura 49 se muestra la primera actividad, la cual tiene la función de dar un saludo de presentación, adicional de una breve explicación sobre las partes principales del robot.

Figura 49

Pantalla de Saludo de Presentación del Robot



A continuación del saludo, se tiene la actividad “Emociones básicas”, sus plantillas se observan en la Figura 50, donde el robot indica los puntos clave para la gesticulación de cada emoción: felicidad, ira, tristeza, asco, sorpresa y miedo, mismas que son acompañadas por los movimientos de las cejas, ojos, labios y boca, procurando mostrar un ejemplo de cada emoción.

Figura 50

Plantillas de Emociones Básicas



Nota. Las ilustraciones han sido diseñadas usando imágenes adaptadas de pikisuperstar, por Freepik.com, 2021.

Seguidamente se observa la actividad denominada “Reconocer Expresiones”, en la que se presenta un submenú para seleccionar el tipo de ilustración con la que se desea trabajar, la

primera alternativa prioriza el uso de los gráficos presentados en la actividad anterior de emociones básicas, esto para que el usuario tenga un sentido de repetición y trabaje con elementos conocidos o familiares; en cambio, la segunda alternativa hace uso de ilustraciones del modelo para la representación de emociones no verbales Grimace. La Figura 51 muestra la pantalla primaria que expone el submenú para la actividad “Reconocer Expresiones”.

Figura 51

Submenú de Reconocer Expresiones



Las ilustraciones de la primera alternativa muestran las emociones en el siguiente orden: tristeza, ira, asco, felicidad, miedo, sorpresa como se observa en la Figura 52. Al superior de cada plantilla se coloca un mensaje con la acción que el usuario debe realizar, donde se pide al usuario seleccionar la emoción que mejor corresponda al dibujo mostrado; el gráfico de la emoción se coloca en la parte inferior mientras que las opciones, representadas por emojis con el nombre de cada emoción, están fijas en el lado derecho de la plantilla. La Figura 53 expone las plantillas de la primera ilustración para la actividad de “Reconocer Expresiones”.

Figura 52

Gráficos de Emociones para la Plantillas de Ilustraciones #1



Nota. Adaptado de *Personas mostrando emociones vector gratuito* [Gráfico], por pikisuperstar, 2021, Freepik. Obra de Dominio Público.

Figura 53

Plantillas de Reconocer Expresiones con Ilustración #1



Por su parte, las ilustraciones para la segunda alternativa son adaptadas del modelo Grimace como se puede observar en la Figura 54, modelo con aspecto caricaturesco creado por Oliver Spindler y Thomas Fadrus en 2009 y destinado a imitar la forma de operar de los rostros biológicos y que, por medio de sus expresiones faciales, es capaz de replicar las seis emociones básicas con cuatro niveles de intensidad para cada una (Spindler y Fadrus, 2009).

Figura 54

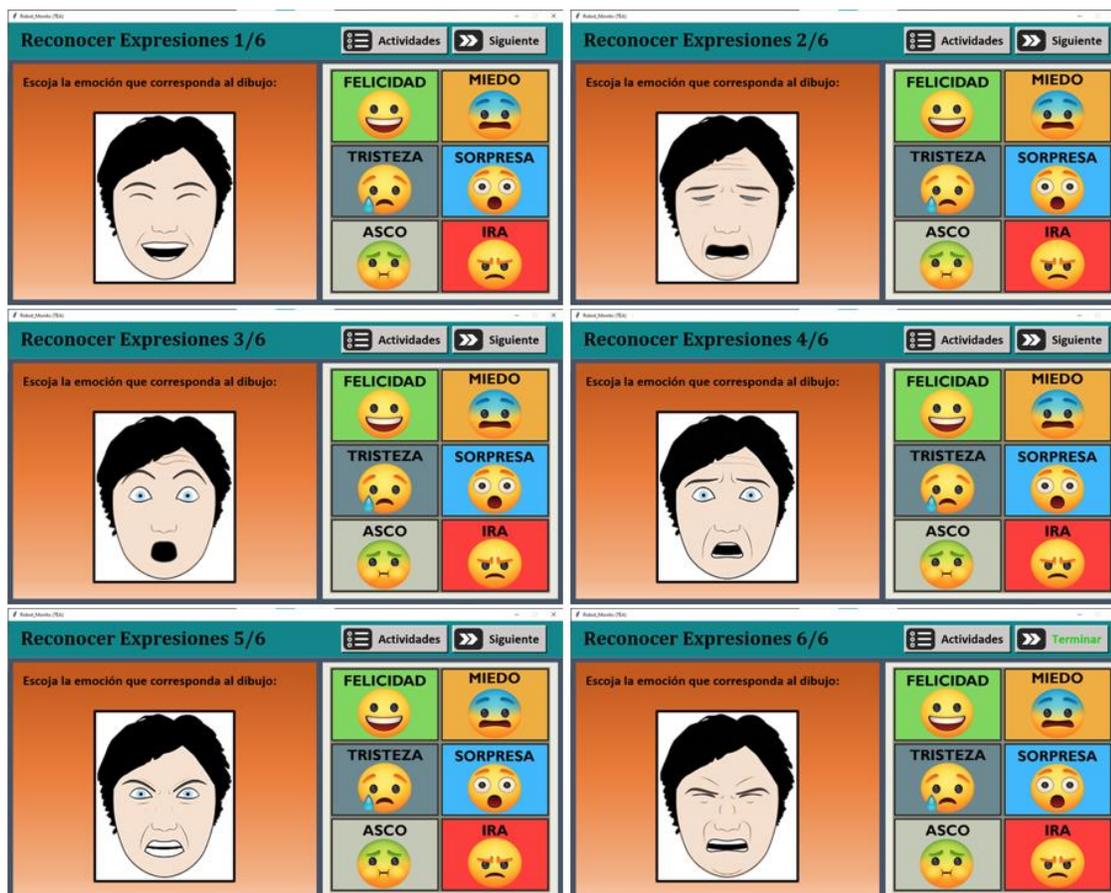
Gráficos de Emociones para la Plantillas de Ilustraciones #2



Nota. Reproducido de *Grimace project documentation [Documentación del proyecto Grimace]*, por O. Spindler y T. Fadrus, 2009. Obra de Dominio Público.

En la Figura 55 se presentan las plantillas de la segunda ilustración para la actividad de “Reconocer Expresiones”. Además, al igual que las plantillas anteriores, en la parte superior de cada una de las páginas se indica una leyenda que expone la acción que precede a la actividad, misma que pide al usuario escoger, entre las seis posibilidades, la emoción que corresponda al dibujo mostrado.

Figura 55

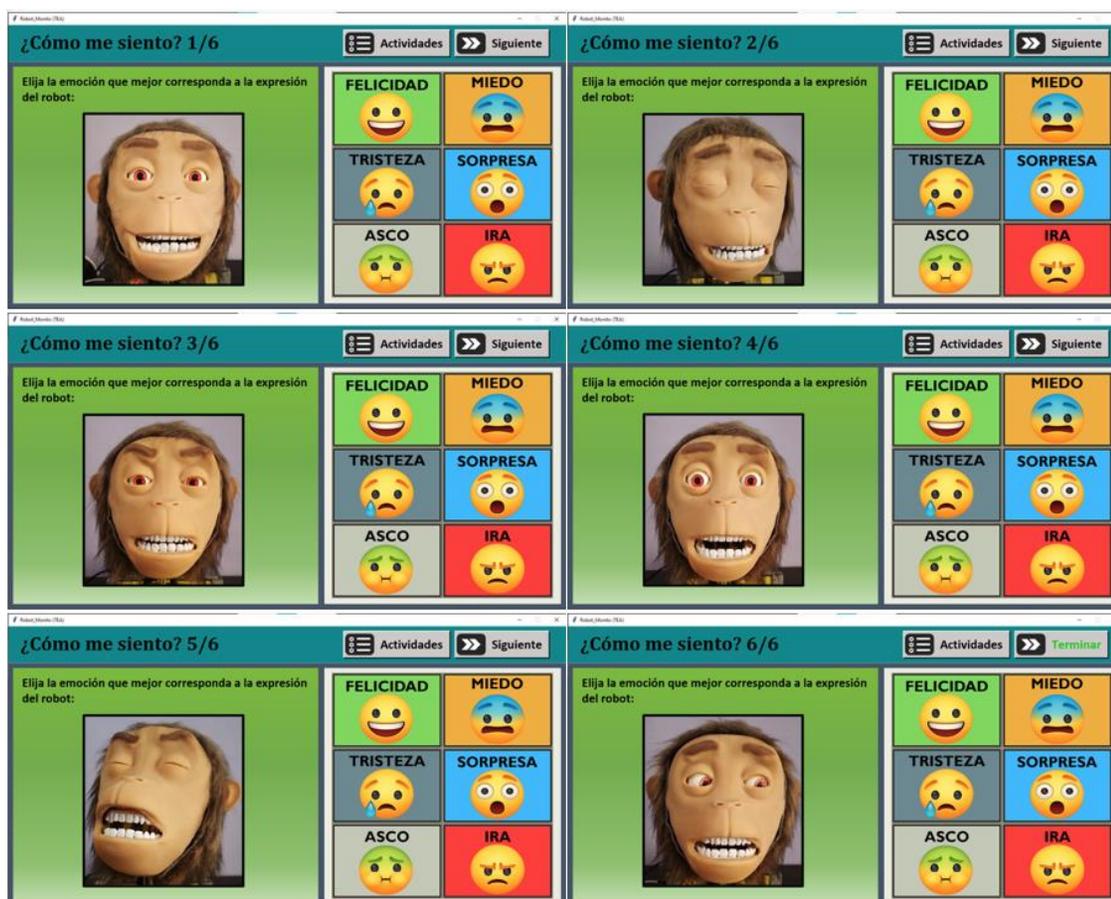
Plantillas de Reconocer Expresiones con Ilustración #2

La siguiente actividad, llamada “¿Cómo me siento?”, es similar a las anteriores, cada página presenta una ilustración con los botones de las emociones al costado derecho, pero con la singular distinción de utilizar fotografías del robot como gráficos de las expresiones faciales; además, la leyenda de la parte superior de las plantillas exhorta al usuario a elegir la emoción que mejor corresponda a la expresión que muestra la cabeza animatrónica.

La Figura 56 exhibe todas las plantillas de la cuarta y última opción de la pestaña de actividades, dichas plantillas muestran las emociones en el siguiente orden: felicidad, tristeza, ira, sorpresa, asco y miedo.

Figura 56

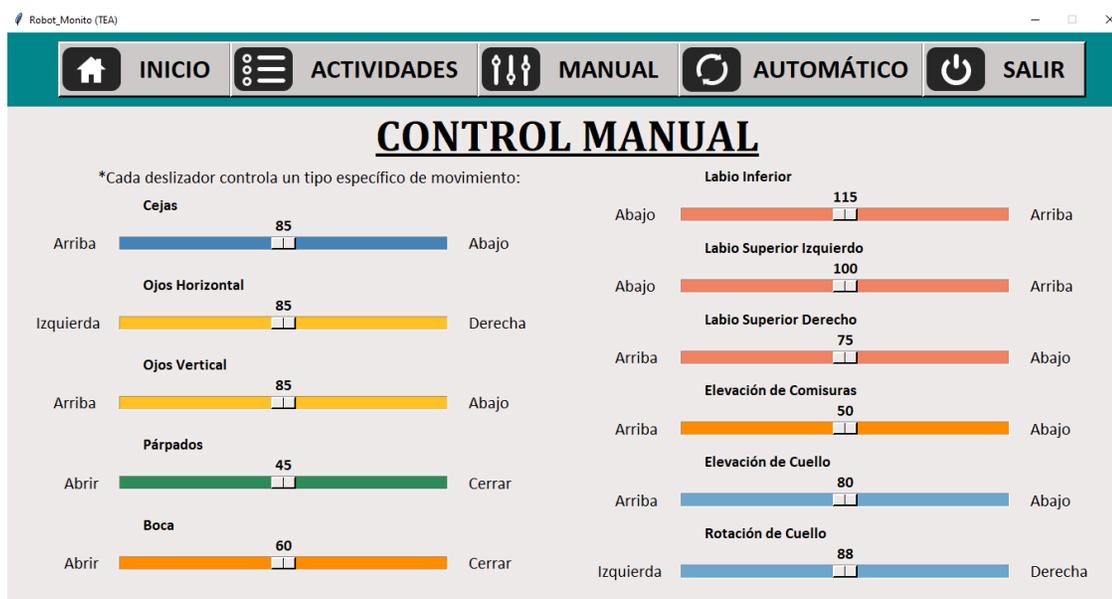
Plantillas de ¿Cómo me Siento?



Posteriormente se introduce la siguiente pestaña, donde se observa el panel para el control manual del robot, mismo que muestra un deslizador distinto que controla un tipo específico de movimiento, siendo destinados al control de las cejas, movimiento horizontal y vertical de los ojos, párpados, boca, elevación de las comisuras, labio superior izquierdo, labio superior derecho, labio inferior, y finalmente la rotación y elevación del cuello. Cada deslizador cuenta con un determinado rango de valores para evitar movimientos que lleguen a exigir a los motores, acto seguido se envía su posición mediante comunicación serial al controlador para que este ejecute los movimientos. La Figura 57 muestra la pantalla del panel de control manual.

Figura 57

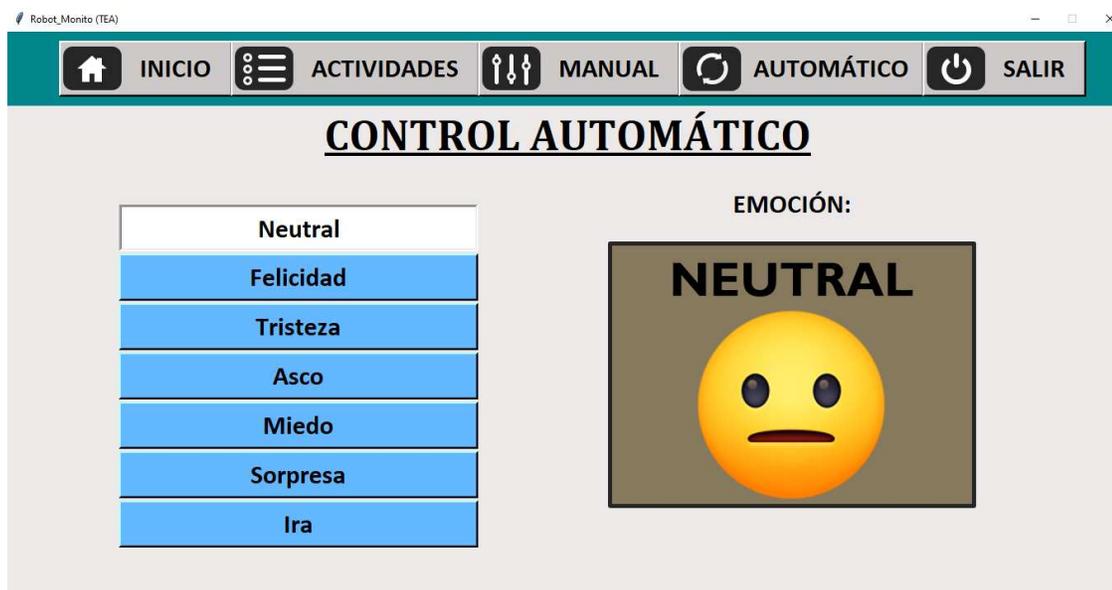
Pantalla de Control Manual del Robot



En la Figura 58 se presenta la pantalla del control automático del robot, donde se muestran las emociones básicas más una opción neutral.

Figura 58

Pantalla de Control Automático del Robot

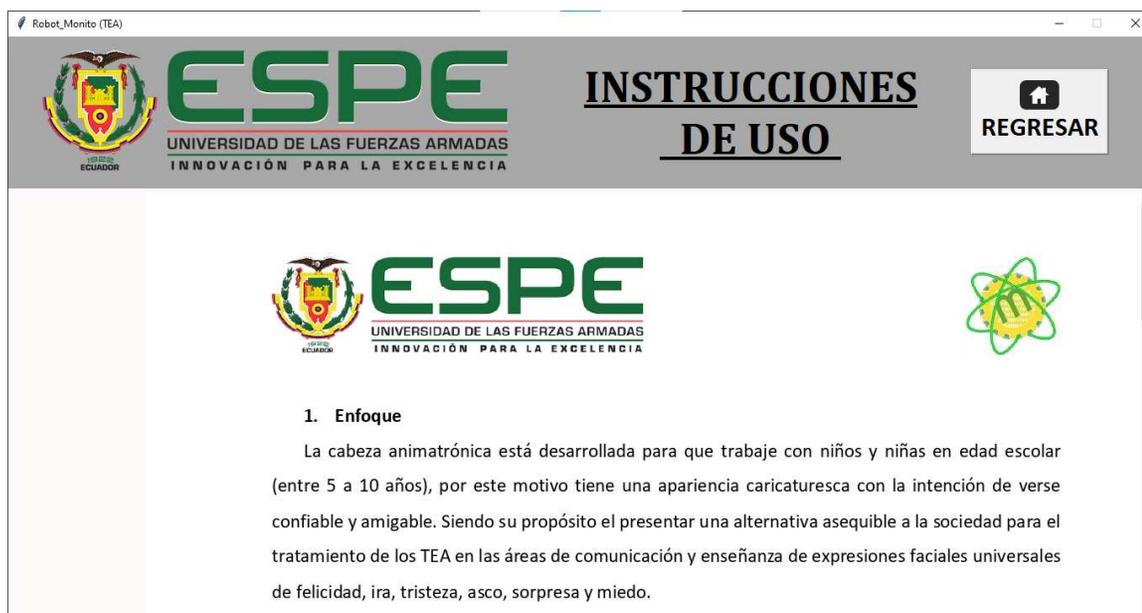


El control automático permite seleccionar la emoción que se desea mostrar en la cabeza animatrónica, dicha instrucción se envía al controlador y este a su vez activa los servomotores para expresar la emoción elegida; además, a la derecha de la pantalla se muestra un emoji con el nombre de dicha emoción para facilitar el aprendizaje de las diferentes expresiones faciales.

De regreso al menú principal de la GUI de control, se cuentan con otras alternativas, una de ellas es la opción “Instrucciones”, que como se observa en la Figura 59, presenta el manual de usuario con el fin de ayudar a las personas que utilizan la aplicación, por primera vez o por reiteradas ocasiones, a conocer y entender más sobre las diferentes instrucciones para el correcto uso del robot.

Figura 59

Pantalla de Instrucciones de Uso



Adicionalmente, el menú principal expone la opción “Acerca”, misma que proporciona información general de la cabeza animatrónica; como se muestra en la Figura 60, la alternativa expone el tema, autor y tutor del presente proyecto de titulación.

Figura 60

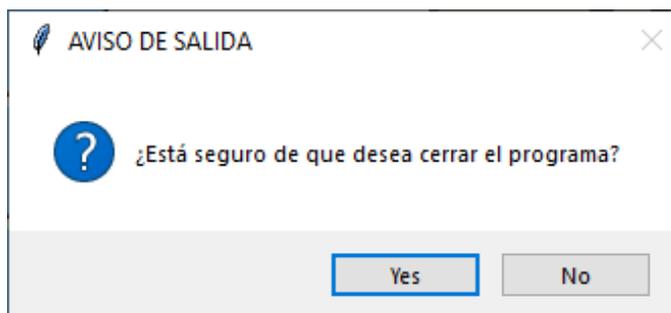
Pantalla de Información General



Para finalizar, se precisa el botón de salida, presente tanto en la GUI de control como en la de visión artificial, mismo que sirve para terminar la ejecución del programa, pero como se observa en la Figura 61, dicha acción requiere de una confirmación por parte del usuario.

Figura 61

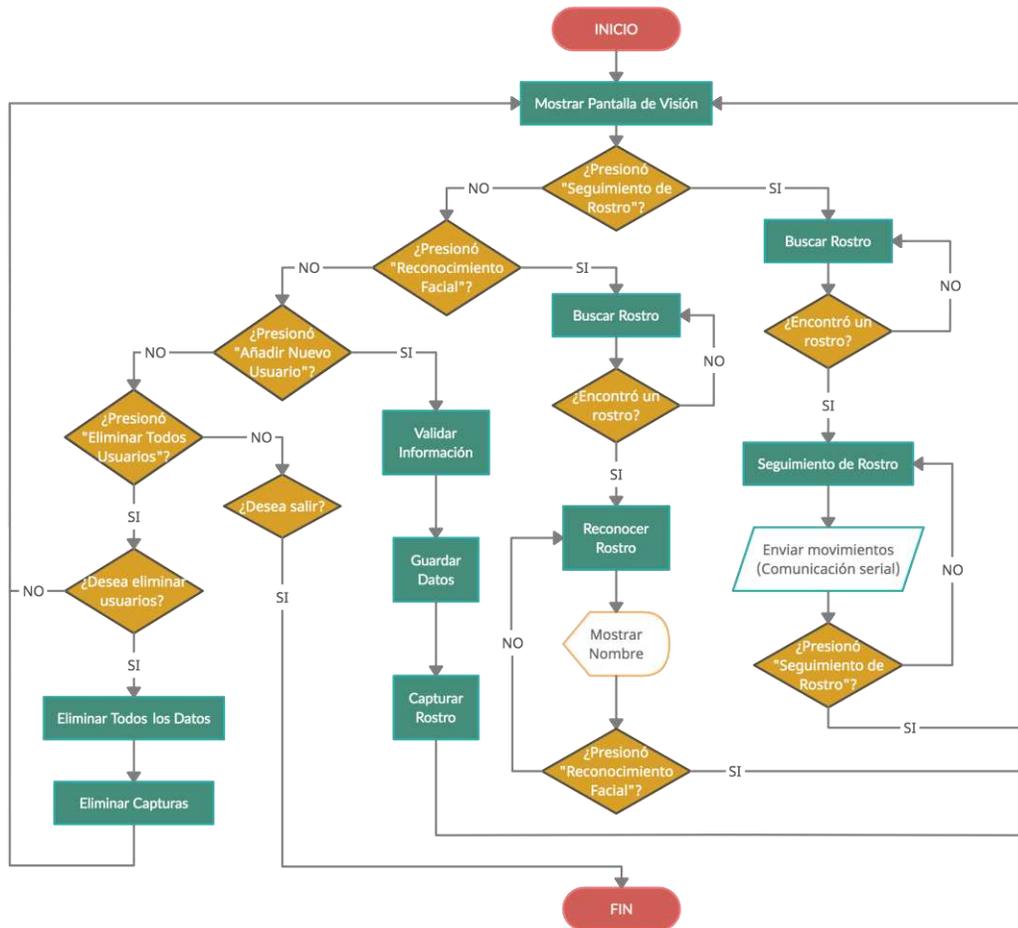
Mensaje de Confirmación de Salida



Posteriormente, se presenta la interfaz gráfica del sistema de visión artificial, misma que sigue el diagrama de flujo mostrado en la Figura 62, donde se proponen dos acciones básicas de funcionamiento, una para el seguimiento de un rostro y otra para el reconocimiento facial.

Figura 62

Diagrama de Flujo de la Interfaz de Visión



El principal componente para el sistema de visión artificial es la cámara, que como se evaluó en la generación de conceptos es una Arducam IMX291, por medio de la cual se trazan los algoritmos de seguimiento y reconocimiento facial. En la Figura 63 se presenta la función de seguimiento, esta imparte al robot la instrucción de buscar un rostro en la imagen captada por la cámara y de encontrarlo, envía sus coordenadas por comunicación serial al controlador. Para el seguimiento facial se utiliza la librería Face_recognition, que posee un algoritmo que analiza la presencia de rostros en el entorno y proporciona cuatro puntos (superior, derecho, inferior, izquierdo) correspondientes al rostro de mayor tamaño, después se obtienen los puntos medios

de la región del rostro y en el punto central se dibuja un círculo de color amarillo; si dicho punto se aleja de una determinada área de tolerancia, el controlador envía las correspondientes instrucciones a los actuadores para hacer el seguimiento.

Figura 63

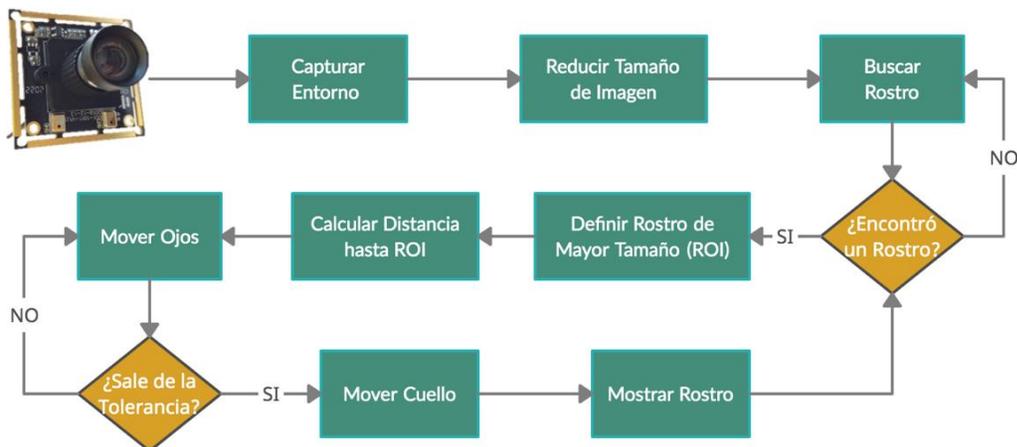
Pantalla de Seguimiento de Rostro



La Figura 64 muestra, a grandes rasgos, el proceso de seguimiento facial del robot.

Figura 64

Procedimiento para el Seguimiento de Rostro



A continuación, en la Figura 65, se presenta la alternativa para el reconocimiento facial, cuyo proceso se basa en identificar si el rostro mostrado por pantalla es conocido o no, de serlo, se enmarca en un recuadro de color verde y se coloca el nombre en la parte superior, caso contrario, el recuadro mantiene el color verde pero, en vez del nombre, se muestra el texto “Desconocido”. El proceso de reconocimiento facial introduce el casillero de “Información del Nuevo Usuario”, colocado en el lado derecho de la pantalla y donde se distinguen los botones para agregar o borrar usuarios.

Figura 65

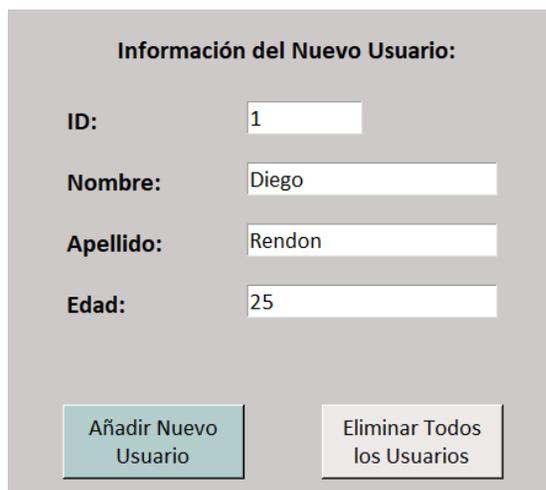
Pantalla de Reconocimiento Facial



El registro de usuarios es una fase fundamental del reconocimiento facial y sirve para formar la base de datos del sistema; así, como se indica en la Figura 66, el registro se encarga de captar y almacenar los datos del usuario (ID, nombre, apellido y edad), dicha información se guarda en un archivo de texto.

Figura 66

Registro de Datos de Nuevos Usuarios



Formulario de información del nuevo usuario con los siguientes campos:

ID:	<input type="text" value="1"/>
Nombre:	<input type="text" value="Diego"/>
Apellido:	<input type="text" value="Rendon"/>
Edad:	<input type="text" value="25"/>

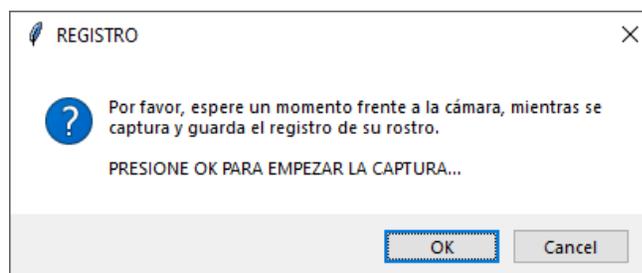
Botones de acción:

- Añadir Nuevo Usuario** (botón verde)
- Eliminar Todos los Usuarios** (botón gris)

En la Figura 67 se indica la acción del botón “Añadir Nuevo Usuario”, mismo que muestra un mensaje de confirmación de registro y se encarga de tomar una captura del rostro del usuario, en la cual se aplica un método de mejora de contraste para, posteriormente, ser guardada con un tamaño de 150x150 pixeles en el directorio de usuarios.

Figura 67

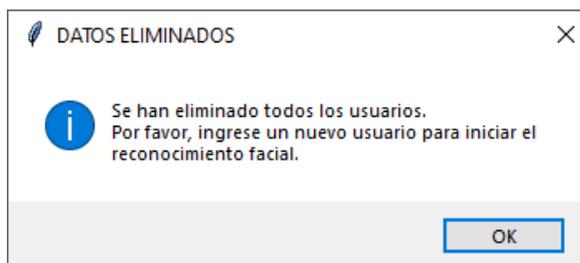
Mensaje de Inicio de Registro



Además, el registro de usuarios introduce el botón “Eliminar Todos los Usuarios”, que se encarga de limpiar el registro y eliminar las fotografías de todos los usuarios; la eliminación de datos también requiere de una verificación y, de ser positiva, se procede a mostrar un mensaje de confirmación por pantalla, como se observa en la Figura 68.

Figura 68

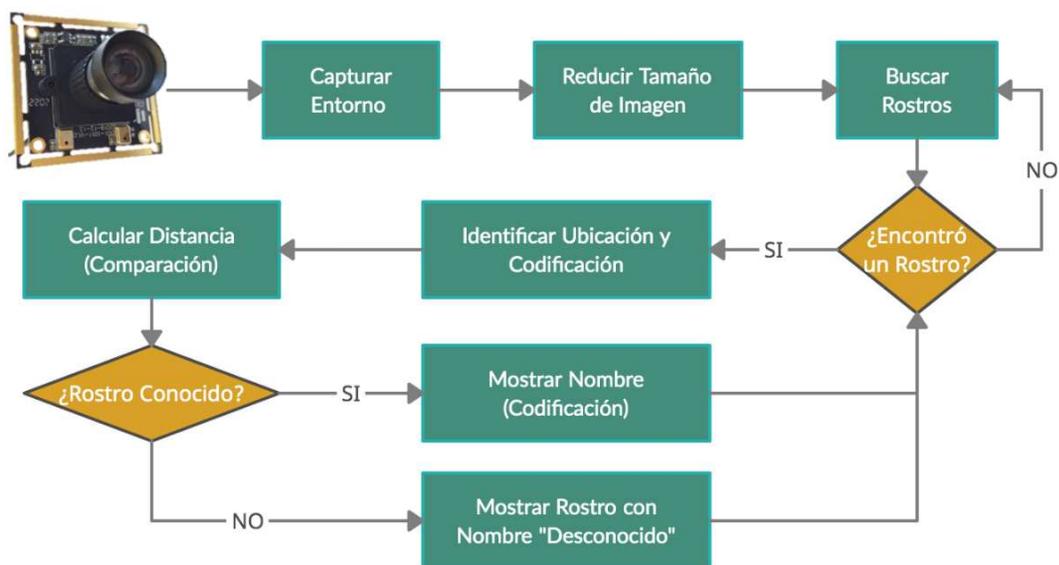
Mensaje de Eliminación de Datos



Finalmente, la Figura 69 presenta el plan de acción para el reconocimiento facial, mismo que utiliza la librería Face_recognition para identificar la ubicación y codificación de los rostros en el entorno de la cámara.

Figura 69

Procedimiento para el Reconocimiento Facial



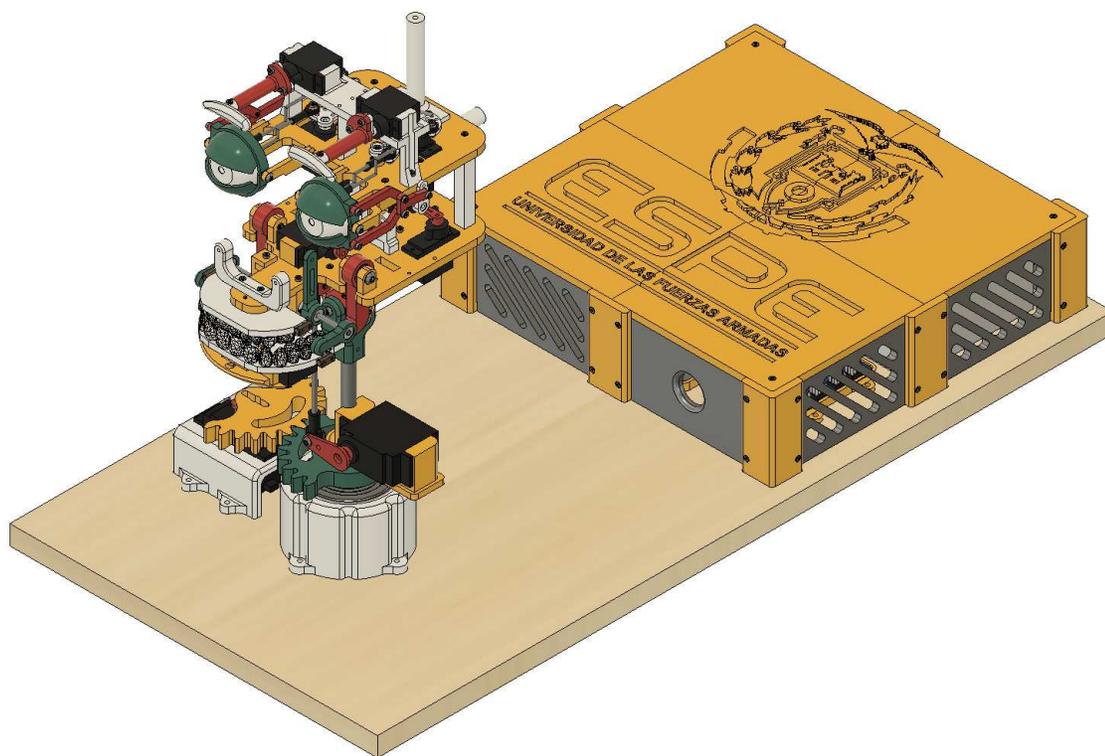
3.16. Diseño Simulado

La Figura 70 presenta el ensamble de la cabeza animatrónica, en la cual es posible detallar la integración de los componentes mecánicos, donde se detalla principalmente la

disposición de los mecanismos de los ojos, boca y cuello del robot; y los elementos electrónicos que integran la caja de control. Dicho ensamble es desglosado en las vistas explosionadas de la parte mecánica y electrónica, mismas que se encuentran en los anexos del proyecto, mostrando todos los componentes del robot y de la caja de control.

Figura 70

Ensamble Simulado de la Cabeza Animatrónica



CAPÍTULO IV

4. Construcción

El capítulo resume el proceso de construcción de la cabeza animatrónica, se recopilan los componentes diseñados tanto para la parte mecánica como electrónica y de control y se presenta un ensamble final del trabajo de titulación.

4.1. Construcción Mecánica

Los elementos mecánicos son diseñados en el software CAD Fusion 360, se guardan los modelos con la extensión STL, los archivos se transforman a código G utilizando el software Cura y posteriormente, son manufacturadas mediante impresión 3D utilizando un filamento PLA con 1.75 mm de diámetro; dicha elaboración se realiza usando una impresora Ender3. Asimismo, el ensamble del robot supone el uso de materiales adicionales, como alambres, tornillos, pernos, tuercas, rodamientos, cabezas de articulación, tope de “pushrod” y tornillos de fijación. Además, los parámetros usados para exportar los modelos del software CAD hacia archivos tipo STL se presentan en la Tabla 52.

Tabla 52

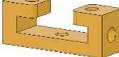
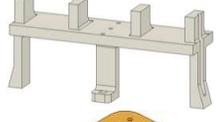
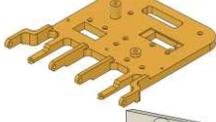
Parámetros para Exportar Modelos

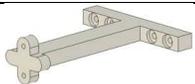
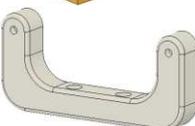
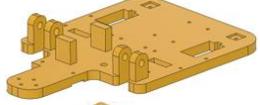
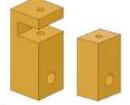
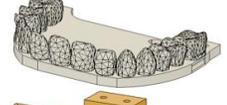
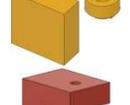
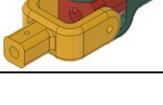
Tipo	Parámetro	Valor
General	Formato	Binario
	Refinamiento	Alto
Opciones de refinamiento	Desviación de superficie	0.003920 mm
	Desviación normal	10.0
	Longitud máxima del borde	78.20486 mm
	Relación de aspecto	21.5

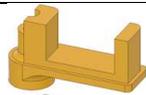
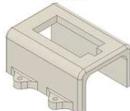
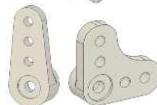
La Tabla 53 muestra las piezas a imprimir con su respectivo gráfico, también indica el tiempo de impresión de cada elemento, así como sus anexos (planos y hojas de procesos).

Tabla 53

Desglose de Elementos Mecánicos por Imprimir

[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo		Gráfico
		Plano	H. Procesos	
[2] Globo Ocular	0:31	A-01	B-01	
[1] Párpado Izquierdo (Superior, Inferior)	0:46	A-02 A-03	B-02	
[1] Párpado Derecho (Superior, Inferior)	0:46	A-04 A-05	B-03	
[2] Soporte Ocular	0:08	A-06	B-04	
[2] Base Ocular	0:04	A-07	B-05	
[4] Enlace Párpados	0:04	A-08	B-06	
[1] Control Párpado Izquierdo	0:06	A-09	B-07	
[1] Control Párpado Derecho	0:03	A-10	B-08	
[1] Cejas (Izquierda, Derecha)	0:18	A-11 A-12	B-09	
[1] Control Cejas (Izquierda, Derecha)	0:44	A-13 A-14	B-10	
[1] Soporte de Cejas	1:58	A-15	B-11	
[1] Base Soporte de Ojos	2:44	A-16	B-12	
[1] Apoyo Vertical	0:53	A-17	B-13	
[1] Apoyo Horizontal	0:56	A-18	B-14	
[2] Divisor Trasero	0:18	A-19	B-15	

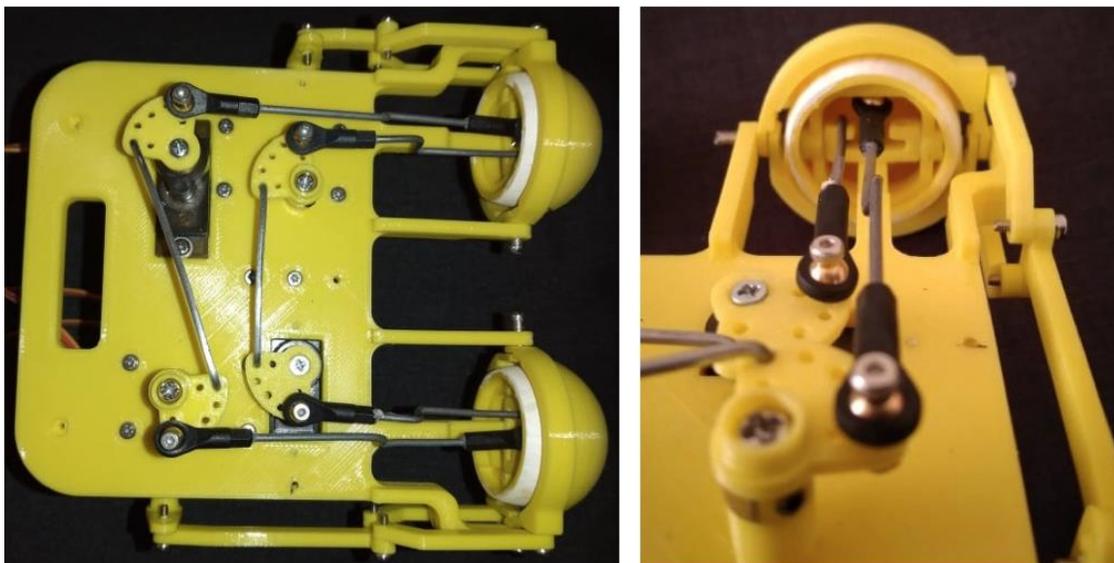
[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo		Gráfico
		Plano	H. Procesos	
[1] Divisor Frontal	0:33	A-20	B-16	
[3] Soporte Servomotor	0:24	A-21	B-17	
[1] Apoyo Labio Superior	0:22	A-22	B-18	
[1] Guía Labio (Izquierdo, Derecho)	0:14	A-23 A-24	B-19	
[1] Control de Boca (Izquierdo, Derecho)	0:38	A-25 A-26	B-20	
[1] Control de Comisuras	0:10	A-27	B-21	
[2] Fin de Comisuras	0:05	A-28	B-22	
[1] Base Soporte de Boca	3:23	A-29	B-23	
[1] Apoyo de Comisura (Izquierda, Derecha)	0:19	A-30 A-31	B-24	
[1] Dientes Superiores	0:47	A-32	B-25	
[1] Dientes Inferiores	1:30	A-33	B-26	
[1] Soporte Mentón	0:38	A-34	B-27	
[2] Sostén Servomotor Boca (A, B)	0:06	A-35 A-36	B-28	
[1] Apoyo Barra de Elevación	0:07	A-37	B-29	
[1] Articulación Universal	1:40	A-38 A-39 A-40	B-30	

[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo		Gráfico
		Plano	H. Procesos	
[1] Soporte de Elevación	1:50	A-41	B-31	
[1] Engranaje del Cuello	2:06	A-42 A-43	B-32	
[1] Base de Rodamiento	4:55	A-44	B-33	
[1] Soporte de Rotación	2:30	A-45	B-34	
[2] MG90S Brazos (Recto, en L)	0:08	A-46 A-47	B-35	
[2] MG90S Arco	0:04	A-48	B-36	
[2] Arco	0:04	A-49	B-37	
[1] MG946R Brazo	0:08	A-50	B-38	

La parte mecánica está diseñada de modo que sea factible ensamblar cada mecanismo por separado y después incorporarlos a la estructura externa. Así, tras imprimir todas las piezas correspondientes a la parte mecánica con una densidad de relleno del 40% en configuración zigzag y, en caso de ser necesario, se realiza la remoción de soportes y limpieza de elementos para facilitar el montaje. Además, los globos oculares son pintados con témpera de color blanco y, una vez finalizado el ensamble del robot, se colocan pequeños círculos impresos en papel fotográfico que aparentan el iris de los ojos de la cabeza animatrónica; así, en la Figura 71 se puede apreciar el ensamble del mecanismo de los ojos del robot, constituido por los globos oculares, párpados, elementos de control de párpados y base de soporte de servomotores.

Figura 71

Ensamble del Mecanismo de Ojos

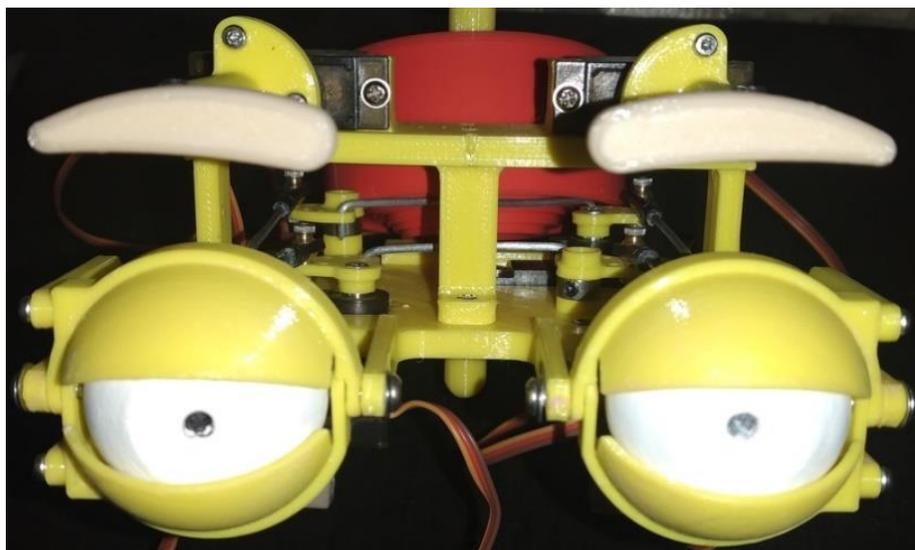


Nota. (Izquierda) Vista superior del ensamble. (Derecha) Elementos del globo ocular derecho.

En la Figura 72 se muestra el montaje de las cejas sobre el mecanismo de los ojos, las mismas se componen por una estructura de soporte y elementos de acople para los actuadores.

Figura 72

Montaje de Cejas en el Mecanismo de Ojos



La construcción continúa con el montaje de la boca, como se presenta en la Figura 73, misma que está integrada por los dientes, labios, comisuras y mentón. Adicionalmente, en el montaje se integra una articulación tipo universal, ubicada bajo la base soporte de la boca, este componente permite realizar los movimientos de rotación, extensión y flexión del cuello, y, por sus características, bloquea la inclinación lateral de la cabeza animatrónica.

Figura 73

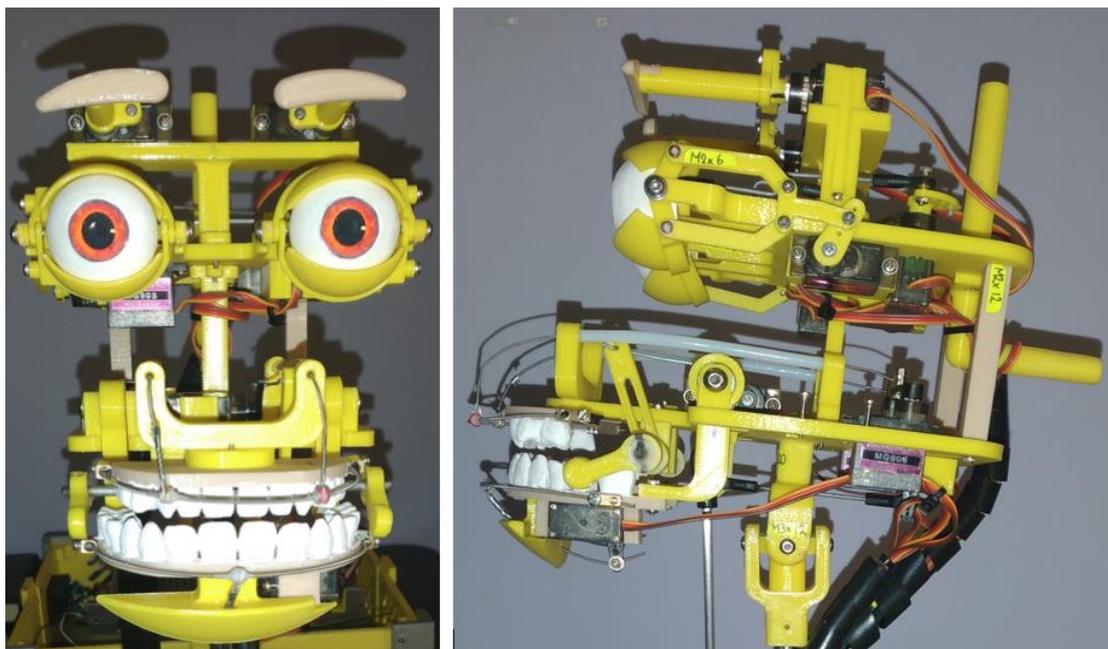
Ensamble del Mecanismo de la Boca



En la Figura 74 se aprecia la unión de los mecanismos de los ojos y boca del robot, los cuales se separan entre sí utilizando dos divisores en la parte trasera y uno en la parte frontal, igualmente se ubican apoyos en la base de soporte de los ojos, uno vertical y otro horizontal, que son de ayuda para aguantar el armazón de la cabeza. Finalmente, se ensamblan las piezas del mecanismo del cuello, presentado en la Figura 75, mismo que incluye un rodamiento rígido de bolas 6205-2RS para soportar la carga axial provocada por el peso de la cabeza animatrónica.

Figura 74

Montaje de Cejas, Ojos, Boca, Labios y Articulación Universal



Nota. (Izquierda) Vista frontal del ensamblaje. (Derecha) Vista lateral del ensamblaje, donde se aprecia la articulación tipo universal del cuello.

Figura 75

Ensamblaje del Mecanismo del Cuello

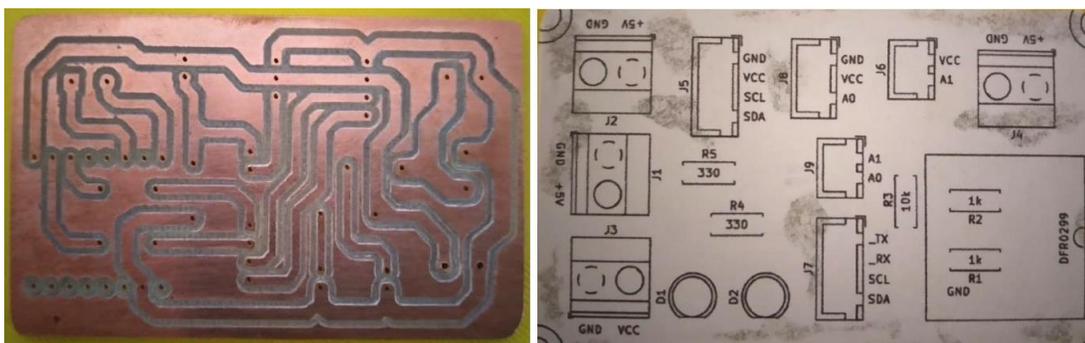


4.2. Construcción Electrónica

Una vez completado el ensamble de los mecanismos, se prosigue con la fabricación de la PCB, presentada en la Figura 76, para ello se extraen del software KiCad los archivos Gerber del circuito impreso (Anexo C), los cuales contienen información necesaria para la manufactura por medio de router CNC.

Figura 76

Vistas de Placa de Circuito Impreso



Nota. (Izquierda) Vista posterior, pistas de la PCB. (Derecha) Vista frontal, máscara de soldadura.

En la Figura 77 se presenta una vista superior de la PCB, misma que denota la colocación de la máscara de soldadura con sus componentes soldados.

Figura 77

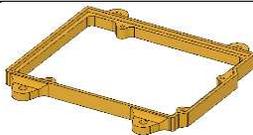
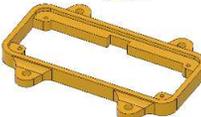
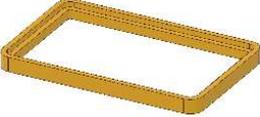
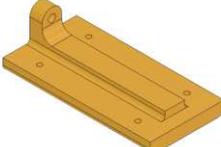
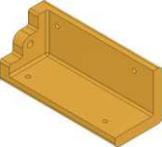
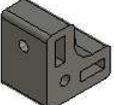
Elaboración de Placa de Circuito Impreso



La parte electrónica también se compone por elementos impresos en 3D, que en su mayoría se destinan para la caja de control; así, en la Tabla 54 se muestran las piezas con el respectivo tiempo de impresión de cada una, denominación de anexos y gráfico.

Tabla 54

Elementos de la Parte Electrónica por Imprimir

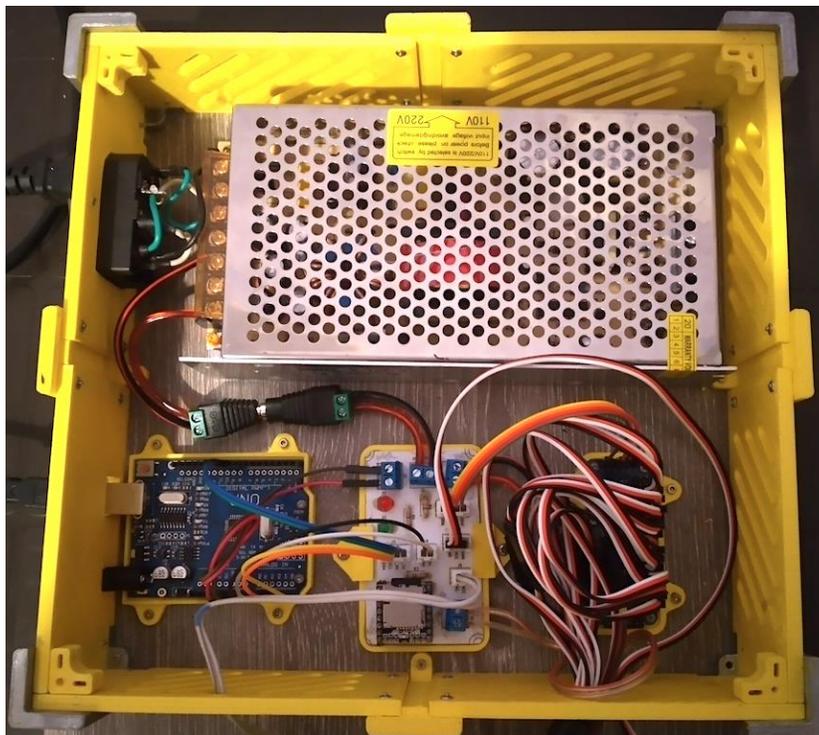
[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo		Gráfico
		Plano	H. de Procesos	
[1] Case de Arduino	0:31	A-51	B-39	
[1] Case de PCA9685	0:46	A-52	B-40	
[1] Base de PCB	0:46	A-53	B-41	
[2] Sujetador de PCB	0:07	A-54	B-42	
[1] Estante de Cámara	1:53	A-55 A-56	B-43	
[1] Tapa Caja de Control	15:12	A-57, A-58 A-59, A-60	B-44	
[4] Unión de Pared	0:41	A-61	B-45	
[4] Esquina de Caja	1:00	A-62	B-46	
[4] Ángulo de Caja	0:09	A-63	B-47	

[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo		Gráfico
		Plano	H. de Procesos	
[1] Paredes de Caja	11:59	A-64, A-65 A-66, A-67 A-68, A-69 A-70, A-71	B-48	
[1] Knob de potenciómetro	0:22	A-72	B-49	
[6] Sujetador de Torso	0:09	A-73	B-50	

La Figura 78 muestra a la fuente de poder (Anexo D), PCB, controlador y módulo, fijos dentro de la caja de control; el resto de componentes electrónicos, como son el parlante, sensor FSR y potenciómetro para el control de volumen, están colocados en el torso del robot.

Figura 78

Elementos Parte Electrónica



Al costado izquierdo de la caja de control se puede distinguir la conexión para la fuente de poder además de la comunicación serial del Arduino; por su parte, el cableado principal que ingresa a la caja de control por el extremo inferior derecho, representa los cables del parlante, sensor FSR, potenciómetro y de los 13 actuadores de la cabeza animatrónica, los cuales se llegan a ubicar en los pines del módulo PCA9685; para ello, los servomotores son designados por la nomenclatura presentada en la Tabla 55, esta hace referencia al movimiento que el actuador va a realizar e indica sus iniciales para la programación, mostrada en el Anexo E.

Tabla 55

Nomenclatura de Servomotores

Movimiento	Designación Física	Posición en PCA9685	Nombre en Programa
Ceja Izquierda	CI	1	cejalzq
Ceja Derecha	CD	2	cejaDer
Ojos Izquierda-Derecha	OID	3	ojosX
Ojos Arriba-Abajo	OAA	4	ojosY
Párpado Izquierdo	PI	5	parplzq
Párpado Derecho	PD	6	parpDer
Mandíbula	MA	7	boca
Labio Superior Derecho	LSD	8	labSDer
Labio Superior Izquierdo	LSI	9	labSlzq
Labio Inferior	LI	10	labInf
Elevación Labios (Comisuras)	EL	11	labElev
Elevación de Cuello	NE	12	cueElev
Rotación de Cuello	NR	13	cueRota

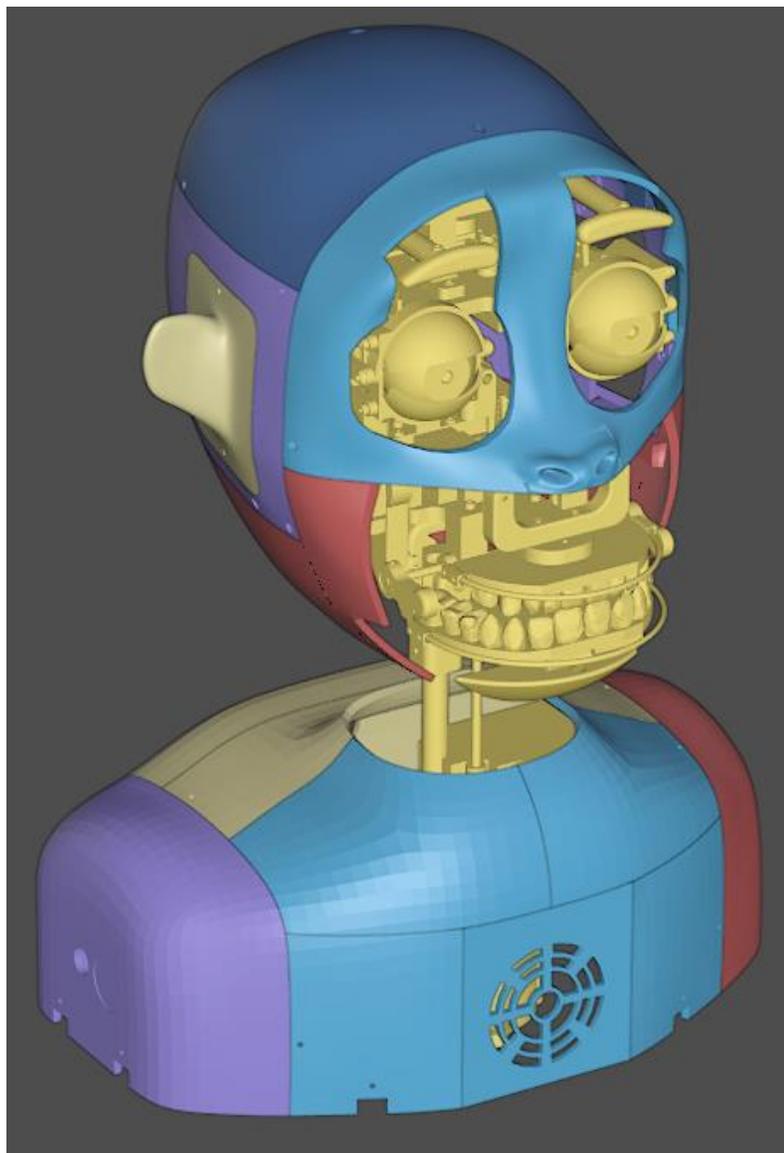
4.3. Construcción Estética

Los parámetros estéticos planteados para la cabeza animatrónica involucran el empleo de un rostro con atributos caricaturescos y de aspecto amigable, mismo que está compuesto por dos estructuras externas como se indica en la Figura 79, una destinada a la cabeza del robot, encargada de proteger a los componentes de los ojos, boca y labios; y otra para el torso, que

resguarda al mecanismo del cuello. Dichas estructuras también sirven de soporte para el pelaje y la piel del robot.

Figura 79

Modelo de la Cabeza Animatrónica con Estructuras Externas

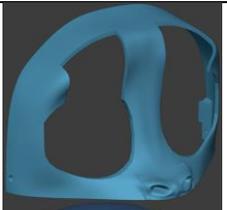
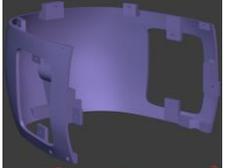
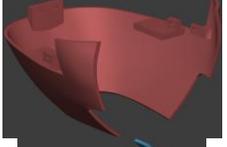
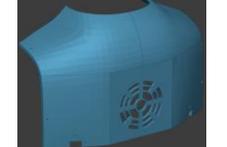
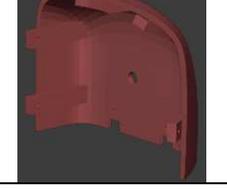


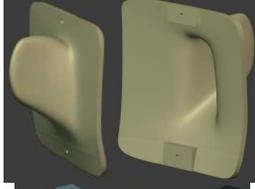
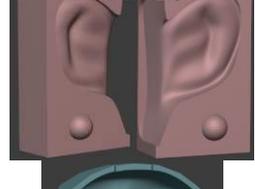
Además, para formar la piel de la cabeza animatrónica se requiere el uso de moldes, tanto para el rostro como para las orejas. Así, es posible considerar que la construcción estética del robot se compone por un conjunto de piezas impresas en 3D como se presentan en la Tabla

56, las cuales están diseñadas en el software Blender y son destinadas para la estructura externa y para los moldes.

Tabla 56

Desglose de Elementos de la Parte Estética por Imprimir

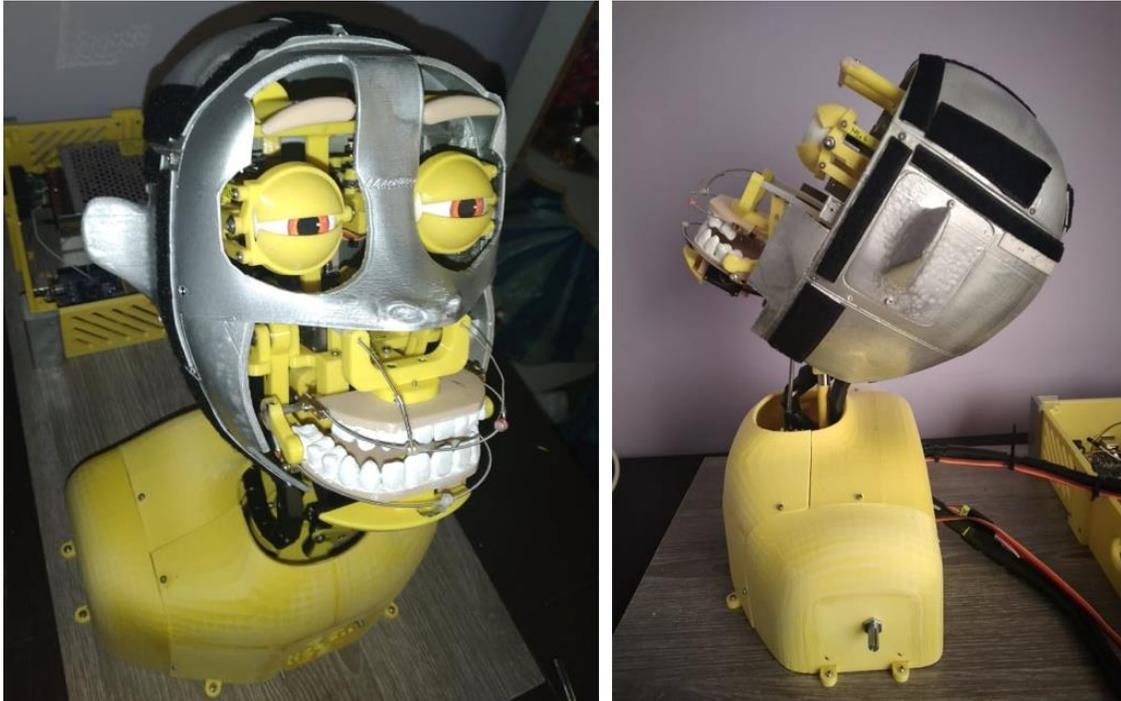
[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo Hoja de Procesos	Gráfico
[1] Cabeza Sector Frontal	9:43	B-51	
[1] Cabeza Sector Superior	8:51	B-52	
[1] Cabeza Sector Medio	13:01	B-53	
[1] Cabeza Sector Inferior	6:21	B-54	
[1] Torso Parte Frontal	5:15	B-55	
[1] Torso Parte Posterior	4:30	B-56	
[1] Torso Hombro Derecho	3:28	B-57	
[1] Torso Hombro Izquierdo	3:26	B-58	

[Cantidad] Nombre	Tiempo de Impresión (H:m)	Anexo Hoja de Procesos	Gráfico
[1] Oreja Interna (Izquierda, Derecha)	4:13	B-59	
[1] Molde A Oreja Externa (Izquierda, Derecha)	5:16	B-60	
[1] Molde B Oreja Externa (Izquierda, Derecha)	7:20	B-61	
[1] Máscara Molde Negativo	14:45	B-62	
[1] Máscara Molde Positivo	12:20	B-63	

Una vez se hayan fabricado todos los elementos, se procede a agrupar las piezas que forman la estructura externa de la cabeza y el torso, mismas que son integradas a los demás mecanismos del robot por pernos para que se mantengan fijas. En la Figura 80 se presenta el ensamble final de la cabeza animatrónica, donde se muestra el armazón de la cabeza, pintado de color plateado y también se aprecian espacios con velcro, estos son colocados para poder sujetar el pelaje a la base de la cabeza.

Figura 80

Ensamble Estructura Externa de Cabeza y Torso



Nota. (Izquierda) Vista frontal del ensamble. (Derecha) Vista lateral del ensamble del robot.

4.3.1. Elaboración de la Piel

A partir de los moldes impresos en 3D se procede con la manufactura de la piel para el rostro y orejas del robot, para ello se utiliza caucho de silicona Smooth-On EcoFlex 00-20, material capaz de replicar la elasticidad de la piel humana con un tiempo de trabajo de 30 minutos y 4 horas de curado, mismo que se compone por un radio de mezcla uno a uno tanto por volumen como por peso. El paquete de silicona tiene un peso neto de 2 libras, el cual está distribuido en dos compuestos, llamados solución A y B, estos deben ser combinados en partes iguales.

En la Figura 81 se muestran los moldes, positivo y negativo, para la elaboración de la piel del rostro de la cabeza animatrónica.

Figura 81

Moldes del Rostro de la Cabeza Animatrónica



Nota. (Izquierda) Molde negativo del rostro. (Derecha) Molde positivo del rostro.

Antes de iniciar el procedimiento, es necesario detallar los demás materiales que se usan en la elaboración de la piel, siendo estos: una balanza electrónica de cocina capaz de medir pequeños pesos, una lata de aerosol de agente desmoldante “Mann Ease Release 200” que es adecuada para trabajar con polímeros de silicona y pintura acrílica en varios colores.

Primero, se prepara la silicona, como se indica en la Figura 82, se agregan dentro de un recipiente 220 gr de caucho de silicona (110 gr por cada solución) y 15 gr de pintura acrílica (8 gr amarillo piel, 4 gr marrón, 2 gr amarillo y 1 gr rojo) para formar un color semejante a la piel humana; estos elementos se mezclan muy bien durante 2 minutos hasta tener una consistencia uniforme, misma que tiene un peso total de 235 gr. A fin de extraer las burbujas de aire que se integran en la mezcla al momento de revolver la silicona, se procede a golpear repetidamente el recipiente con suavidad y se deja reposar por aproximadamente 5 minutos.

Figura 82

Mezcla de Silicona con Pintura Acrílica



Hasta que la mezcla repose, es indispensable preparar los moldes del rostro, para ello se rocía muy bien con agente desmoldante a los moldes positivo y negativo, intentando cubrir todas las cavidades presentes en los mismos, este proceso se realiza a fin de crear una delgada capa o película impermeable en la superficie de los moldes, la cual funciona como repelente de silicona para que el polímero no se pegue a la impresión 3D y para que después se pueda retirar la silicona del molde con facilidad.

Una vez transcurrido el tiempo de reposo, se vierten 180 gr de silicona en el punto más bajo del molde negativo del rostro como se aprecia en la Figura 83, para ello se aleja la mezcla del molde una distancia aproximada de 30 cm o hasta que la silicona descienda en forma de hilo, esto sirve para evitar la incorporación de aire y para eliminar las burbujas residuales de la mezcla. Los 40 gr restantes de la mezcla de silicona serán empleados para la formación de las orejas de la cabeza animatrónica.

Figura 83

Vaciado de Silicona Dentro del Molde Negativo del Rostro



Nota. (Izquierda) Vaciado en molde negativo. (Derecha) Molde positivo del rostro.

La Figura 84 presenta la distribución uniforme de silicona sobre el molde negativo, al cual después, se le ubica el positivo del rostro, asegurando las muescas al borde de los moldes.

Figura 84

Colocación del Molde Positivo del Rostro



Nota. (Izquierda) Distribución de silicona en negativo. (Derecha) Colocación del molde positivo.

A continuación, se preparan los moldes de las orejas, izquierda y derecha. El molde está descrito por un positivo (modelo interno de la oreja) y por moldes A y B (particiones del molde negativo); así, en la Figura 85 se muestran los moldes A y B de una oreja del robot.

Figura 85

Moldes de la Oreja Izquierda del Robot



Para evitar fugas, se usan correas que ajustan los laterales del molde, una vez seguros, se rocía una capa de agente desmoldante y después de 5 minutos se agregan 20 gr de silicona a cada oreja, hasta llenar la mitad de los moldes y se introduce al molde el positivo de las orejas con cuidado de no desbordar la silicona como se muestra en la Figura 86.

Figura 86

Vaciado de Piel de las Orejas del Robot

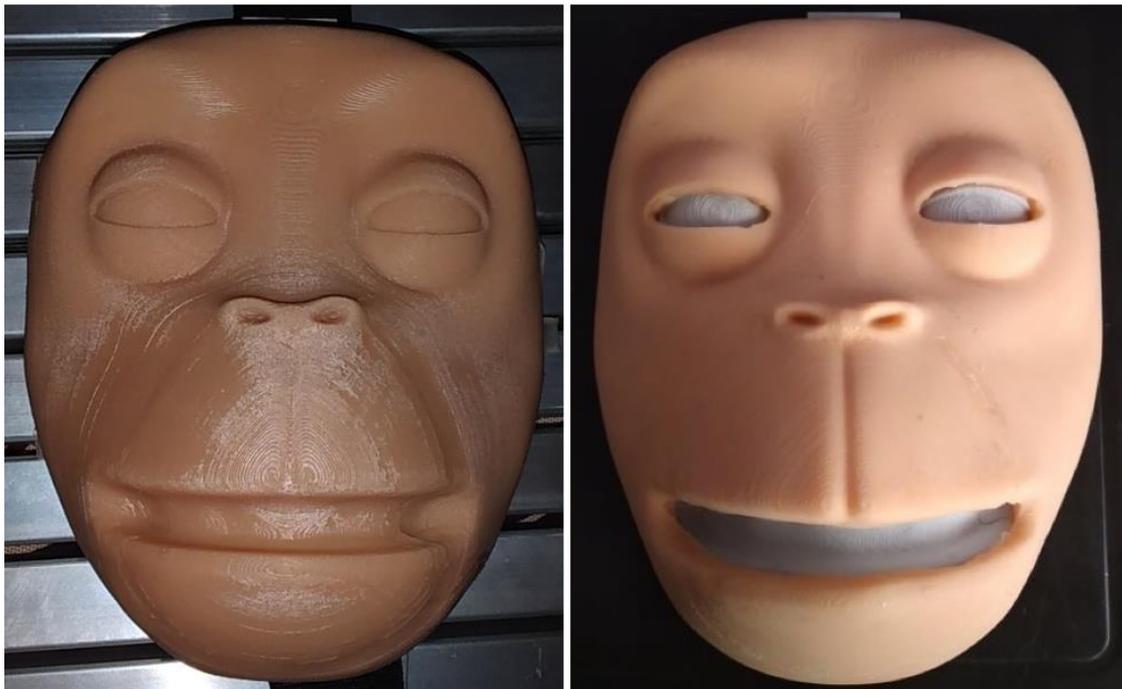


Nota. (Izquierda) Molde oreja izquierda. (Derecha) Molde oreja derecha.

De vuelta con el rostro, es necesario fijar correctamente el positivo para que este no se mueva y se deja solidificar la silicona por un mínimo de 4 horas. Pasado este lapso de tiempo, se separan cuidadosamente los moldes, los cuales dan como resultado una máscara y dos orejas de silicona con todas las características estéticas diseñadas. Posteriormente, se lava la máscara y las orejas con jabón y agua tibia para retirar el agente desmoldante y se aplica una fina capa de talco en ambos lados de la silicona para corregir lo pegadizo de la misma; además, en el caso del rostro, se recortan los globos oculares y la boca del robot como se observa en la Figura 87.

Figura 87

Solidificación y Preparación de la Piel del Rostro



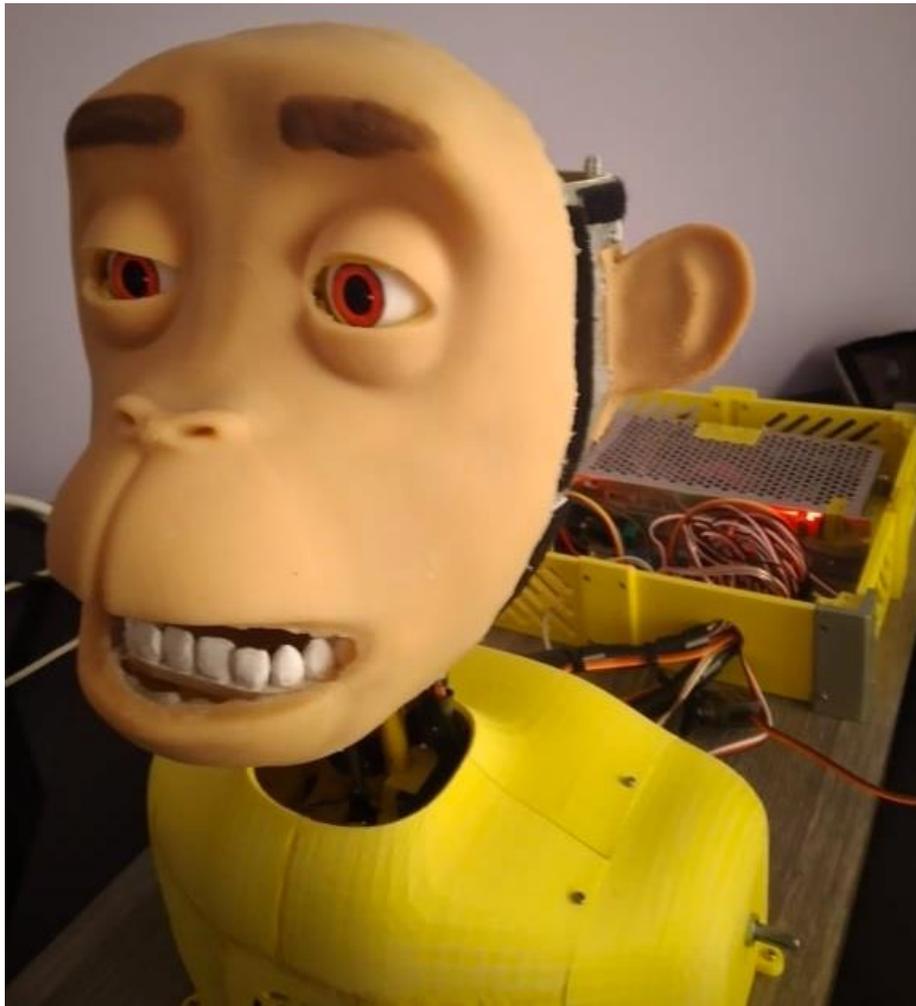
Nota. (Izquierda) Producto resultante de los moldes del rostro. (Derecha) Máscara preparada y con los espacios de los ojos y boca recortados.

Después, se pega la máscara y las orejas de silicona a la estructura externa utilizando un pegamento especial para silicona, mismo que por recomendaciones del fabricante del caucho de

silicona usada para la fabricación de la piel del robot es “Smooth-On Sil-Poxy”, adhesivo que cuenta con un tiempo de trabajo de 5 minutos y 12 minutos de curado. La Figura 88 muestra la estructura externa del robot con la máscara y orejas de silicona adheridas.

Figura 88

Instalación de Máscara y Orejas en la Estructura Externa



Finalmente, como se muestra en la Figura 89, la parte estética del robot se completa al cerrar y la estructura externa de la cabeza y torso, en este punto se coloca una tela de felpa que simula el pelaje de un animal y que sirve de recubrimiento de la cabeza animatrónica, la misma se ubica en tiras de velcro pegadas en la estructura.

Figura 89

Ubicación del Pelaje de la Cabeza Animatrónica



4.4. Programación

Como se menciona en el capítulo de diseño, para el control del robot se implementan dos GUIs programadas en Python con el paquete de diseño de interfaces gráficas Tkinter, las cuales son enlazadas por comunicación serial con la tarjeta controladora. Por ende, es de vital

importancia instalar de una manera adecuada los diferentes programas, librerías y paquetes para el desarrollo del sistema de control; de forma general, la programación del robot se destina a la interfaz gráfica y a la tarjeta de controladora. Así, la Tabla 57 muestra los paquetes usados en el desarrollo del sistema de control y que son instalados en un entorno virtual.

Tabla 57

Paquetes Instalados en el Entorno Virtual

Paquete	Versión	Uso
Pillow	8.2.0	Manejo de imágenes
cmake	3.18.	Compilador para librerías de C++ (requisito de la librería dlib)
dlib	19.22.0	Algoritmos de <i>machine learning</i> (requisito de face-recognition)
face-recognition	1.3.0	Detección y reconocimiento de rostros
gTTs	2.2.3	Texto a voz
numpy	1.20.2	Análisis de datos y cálculo numérico
opencv-contrib-python	4.5.1.48	Algoritmos de visión artificial complementarios
opencv-python	4.4.0.46	Algoritmos de visión artificial
pygame	2.0.1	Módulo de diseño de juegos (requisito de gTTs)
pyserial	3.5	Comunicación por puerto serial

4.4.1. Programación de GUIs

El directorio de la programación del presente proyecto de titulación se conforma principalmente por dos carpetas de almacenamiento de figuras e información de la interfaz (App_Img y Users_Dataset) y por los programas: “GUI_Monkey.py”, “GUI_Vision.py” y “TTS_sonidos.py”, además del archivo de entrenamiento “haarcascade_frontalface_alt2.xml” para la detección de rostros. Debido a la gran cantidad de líneas de código de estos programas, los mismos son mostrados en los anexos.

CAPÍTULO V

5. Pruebas y análisis de resultados

El presente capítulo describe las pruebas de funcionamiento de la cabeza animatrónica, mismas que se destinan a probar la destreza en mostrar emociones mediante la gesticulación de expresiones faciales y en determinar si los resultados son los esperados. Para ello, se hace uso de la recopilación de datos del usuario con sus respectivos resultados y mediante pruebas se valida la funcionalidad del robot.

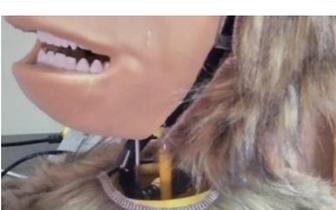
5.1. Pruebas de Funcionamiento

Para comprobar las capacidades mecánicas del robot es necesario especificar puntos críticos a evaluar, siendo estos: un rango de movilidad adecuado para los ojos, cejas, boca, labios, comisuras y cuello del robot; y la destreza de combinar distintos movimientos para mostrar las seis expresiones universales. En la Tabla 58 se indican los distintos movimientos que puede ejecutar la cabeza animatrónica.

Tabla 58

Capacidades Mecánicas del Robot

Elemento	Rango de Movilidad	Movimiento Mínimo	Movimiento Máximo
Cejas	70°		
Ojos (Horizontal)	50°		
Ojos (Vertical)	70°		
Párpados	50°		

Elemento	Rango de Movilidad	Movimiento Mínimo	Movimiento Máximo
Labio Superior Izquierdo	40°		
Labio Superior Derecho	50°		
Labio Inferior	50°		
Comisuras	100°		
Maxilar Inferior	40°		
Cuello (Elevación)	40°		
Cuello (Rotación)	90°		

A su vez, es importante indicar las expresiones faciales que puede realizar el robot, las cuales son desarrolladas tomando en cuenta las combinaciones entre las AU descritas en la investigación, pero con ciertas restricciones debido a la optimización del diseño. La Tabla 59 muestra las emociones universales del robot con sus unidades de acción correspondientes.

Tabla 59

Combinación de Unidades de Acción del Robot

Emoción	Descripción	AU
Felicidad	Leve cierre de párpados y levantamiento de comisuras.	6 + 12
Ira	Depresión de cejas, apertura de párpados y elevación del labio superior.	4 + 5 + 10
Tristeza	Cierre de párpados, depresión de cejas y comisuras.	4 + 6 + 15
Asco	Elevación del labio superior, depresión de comisuras y descenso del labio inferior.	10 + 15 + 16
Sorpresa	Apertura de párpados y caída de mandíbula.	5 + 26
Miedo	Levantamiento de cejas, apertura de párpados y mandíbula ligeramente caída.	4 + 5 + 26

Esta diversidad de combinaciones es mostrada en la Figura 90, donde se detallan capturas de la cabeza animatrónica realizando las seis emociones universales.

Figura 90

Emociones Universales de la Cabeza Animatrónica

Nota. Expresiones faciales de izquierda a derecha: (1) felicidad, (2) tristeza, (3) ira, (4) sorpresa, (5) asco y (6) miedo.

5.2. Valoración de Usuarios

El proyecto está dirigido a niños y niñas con TEA en edad escolar, a quienes se considera como pacientes y, por ello, son destinados a realizar las cuatro actividades de la interfaz gráfica de control; además, la cabeza animatrónica también está destinada a trabajar con adultos, a quienes se considera como especialistas, mismos que ayudan a los niños en la ejecución de actividades y a los cuales se dirigen principalmente las funciones en la interfaz de control para el control manual y automático del robot y las funciones de seguimiento y reconocimiento facial en la interfaz para el sistema de visión artificial.

5.3. Método de Evaluación

El proyecto fue desarrollado y está enfocado a la interrelación con niños con TEA, pero por las circunstancias mundiales de pandemia, se vio limitado el acceso a realizar pruebas con los mismos, por ende, en las pruebas únicamente participan niños con desarrollo típico.

Se opta por dos métodos de evaluación, uno orientado a niños y otro para adultos. El primero denota el uso del robot por parte de los pacientes, para ello se realizan tres pruebas con cuatro usuarios, como se muestra en la Tabla 60, con quienes se trabaja por sesiones, con una frecuencia de dos veces por semana, cada sesión tiene una duración aproximada de 15 minutos, en la cual se realizan las actividades de reconocimiento de emociones, considerando una pausa de 1 minuto entre actividades.

Adicionalmente, las funciones del sistema de visión se desarrollan al final de cada sesión, después de un descanso de 2 a 3 minutos; así, el primer método de evaluación es de observación, donde se recogen datos de los aciertos y fallos que tienen los usuarios cada sesión cuando realizan las actividades “3. Reconocer Expresiones” y “4. ¿Cómo me siento?”.

Tabla 60

Datos de los Usuarios (Niños)

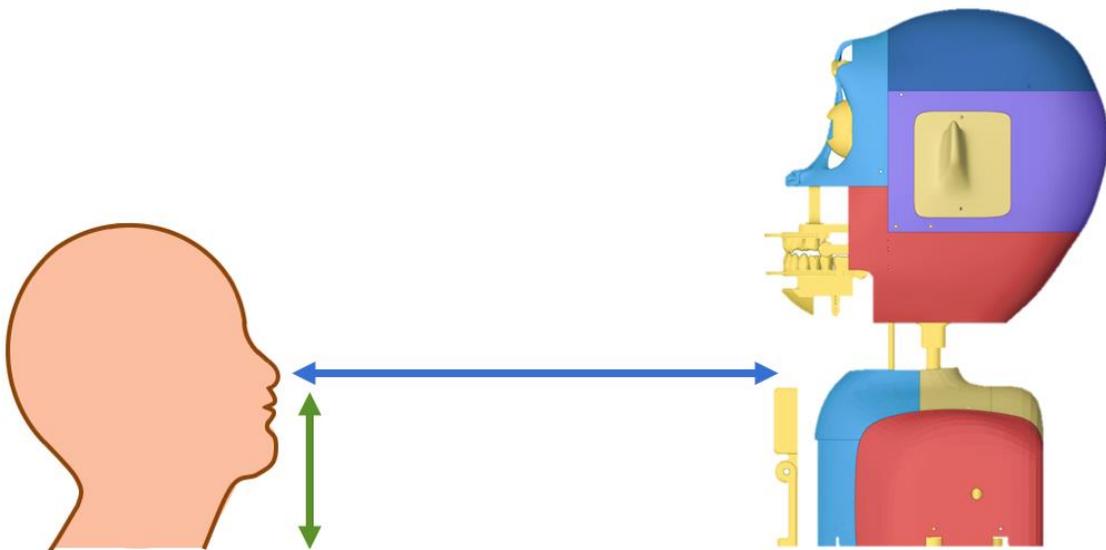
Asignación	Nombre	Género	Edad (años)	Fotografía
Usuario 1	Damián Ch.	Masculino	6	
Usuario 2	Bryan Ch.	Masculino	8	
Usuario 3	Maximiliano C.	Masculino	8	
Usuario 4	Naomi M.	Femenino	7	

Es importante recalcar que para el uso del robot se requiere un computador, la pantalla del mismo debe tener una separación mínima de 50 cm con el usuario, además, para la correcta ejecución de las funciones de seguimiento y reconocimiento facial es necesario considerar un distanciamiento mínimo entre el lente de la cámara y el rostro del usuario como se observa en

la Figura 91, en la cual se recomienda una separación horizontal de 60 cm y vertical de 15 cm, no obstante, las pruebas de funcionamiento de los algoritmos de visión artificial indican que estos trabajan adecuadamente cuando el rostro se encuentra separado horizontalmente entre 30 a 120 cm del lente, inclusive en entornos con iluminación ambiente (iluminación no controlada), en parte por las buenas características de la cámara.

Figura 91

Distancia Entre el Usuario y el Robot



Nota. Las flechas de la figura representan el distanciamiento recomendado para el correcto funcionamiento del robot, la flecha de color azul indica la separación horizontal mientras que la flecha verde la separación vertical.

Posteriormente, como segundo método de evaluación se utiliza la encuesta, técnica aplicada a cinco personas adultas una vez completadas las pruebas de funcionamiento, para averiguar sus opiniones sobre el proyecto; además, las encuestas también se enfocan en obtener información adicional de la facilidad de uso, destreza en mostrar emociones y el nivel de interacción del robot.

5.3.1. Procedimiento de Pruebas

El procedimiento para encender la cabeza animatrónica desde cero y para realizar las pruebas de la interfaz de control con los niños considera los siguientes pasos, mismos que deben ser ejecutados por el adulto o especialista a cargo de la terapia:

1. Conectar el cable de alimentación a la fuente poder y el cable de comunicación serial del controlador al computador.
2. Presionar el interruptor de la caja de control para encender el robot.
3. En el computador abrir el programa de la GUI de control, una vez cargada la interfaz, en la lista desplegable de la pantalla de inicio, seleccionar el puerto serial correspondiente a la tarjeta Arduino.
4. Presionar “EMPEZAR” para mostrar la pantalla de actividades del robot.
5. Seleccionar la opción “1. Saludo de Presentación” y escuchar el mensaje de la cabeza animatrónica.
6. Una vez completada la actividad, presionar “ACTIVIDADES” para regresar a la pantalla anterior.
7. Seleccionar la opción “2. Emociones Básicas” y proceder por todas las plantillas, mostrando al niño los puntos clave de cada emoción.
8. Una vez completada, presionar “Terminar” para ir a la pantalla de actividades.
9. Seleccionar la opción “3. Reconocer Expresiones”, la cual muestra el submenú de la actividad y presionar el primer botón “Ilustración #1”.
10. Dejar que el niño realice la actividad planteada y apuntar los aciertos y fallos para cada plantilla; además, registrar el tiempo que tarda el niño en terminar la actividad. El retorno al submenú es automático al finalizar las plantillas.

11. Presionar el segundo botón “Ilustración #2” del submenú. Al presentarse las plantillas, apuntar el número de aciertos, fallos y tiempo que tarda el niño en completar la actividad. Al finalizar, presionar en “Terminar” para volver a la pantalla de actividades.
12. Seleccionar la opción “4. ¿Cómo me siento?”, igual al paso anterior, registrar el número de aciertos, fallos y tiempo que transcurre hasta completar la actividad.
13. Una vez finalizada la prueba, pulsar “Terminar” para regresar a la pantalla de actividades y para pulsar “SALIR” para cerrar el programa.

5.4. Resultados

En la Tabla 61 se presentan los resultados de las pruebas realizadas a los niños durante tres sesiones distintas sobre las actividades de la interfaz de control “Reconocer Expresiones” y “¿Cómo me siento?”, para todas las pruebas se considera un apartado para registrar el tiempo en segundos que tarda el usuario en terminar y también el número de aciertos y equivocaciones que se dan en la selección de emoción de cada plantilla.

Tabla 61

Resultados de las Actividades de la Interfaz de Control (Niños)

Participante	Día	Plantilla						Tiempo (segundos)	Aciertos	Fallos
		1	2	3	4	5	6			
Reconocimiento de Emociones (Ilustración #1)										
Usuario 1	1	O	O	O	O	X	O	56	5	1
	2	O	O	O	O	O	O	55	6	0
	3	O	O	O	O	O	O	45	6	0
Usuario 2	1	O	X	O	O	O	O	24	5	1
	2	O	X	O	O	O	O	26	5	1
	3	O	O	O	O	O	O	25	6	0
Usuario 3	1	O	O	O	O	O	X	40	5	1
	2	O	O	O	O	O	O	40	6	0
	3	O	O	O	O	O	O	37	6	0

Participante	Día	Plantilla						Tiempo (segundos)	Aciertos	Fallos
		1	2	3	4	5	6			
Usuario 4	1	0	0	0	0	0	0	53	6	0
	2	0	0	0	0	0	0	50	6	0
	3	0	0	0	0	X	0	49	5	1
Total								500	67	5
Reconocimiento de Emociones (Ilustración #2)										
Usuario 1	1	0	0	0	0	0	0	30	6	0
	2	0	0	0	0	0	0	32	6	0
	3	0	0	0	0	0	0	31	6	0
Usuario 2	1	0	0	0	0	0	0	25	6	0
	2	0	X	0	0	0	0	20	5	1
	3	0	X	0	0	0	0	21	5	1
Usuario 3	1	0	0	0	0	0	0	27	6	0
	2	0	0	0	0	0	0	25	6	0
	3	0	0	0	0	0	0	25	6	0
Usuario 4	1	0	X	0	0	0	X	40	4	2
	2	0	0	0	X	0	0	38	5	1
	3	0	0	0	0	0	0	37	6	0
Total								351	67	5
¿Cómo me siento?										
Usuario 1	1	0	X	0	0	0	X	77	4	2
	2	0	0	0	0	0	0	70	6	0
	3	0	0	0	0	X	0	65	5	1
Usuario 2	1	0	0	0	0	0	X	36	5	1
	2	0	0	0	0	0	0	38	6	0
	3	0	0	0	0	0	0	35	6	0
Usuario 3	1	0	0	0	0	0	0	50	6	0
	2	0	0	0	0	0	0	46	6	0
	3	0	0	0	0	0	0	40	6	0
Usuario 4	1	0	X	0	0	X	0	48	4	2
	2	0	0	0	0	0	0	50	6	0
	3	0	0	0	0	X	0	45	5	1
Total								600	65	7

Adicionalmente, como se menciona en los métodos de evaluación, una vez terminada la prueba de funcionamiento destinada a los adultos tanto en la interfaz de control como en la de visión artificial, se aplica a los participantes una encuesta. Así, en la Tabla 62 se observan las

respuestas para las preguntas de criterio cerrado con su respectivo resultado tabulado, mientras que la Tabla 63 presenta los resultados de las preguntas cualitativas.

Tabla 62

Resultados de las Encuestas para las Preguntas de Criterio Cerrado

N.	Pregunta	Resultado	
		Si	No
1	¿Alguna vez usted ha participado/trabajado con un robot animatrónico capaz de gesticular emociones faciales?	0	5
2	¿Considera que el aspecto de la cabeza animatrónica es agradable y permitirá explicar y demostrar las emociones universales a los niños?	5	0
3	¿Considera que existe interés por parte de los niños en el robot?	5	0
4	¿Considera que el robot pueda servir como una alternativa al tratamiento y terapia de niños en edad escolar?	4	1
5	¿Cree que el robot tiene una interfaz gráfica entendible?	4	1
6	¿Estima que es fácil manipular el robot?	4	1
7	¿Considera que el robot sea ruidoso?	2	3
8	¿Le parece que el sistema de visión realiza un buen trabajo de seguimiento y reconocimiento facial?	3	2
9	¿Cree que existe ambigüedad en alguna emoción de la cabeza animatrónica?	1	4

Tabla 63

Resultados de las Encuestas para las Preguntas Cualitativas

N.	Pregunta	Resultado		
		Muy Buena	Buena	Mala
10	¿Cómo considera que son las actividades de la GUI de control?	4	1	0
11	¿Cómo considera que son las funciones del sistema de visión artificial?	3	2	0
12	¿En general, la capacidad del robot para mostrar las emociones universales es?	5	0	0
13	¿La destreza del robot para mostrar FELICIDAD es?	5	0	0
14	¿La destreza del robot para mostrar IRA es?	5	0	0
15	¿La destreza del robot para mostrar TRISTEZA es?	4	1	0
16	¿La destreza del robot para mostrar ASCO es?	3	2	0
17	¿La destreza del robot para mostrar SORPRESA es?	5	0	0
18	¿La destreza del robot para mostrar MIEDO es?	4	1	0

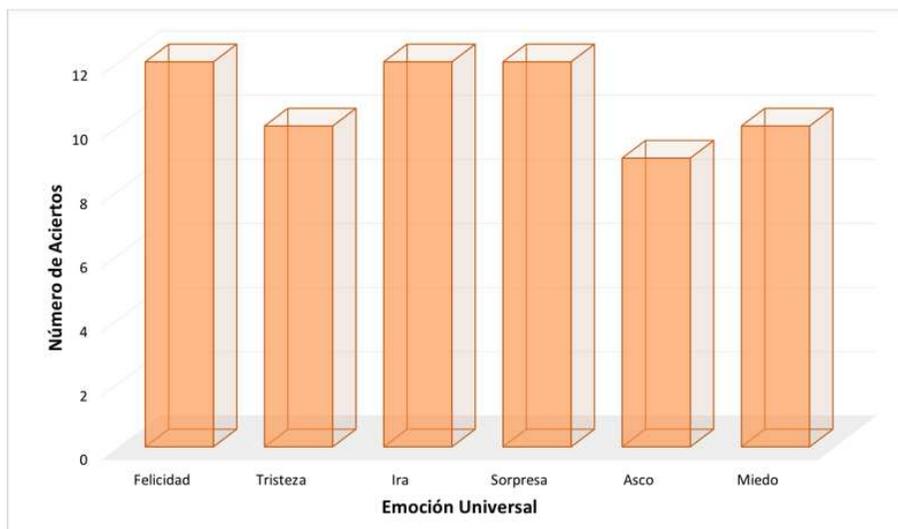
5.4.1. Interpretación de Resultados

Las actividades del “Reconocimiento de Emociones” son mayormente usadas para familiarizar a los niños con las características clave de cada emoción, en el caso de las plantillas con la primera ilustración se encuentra que para su resolución se tiene un tiempo promedio de 41.7 segundos y presenta más fallos (2) en la selección de las emociones de ira y miedo, pero es importante mencionar que solo el Usuario 2 se equivoca en la selección de la emoción de ira, dicho participante tiene un tiempo promedio de resolución de 25 segundos, valor mucho menor que la media de los demás usuarios por lo que es posible que los fallos sean provocados por clics involuntarios. Para las plantillas de la segunda ilustración, los resultados muestran que los niños completan la actividad en un tiempo promedio de 29.25 segundos y los fallos más usuales (3) se dan al seleccionar la emoción de tristeza.

Los resultados de la actividad “¿Cómo me siento?” entregan datos mejor elaborados sobre la interacción del proyecto con los niños ya que las plantillas de esta actividad tienen como gráficos de las emociones a fotografías de la cabeza animatrónica, mismas que se acompañan con movimientos de los mecanismos del robot. Además, para la resolución de esta actividad por parte de los participantes se tiene un promedio de 50 segundos, valor sacado de la media de cada día. En la Figura 92 se presenta el análisis de la actividad “¿Cómo me siento?” entre el número de aciertos por parte de los cuatro participantes y la emoción universal mostrada en cada plantilla, en el mismo se puede observar que las emociones de felicidad, ira y sorpresa son las que mejor expresa la cabeza animatrónica, llegando al máximo de aciertos; asimismo, se refleja una ligera equivocación para las emociones de tristeza y miedo expresadas por el robot con 10 de 12 aciertos y finalmente se puede distinguir que la emoción de asco es la más compleja o difícil de reconocer de las seis emociones universales.

Figura 92

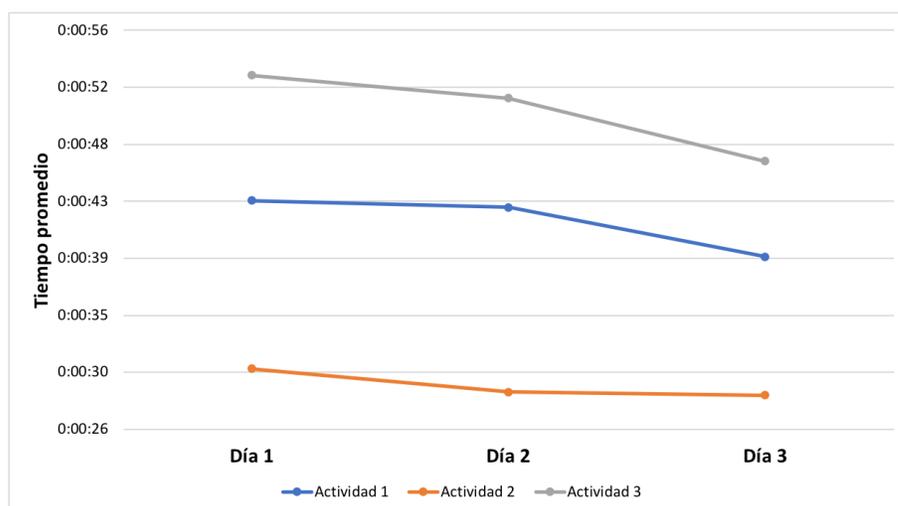
Análisis de Aciertos para Actividad ¿Cómo me siento?



Analizando el promedio de tiempo que tardan los usuarios en completar las tres actividades, como se observa en la Figura 93, es posible denotar que a medida que pasan los días el tiempo que requieren llega a ser menor para todas las actividades, pero se destaca “¿Cómo me siento?” con una reducción de 7 segundos en comparación con el primer día.

Figura 93

Análisis del Tiempo Promedio de los Participantes



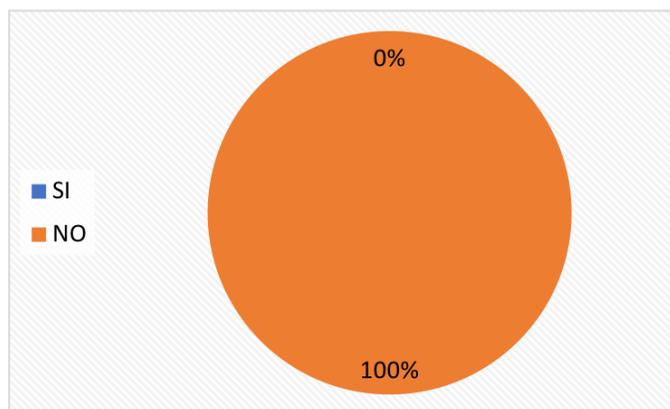
Adicionalmente, una característica técnica que debe tomarse en cuenta al realizar las diferentes actividades del robot es el nivel de ruido, para lo cual se ajusta el control de volumen en la posiciones mínima y máxima, y con una aplicación de celular se miden los decibeles que genera el parlante, dicho valor se encuentra entre los 20 a 62 dB.

5.4.2. Tabulación de Encuestas

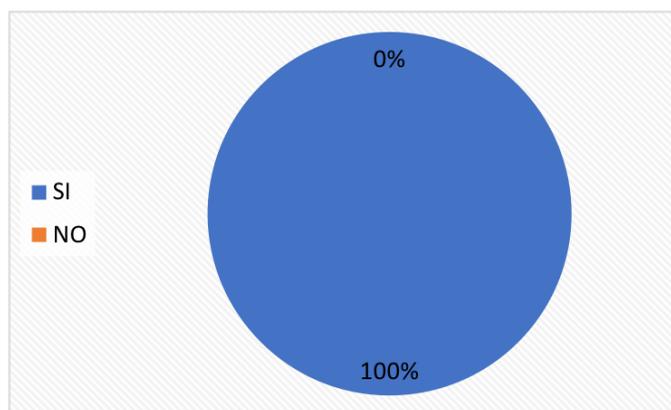
En la Figura 94 se muestran los resultados para la pregunta 1 de la encuesta: ¿Alguna vez usted ha participado/trabajado con un robot animatrónico capaz de gesticular emociones faciales?, la cual detalla que en su totalidad los adultos no han trabajado con este tipo de tecnología.

Figura 94

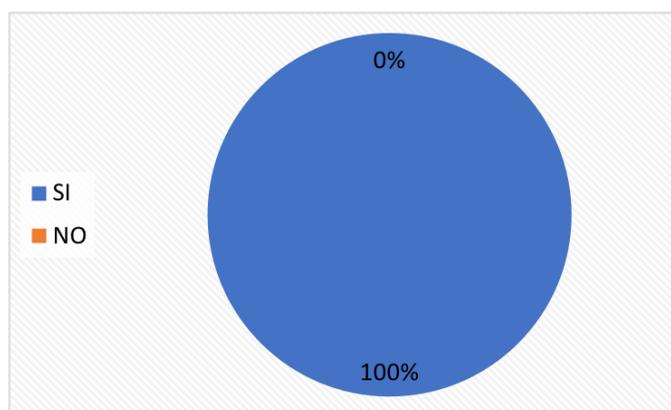
Resultados de la Pregunta 1



Los resultados a la pregunta 2: ¿Considera que el aspecto de la cabeza animatrónica es agradable y permitirá explicar y demostrar las emociones universales a los niños?, presentados en la Figura 95 permite conocer que los adultos en su totalidad consideran que el robot tiene una apariencia estética agradable y creen que puede demostrar correctamente las emociones universales a los niños.

Figura 95*Resultados de la Pregunta 2*

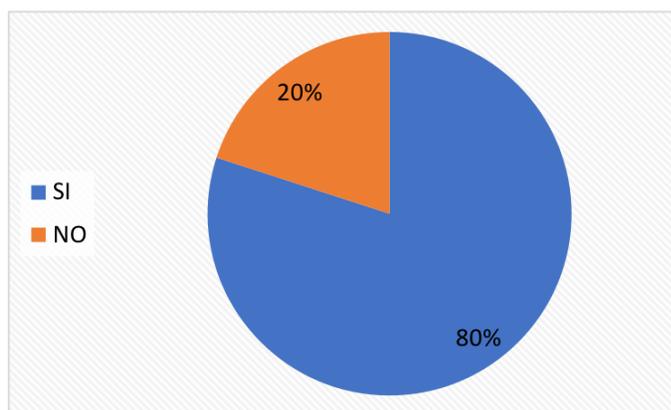
En la Figura 96 se muestran los resultados para la pregunta 3: ¿Considera que existe interés por parte de los niños en el robot?, en la cual se observa que el 100% de los adultos está de acuerdo con la consideración de que los niños muestran interés a la cabeza animatrónica.

Figura 96*Resultados de la Pregunta 3*

En la Figura 97 se exhiben los resultados de la pregunta 4: ¿Considera que el robot pueda servir como una alternativa al tratamiento y terapia de niños en edad escolar?, donde el 80% de adultos consideran que el robot puede ser útil en el campo del tratamiento y terapia de niños.

Figura 97

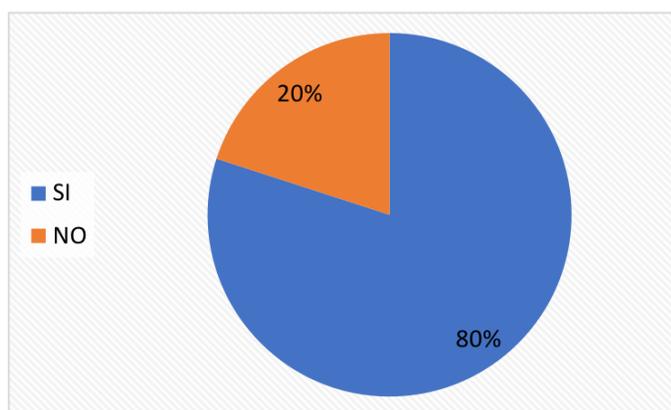
Resultados de la Pregunta 4



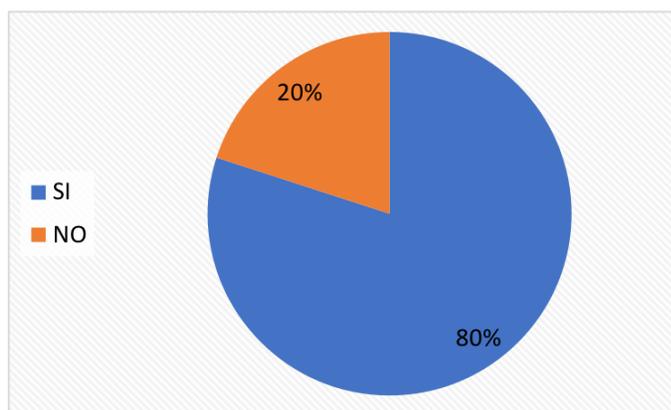
La Figura 98 indica los resultados de la pregunta 5: ¿Cree que el robot tiene una interfaz gráfica entendible?, donde el 80% de encuestados menciona que la GUI tanto para el control como para el sistema de visión artificial del robot es entendible.

Figura 98

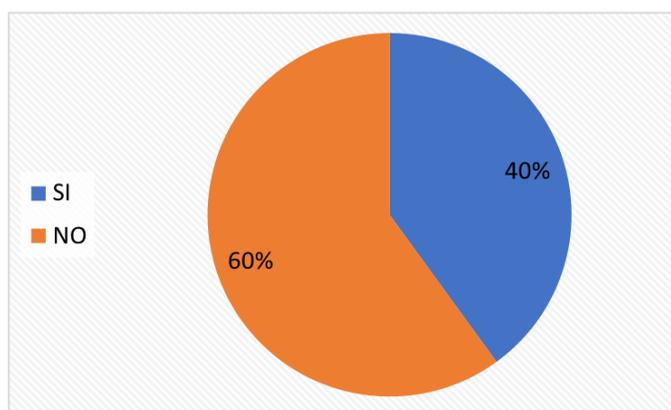
Resultados de la Pregunta 5



Los resultados de la pregunta 6: ¿Estima que es fácil manipular el robot?, indican que solo el 20% de encuestados presentó algún tipo de dificultad al momento de controlar el robot, aunque el resto de adultos estima que, si es fácil manipular la cabeza animatrónica, dichos resultados se muestran en la Figura 99.

Figura 99*Resultados de la Pregunta 6*

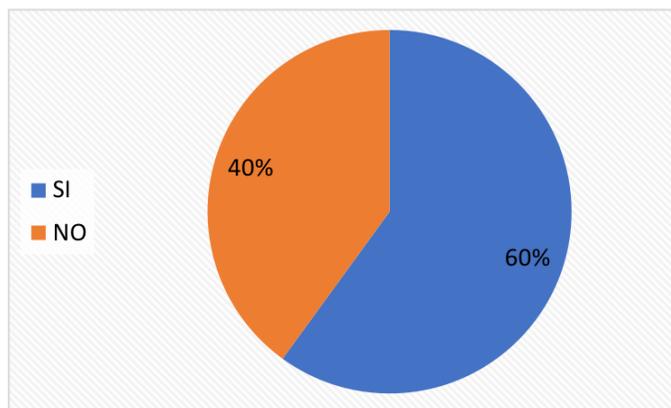
Los resultados de la pregunta 7: ¿Considera que el robot sea ruidoso?, mostrados en la Figura 100, detallan que el 60% de adultos consideran que los sonidos que emite el robot no son fuertes o bulliciosos, mientras que el 40% restante creen que el robot es ruidoso.

Figura 100*Resultados de la Pregunta 7*

En la Figura 101 se exhiben los resultados de la pregunta 8: ¿Le parece que el sistema de visión realiza un buen trabajo de seguimiento y reconocimiento facial? La misma detalla que el 60% de encuestados se encuentran satisfechos con el funcionamiento de los algoritmos del sistema de visión artificial y, por ende, ponderan que este trabaja de una buena manera.

Figura 101

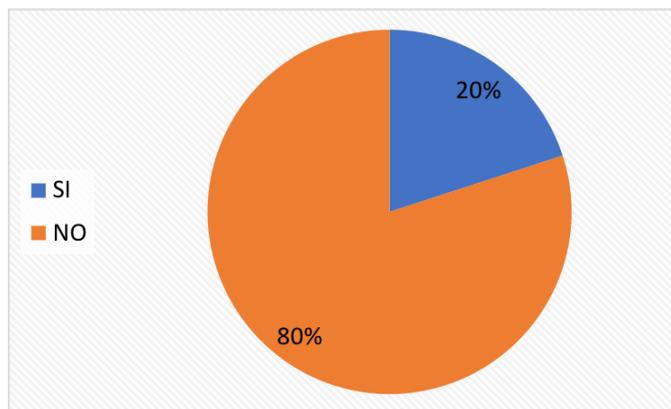
Resultados de la Pregunta 8



Las respuestas para la última pregunta de criterio cerrado: ¿Cree que existe ambigüedad en alguna emoción de la cabeza animatrónica?, se indica en la Figura 102, donde solamente un adulto, representado con un 20%, considera que la clasificación de las emociones mostradas por la cabeza animatrónica generan algún tipo de confusión o da paso a una interpretación errónea.

Figura 102

Resultados de la Pregunta 9

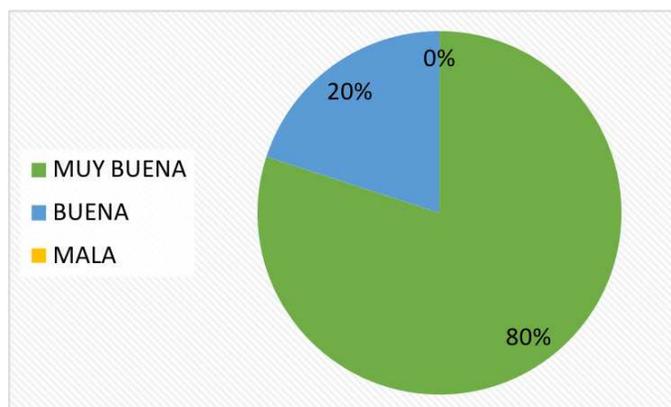


En la Figura 103 se indican las respuestas para la primera pregunta cualitativa de la encuesta, pregunta 10: ¿Cómo considera que son las actividades de la GUI de control?, donde la

mayoría de encuestados, representados con un 80%, piensan que las actividades desarrolladas en la interfaz de control son muy buenas, mientras que el 20% considera que son buenas.

Figura 103

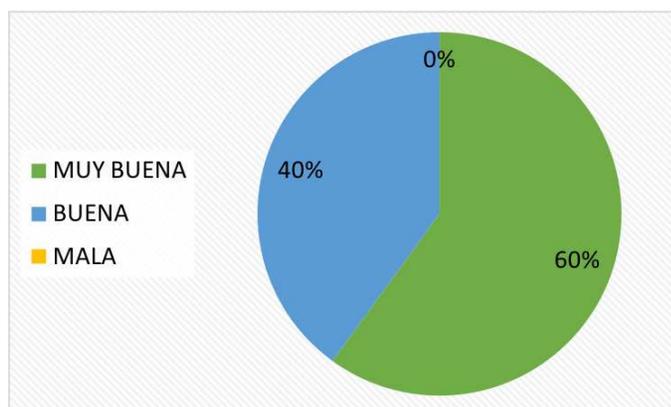
Resultados de la Pregunta 10



En la Figura 104 se muestran las respuestas de los encuestados para la pregunta 11: ¿Cómo considera que son las funciones del sistema de visión artificial?, donde un 60% afirma que las funciones son muy buenas, mientras que el restante 40% estiman que son buenas.

Figura 104

Resultados de la Pregunta 11

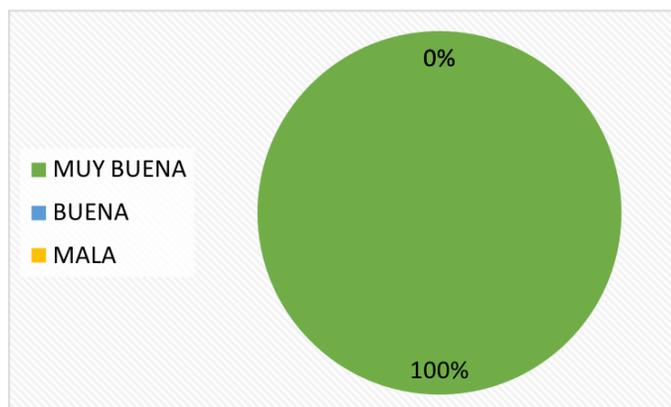


Los resultados para la pregunta 12: ¿En general, la capacidad del robot para mostrar las emociones universales es?, presentados en la Figura 105, permiten apreciar que el 100% de los

adultos encuestados consideran que el robot, mediante sus posibles movimientos del rostro, es capaz de ejecutar muy bien las diferentes expresiones.

Figura 105

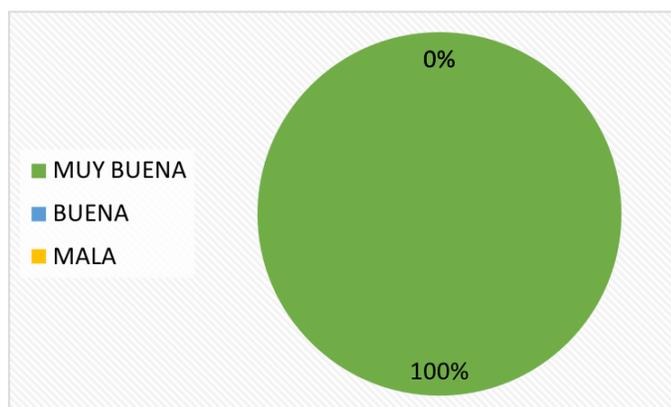
Resultados de la Pregunta 12



Los resultados para la pregunta 13: ¿La destreza del robot para mostrar FELICIDAD es?, exhibidos en la Figura 106, muestran que el 100% de encuestados afirman que el robot puede mostrar la emoción de felicidad de una manera muy buena.

Figura 106

Resultados de la Pregunta 13

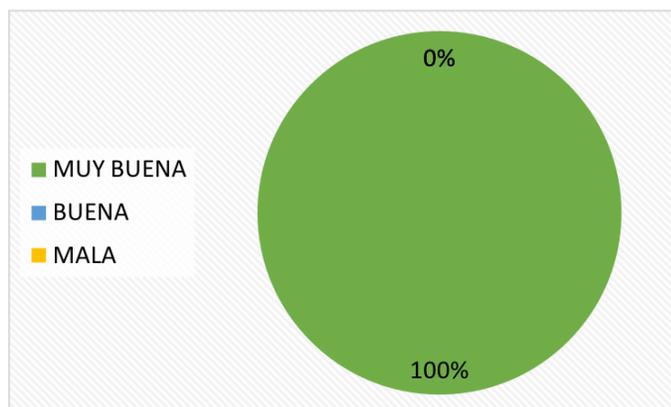


En la Figura 107 se muestran los resultados de la pregunta 14: ¿La destreza del robot para mostrar IRA es?, en la cual el 100% de adultos estiman que la cabeza animatrónica tiene

una destreza muy buena para mostrar la emoción de ira, mediante los movimientos de las cejas, ojos, boca y cuello.

Figura 107

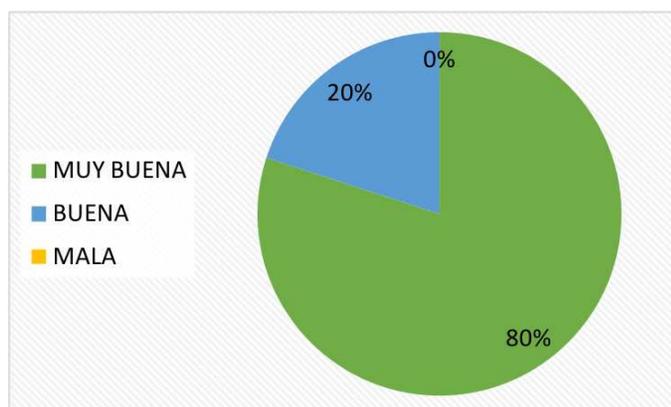
Resultados de la Pregunta 14



Los resultados para la pregunta 15: ¿La destreza del robot para mostrar TRISTEZA es?, se muestran en la Figura 108, detalla que el 80% de adultos creen que la destreza para expresar la emoción de tristeza es muy buena, mientras que el otro 20% afirma que la ejecución es buena.

Figura 108

Resultados de la Pregunta 15

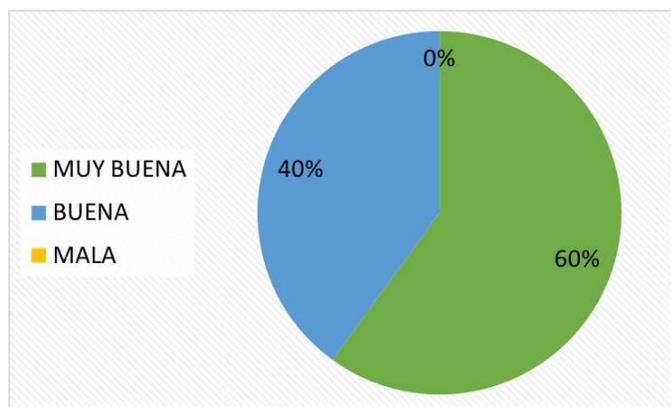


En la Figura 109 se presentan los resultados de la pregunta 16: ¿La destreza del robot para mostrar ASCO es?, en la cual se observa una clara bifurcación, ya que el 60% de adultos

encuestados cree que la destreza de la cabeza animatrónica para expresar la emoción de asco es muy buena, y el restante 40% de adultos opina que la capacidad del robot solo es buena.

Figura 109

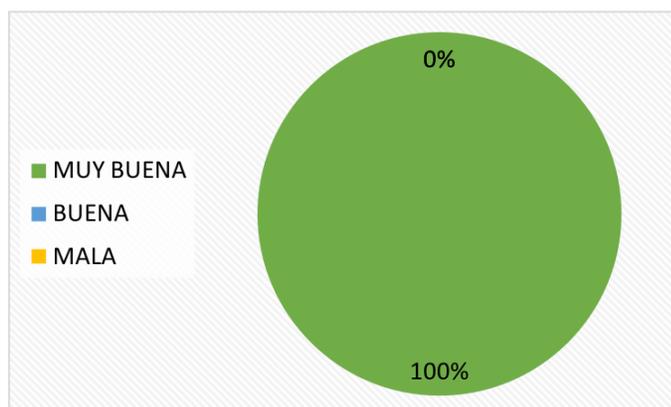
Resultados de la Pregunta 16



En la Figura 110 se indican los resultados para la pregunta 17: ¿La destreza del robot para mostrar SORPRESA es?, donde el 100% de encuestados estiman que la capacidad para ejecutar la emoción de sorpresa del robot es muy buena.

Figura 110

Resultados de la Pregunta 17

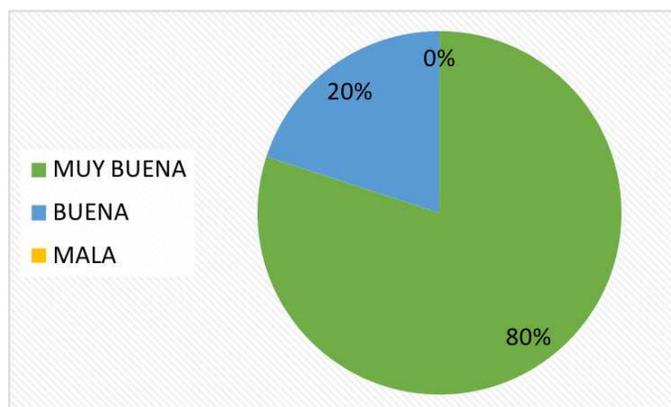


Los resultados para la pregunta 18: ¿La destreza del robot para mostrar MIEDO es?, exhibidos en la Figura 111, detallan que la mayoría de adultos encuestados, representado por el

80%, creen que la destreza del robot mostrando la emoción de miedo es muy buena, mientras que el restante 20% estima que dicha destreza es buena.

Figura 111

Resultados de la Pregunta 18



5.5. Validación de Hipótesis

Para el presente proyecto de titulación se propone la siguiente hipótesis:

- ¿El diseño y construcción de una cabeza animatrónica con percepción sensorial capaz de realizar gestos y expresiones facilitará la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA)?

De la misma se puede reconocer una variable independiente: cabeza animatrónica con percepción sensorial, y una variable dependiente: comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA). En consecuencia, para establecer la validez de la hipótesis planteada se opta por el análisis de dos criterios, el primero corresponde a las pruebas de funcionamiento con los niños y el segundo a las encuestas realizadas a los adultos.

Este proceso se realiza aplicando la herramienta estadística Chi-Cuadrado, que permite determinar si existe o no una relación entre las variables cuantitativas, para ello se requiere

establecer la comparación entre la frecuencia observada y la esperada, además, se introducen los términos de hipótesis nula (H0) y alternativa (H1), mismas que se muestran a continuación:

- **H0:** La cabeza animatrónica con percepción sensorial no facilitará la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA).
- **H1:** La cabeza animatrónica con percepción sensorial facilitará la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA).

De este modo, primero se analizan los resultados de las pruebas de funcionamiento del robot, donde los participantes ejecutan las diferentes actividades de la interfaz de control y en las cuales se considera la cantidad de aciertos y el tiempo en segundos que le toma a todos los participantes completar cada actividad; así, en la Tabla 64 se establecen las frecuencias observadas de las pruebas.

Tabla 64

Frecuencias Observadas de las Pruebas de Funcionamiento

Apartado	Reconocimiento de Emociones		¿Cómo me siento?	Total
	Ilustración #1	Ilustración #2		
Tiempo (segundos)	500	351	600	1451
Cantidad de aciertos	67	67	65	199
Total	567	418	665	1650

La comparación de frecuencias requiere hallar los valores de las frecuencias esperadas, para lo cual se aplica la siguiente fórmula:

$$E_{ij} = \frac{O_i * O_j}{O} \quad (8)$$

Donde E_{ij} es la frecuencia esperada en la fila i de la columna j , O_i es el valor total de la fila para la frecuencia observada, O_j es el valor total de la columna para la frecuencia observada y O es el total de todas las muestras.

En la Tabla 65 se indican los valores respectivos para las frecuencias esperadas de las pruebas de funcionamiento aplicando el cálculo en cada casilla.

Tabla 65

Frecuencias Esperadas de las Pruebas de Funcionamiento

Apartado	Reconocimiento de Emociones		¿Cómo me siento?
	Ilustración #1	Ilustración #2	
Tiempo (segundos)	498.62	367.59	584.80
Cantidad de aciertos	68.38	50.41	80.20

Una vez calculadas las frecuencias esperadas es posible hallar el valor del Chi-Cuadrado, además, para comprobar la hipótesis se requiere encontrar el número de grados de libertad, por lo que a continuación se detallan las fórmulas respectivas:

$$x^2 = \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (9)$$

$$v = (f - 1)(c - 1) \quad (10)$$

Donde x^2 representa el valor calculado de Chi-Cuadrado, f es el número de filas, c es el número de columnas y O_{ij} es la frecuencia observada en la fila i de la columna j .

Por ende, al reemplazar los valores de frecuencias de las pruebas de funcionamiento en la Ecuación (9) y la cantidad de filas y columnas en la Ecuación (10), se obtienen:

$$x_{pruebas}^2 = 0.0038 + 0.7487 + 0.3951 + 0.0279 + 5.4598 + 2.8808 = 9.52$$

$$v_{pruebas} = (2 - 1)(3 - 1) = 2$$

Por otra parte, para realizar la validación de hipótesis por medio de las encuestas, se debe primero denotar las preguntas de criterio cerrado más relevantes sobre la hipótesis del proyecto, de las cuales se usa la referencia de encuestados para poder ponderarse, como se observa en la Tabla 66.

Tabla 66*Frecuencias Observadas de las Preguntas de Criterio Cerrado*

Resultado	Pregunta						Total
	2	3	4	6	7	9	
Si	5	5	4	4	2	1	21
No	0	0	1	1	3	4	9
Total	5	5	5	5	5	5	30

Aplicando la Ecuación (8), se obtienen las frecuencias esperadas para las preguntas de criterio cerrado relevantes, mismas que se aprecian en la Tabla 67.

Tabla 67*Frecuencias Esperadas de las Preguntas de Criterio Cerrado*

Resultado	Pregunta					
	2	3	4	6	7	9
Si	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
No	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50

Sustituyendo las frecuencias de las preguntas de criterio cerrado en la Ecuación (9), se obtiene:

$$x_{\text{cerrado}}^2 = 3 * (0.6429) + 2 * (0.0714) + 1.7857 + 3 * (1.5) + 2 * (0.1667) + 4.1667$$

$$x_{\text{cerrado}}^2 = 12.86$$

Reemplazando la cantidad total de filas y columnas en la Ecuación (10), se tiene un grado de libertad, expresado por:

$$v_{\text{cerrado}} = (2 - 1)(6 - 1) = 5$$

Asimismo, para completar la validación por medio de las encuestas, es necesario estimar las preguntas de carácter cualitativo más relevantes, además de exceptuar el resultado "Mala" por la carencia de respuestas; así, en la Tabla 68 se muestran las frecuencias observadas para estas preguntas de la encuesta.

Tabla 68*Frecuencias Observadas de las Preguntas Cualitativas*

Resultado	Pregunta						Total
	13	14	15	16	17	18	
Muy Buena	5	5	4	3	5	4	26
Buena	0	0	1	2	0	1	4
Total	5	5	5	5	5	5	30

Los valores de frecuencias esperadas de las preguntas de carácter cualitativo de las encuestas son presentados en la Tabla 69.

Tabla 69*Frecuencias Esperadas de las Preguntas Cualitativas*

Resultado	Pregunta					
	13	14	15	16	17	18
Muy Buena	4.33	4.33	4.33	4.33	4.33	4.33
Buena	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67

Reemplazando las frecuencias en la Ecuación (9) y los valores de filas y columnas en la Ecuación (10), se pueden encontrar:

$$x_{cualitativo}^2 = 3 * (0.1037) + 2 * (0.0252) + 0.4085 + 3 * (0.67) + 2 * (0.1625) + 2.6401$$

$$x_{cualitativo}^2 = 5.75$$

$$v_{cualitativo} = (2 - 1)(6 - 1) = 5$$

Por ende, es posible obtener un valor de Chi-Cuadrado único para el análisis de las encuestas, mismo que se conforma por los resultados anteriores, así:

$$x_{encuestas}^2 = x_{cerrado}^2 + x_{cualitativo}^2$$

$$x_{encuestas}^2 = 18.61$$

Posteriormente, del Anexo F, se obtienen los valores de la distribución Chi-Cuadrado correspondiente al margen de error estimado; asimismo, para el desarrollo del proyecto se

trabaja con un nivel de confianza del 0.01, por lo que se tiene dos referentes de la tabla de distribución del Chi-Cuadrado, para los grados de libertad encontrados de 2 y 5:

$$x_{tabla(2)}^2 = 9.2104$$

$$x_{tabla(5)}^2 = 15.0863$$

Comparando los valores calculados de Chi-Cuadrado, tanto para las pruebas de funcionamiento como para las encuestas, es posible observar que ambos resultados son mayores que los de tabla, lo que permite descartar la hipótesis nula (H_0), en otras palabras, es seguro afirmar que la cabeza animatrónica con percepción sensorial facilita la comunicación de niños y niñas con trastorno del espectro autista (TEA).

CAPÍTULO VI

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Para definir correctamente los parámetros estéticos de la cabeza animatrónica se hizo una investigación profunda, la cual definió que tanto los niños con desarrollo típico como los niños con TEA tienden a preferir más los modelos con atributos caricaturescos que los realistas. Por ello, el modelo propuesto, realizado en el software libre Blender, tiene facciones semejantes a las de un mono con rasgos de caricatura, mismo que cuenta con un pelaje de felpa para cubrir la estructura y un rostro de silicona que brinda una elasticidad adecuada para el preciso movimiento de componentes. Es fundamental aclarar que, a pesar de que el proyecto fue desarrollado para mejorar la comunicación de niños con TEA, se presentaron limitantes al momento de realizar pruebas con los mismos debido a las circunstancias mundiales de pandemia, por lo que en las pruebas únicamente participan niños con desarrollo típico, quienes mostraron un alto interés en el robot y en sus actividades.
- La estructura de soporte de la cabeza animatrónica y sus mecanismos (ojos, boca y cuello), se diseñaron considerando los parámetros estéticos y se construyeron mediante impresión 3D. Recíprocamente, el diseño de los mecanismos se realizó con el método de ensayo y error, mientras que los componentes se seleccionaron siguiendo el proceso genérico de desarrollo de un producto.
- El sistema de percepción sensorial del robot está compuesto por el sentido de la vista usando una cámara Arducam IMX291, del tacto por medio de un sensor de presión FSR402 y la capacidad del habla mediante un parlante con control de volumen encargado

de impartir instrucciones al usuario. Adicionalmente, para evitar ambigüedad en la clasificación de emociones, se utilizó el concepto de expresiones faciales propuesto por el Dr. Ekman, en el cual se reconocen como universales a las emociones de felicidad, ira, tristeza, asco, sorpresa y miedo; así, el sistema de actuadores, compuesto por 11 micro servomotores MG90S y 2 servomotores MG995, posee un total de 13 grados de libertad y es capaz de ejecutar movimientos en la piel del rostro que simulan las seis emociones universales.

- Para el control de la cabeza animatrónica se desarrollaron dos interfaces de usuario usando el paquete Tkinter, la primera GUI está destinada al sistema de control del robot, mismo que introduce actividades didácticas para el aprendizaje y reconocimiento de emociones, además de incluir funciones para el control manual y automático de los elementos del rostro por medio de deslizadores y botones de selección de emociones, respectivamente. La segunda GUI se enfoca al sistema de visión artificial, mismo que cuenta con funciones de seguimiento de rostro y reconocimiento facial mediante herramientas de código abierto, estas operaciones se formularon para aumentar el rango de aplicación del robot.
- Finalmente, la funcionalidad del robot se verificó tanto con el análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento aplicadas durante tres sesiones a cuatro niños en edades entre 6 y 8 años, como con valoraciones de cinco adultos que usaron la interfaz de control para manipular al robot de forma manual y automática. Las pruebas realizadas muestran que los niños interactúan de forma positiva con el robot e indican que los participantes logran entender bien las emociones que ejecuta el robot, no obstante, de todas las emociones, el asco presenta menor consistencia de reconocimiento; esto se

debe a que los movimientos asociados a dicha emoción son más complejos de alcanzar, ya que implican el uso de la AU 9 correspondiente al arrugamiento de la nariz.

6.2. Recomendaciones

- Antes de utilizar la cabeza animatrónica, se recomienda que el usuario estudie de forma detallada el manual de uso, para que se familiarice de mejor manera con las diferentes características del robot, las actividades de la interfaz de control y las funciones del sistema de visión artificial.
- Mientras no se utilice la cabeza animatrónica, se recomienda guardar el robot en un lugar seco y libre de objetos que puedan caer sobre el rostro o la caja de control.
- Estimar un tiempo de funcionamiento máximo de 25 minutos para evitar el aumento de temperatura en el interior de la caja de control, además, no se debe colocar ningún elemento pesado sobre la piel del rostro, estante de la cámara o la tapa de la caja.
- Para las funciones del sistema de visión artificial es recomendable seguir las distancias planteadas, siendo estas una separación horizontal de 60 cm y vertical de 15 cm entre el lente de la cámara y el rostro del usuario.

BIBLIOGRAFÍA

- Adafruit. (2021). *Force Sensitive Resistor (FSR) [Resistencia Sensible a la Fuerza (FSR)]*. Recuperado 7 de julio de 2021, de <https://cutt.ly/3mZo3bZ>
- Arducam. (s. f.). *USB Low Light Wide Angle Camera Module 2MP Sony IMX291*. <https://www.uctronics.com/download/Amazon/B0200.pdf>
- Arduino. (2018). *What is Arduino? [¿Qué es Arduino?]*. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arduino. (2021). *Arduino UNO Rev3*. Recuperado 8 de julio de 2021, de <https://cutt.ly/qmT8lj7>
- Asociación Americana de Psiquiatría. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders [Manual Diagnóstico y Estadístico de los Trastornos Mentales]* (5ª ed.). American Psychiatric Publishing. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Asociación Americana de Psiquiatría. (2020). *DSM–5: Frequently Asked Questions [DSM-5: Preguntas frecuentes]*. Recuperado 18 de junio de 2020, de <https://cutt.ly/LmlkHSc>
- Asociación Navarra de Autismo. (2016, 30 agosto). *Metodología de aprendizaje Teacch*. <http://www.autismonavarra.com/2016/08/metodologia-de-aprendizaje-teacch/>
- Autodesk Inc. (2021). *Getting started with Fusion 360 [Empezando con Fusion 360]*. Product Documentation. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://cutt.ly/ImeMLFi>
- Ayala, A. M. (2011). *Autonomatronics TM*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20810-2_2
- Bejerano, P. (2014). *Los cinco sentidos de un robot*. Yorokobu. Recuperado 31 de octubre de 2020, de <https://www.yorokobu.es/los-cinco-sentidos-de-un-robot/>
- Besednjak, M. A. (2011). Los Moldes. En Universitat Politècnica de Catalunya (Ed.), *Apuntes de Métodos de Producción con Materiales Compuestos* (pp. 1–8). <https://cutt.ly/ZmZpylJ>
- Biblioteca Nacional de Medicina EE.UU. (2020, 14 enero). *Trastorno del espectro autista*.

- MedlinePlus. <https://medlineplus.gov/spanish/autismspectrumdisorder.html>
- blender.org. (2021). *About [Acerca]*. The Software. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://www.blender.org/about/>
- Cadena, G. F., y Oleas, H. D. (2019). *Diseño, construcción e implementación de un robot animatrónico humanoide para el mejoramiento de la terapia de niños y niñas con síndrome del trastorno del espectro autista (TEA)* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21170/1/T-ESPEL-MEC-0194.pdf>
- Caicedo, C. A., y Maldonado, C. M. (2019). *Diseño y construcción de un robot que clasifique tarjetas con rutinas basadas en pictogramas para niños con Trastorno del Espectro Autista (TEA) a través de visión artificial* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/20343/1/T-ESPE-039153.pdf>
- Cartoon3DModels. (2020). *Monkey modelo 3d*. Free3D. Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://free3d.com/3d-model/monkey-1682.html>
- Challenger-Pérez, I., Díaz-Ricardo, Y., y Becerra-García, R. A. (2014). El lenguaje de programación Python. *Ciencias Holguín*, XX(2), 1–13. <https://cutt.ly/MmZpXUD>
- Cognex Corporation. (2016). *Introducción a la visión artificial. Una guía para la automatización de procesos y mejorar la calidad*. ikusmen Visión Artificial S.L. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://cutt.ly/8meMctr>
- Cohmer, S. (2014, 23 abril). *"Autistic Disturbances of Affective Contact" (1943), by Leo Kanner ["Trastornos Autistas del Contacto Afectivo" (1943), por Leo Kanner]*. Embryo Project Encyclopedia. Recuperado 4 de mayo de 2020, de <https://cutt.ly/OQWtKRd>
- Departamento de Salud y Servicios Humanos EE.UU. (2014, 16 septiembre). *Trastornos del espectro autista (TEA)*. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades.

<https://www.cdc.gov/ncbddd/Spanish/autism/facts.html>

Departamento de Salud y Servicios Humanos EE.UU. (2018 diciembre). *Trastornos del espectro*

autista. Instituto Nacional de Salud Mental. <https://cutt.ly/KmZpmkx>

Diosdado, R. (2018). *Servo-motores*. Zona Maker. Recuperado 7 de julio de 2021, de

<https://cutt.ly/ImT0gU5>

Dlib C++ Library. (2015). *Introduction [Introducción]*. Overview. Recuperado 21 de febrero de

2021, de <http://dlib.net/intro.html>

Earl, B. (2012). *Adafruit PCA9685 16-Channel Servo Driver*. Adafruit. Recuperado 7 de julio de

2021, de <https://learn.adafruit.com/16-channel-pwm-servo-driver?view=all>

Eaton, M. (2015). *Evolutionary Humanoid Robotics [Robótica Humanoide Evolutiva]*. Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-44599-0>

Ehmke, R. (2020). *¿Cómo debería ser una evaluación para el autismo?* Child Mind Institute.

Recuperado 12 de mayo de 2020, de <https://cutt.ly/PmZpEik>

Ekman, P., y Oster, H. (1981). Expresiones faciales de la emoción. *Estudios de Psicología*, 2(7),

115–144. <https://doi.org/10.1080/02109395.1981.10821273>

Electronic Frontier Foundation. (2017). *Face Recognition [Reconocimiento Facial]*. Recuperado 7

de julio de 2021, de <https://www.eff.org/pages/face-recognition>

Enciclopedia de Ciencias y Tecnologías en Argentina. (2017). *Ensayo y error*. Saberes.

Recuperado 7 de julio de 2021, de https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/index.php/Ensayo_y_error

Fabien, M. (2019). *A guide to Face Detection in Python (With Code) [Una guía para la detección*

de rostros en Python (con código)]. Medium. Towards data science. Recuperado 21 de

febrero de 2021, de <https://cutt.ly/wmb82dW>

Farnsworth, B. (2019). *Facial Action Coding System (FACS) – A Visual Guidebook [Sistema de*

- codificación de acción facial (FACS) – Una guía visual*. iMotions A/S. Recuperado 14 de febrero de 2021, de <https://imotions.com/blog/facial-action-coding-system/>
- Feng, S., Wang, X., Wang, Q., Fang, J., Wu, Y., Yi, L., y Wei, K. (2018). The uncanny valley effect in typically developing children and its absence in children with autism spectrum disorders [El efecto del valle inquietante en niños con desarrollo típico y su ausencia en niños con trastornos del espectro autista]. *PLOS ONE*, 13(11), 1–14.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206343>
- Fernández, N. L. (2017). Introducción a la Visión Artificial. En *Visión Artificial Avanzada* (pp. 18, 27–39). Universidad de Córdoba. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://cutt.ly/rmbr676>
- Gomariz, A. (2019). *Los robots podrían replicar la percepción sensorial humana*. Blogthinkbig.com. Recuperado 31 de octubre de 2020, de <https://cutt.ly/smZpYTY>
- Gómez, A. J. (2019, 26 octubre). *Más de 1.500 personas en Ecuador viven con autismo*. El Telégrafo. <https://www.letelegrafo.com.ec/noticias/cartas/1/autismo-ecuador-salud>
- Hareendran, T. K. (2021). *Arduino Sound Machine [Máquina de sonido Arduino]*. Electro Schematics. Recuperado 8 de julio de 2021, de <https://cutt.ly/YmZpOF3>
- Huamán, A. (2020). *Cascade Classifier (Clasificador Cascada)*. OpenCV Tutorial. Recuperado 21 de febrero de 2021, de <https://cutt.ly/8mb5vaz>
- Iglesias-Hoyos, S., del Castillo Arreola, A., y Muñoz-Delgado, J. I. (2016). Reconocimiento facial de expresión emocional: diferencias por licenciaturas. *Acta de Investigación Psicológica*, 6(3), 2494–2499. <https://doi.org/10.1016/j.aiprr.2016.07.001>
- INFAIMON S.L. (2018). *Visión por computador: qué es y cuáles son sus usos más comunes*. Control y optimización de procesos. Recuperado 15 de febrero de 2021, de

<https://blog.infaimon.com/vision-computador-soluciones-permite/>

Instituto de Robótica Humanoide. (s. f.). *WABOT -WAseda roBOT*. Universidad de Waseda.

http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html

Jameco Electronics. (2021). *How Servo Motors Work [Cómo funcionan los servomotores]*.

Recuperado 7 de julio de 2021, de <https://cutt.ly/nmTLLWK>

Kaspe, Y. D., Sarangpure, P. R., y Mohurle, J. (2016). Animatronic. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(4), 266–269.

<https://doi.org/10.17148/IJARCCCE.2016.5468>

kicad.org. (2021). *About KiCad [Acerca KiCad]*. Recuperado 15 de febrero de 2021, de

<https://www.kicad.org/about/kicad/>

Lanier, N. (2013). *Honest Abe [Fotografía]*. Flickr. <https://flic.kr/p/o7aM1M>

Leo, M., Carcagnì, P., Distante, C., Spagnolo, P., Mazzeo, P., Rosato, A., Petrocchi, S., Pellegrino,

C., Levante, A., De Lumè, F., y Lecciso, F. (2018). Computational Assessment of Facial Expression Production in ASD Children [Evaluación computacional de la producción de expresiones faciales en niños con TEA]. *Sensors*, 18(11), 3993.

<https://doi.org/10.3390/s18113993>

Losa, D. C. (2013). *Diseño y construcción de una cabeza animatrónica de aspecto realista*

[Universidad de Valladolid]. Recuperado 14 de enero de 2021, de <https://cutt.ly/iQWyjVI>

Maduell i García, E. (2012). *Visión artificial* (Universitat Oberta de Catalunya (ed.)).

<https://openlibra.com/es/book/download/vision-artificial>

Makeblock. (2016). *MG995 Standard Servo*. Motors. Recuperado 3 de junio de 2021, de

<https://cutt.ly/Ym3sbXi>

Maker Portal. (2021). *MG90S Micro Servo*. Recuperado 1 de junio de 2021, de

<https://cutt.ly/sm3yJ58>

Mallitasig, H. (2018). *Paul Ekman y las microexpresiones faciales de las emociones*.

<http://repositorio.pucesa.edu.ec/handle/123456789/2691>

Margolin, R. (2018). *The game changing power of robotics and social-emotional learning [El poder cambiante de la robótica y el aprendizaje socioemocional]*. Robokind. Recuperado 1

de octubre de 2020, de <https://cutt.ly/TmrdFPB>

Margolius, I. (2017). The Robot of Prague [El robot de Praga]. *The Friends of Czech Heritage*, 3–5.

<https://czechfriends.net/images/RobotsMargoliusJul2017.pdf>

Martínez Gómez de Albacete, J. F. (2013). *Moldeado y Vaciado Artístico*.

<https://cutt.ly/WQWyJaz>

MatWeb. (2021a). *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Molded [Descripción de materiales para acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), moldeado]*.

Recuperado 31 de mayo de 2021, de <https://cutt.ly/omOBri0>

MatWeb. (2021b). *Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer [Descripción de materiales para el biopolímero de ácido poliláctico (PLA)]*. Recuperado 31 de mayo de

2021, de <https://cutt.ly/nmeNhEx>

Mayo Clinic. (2018, 6 enero). *Trastorno del espectro autista - Diagnóstico y tratamiento*.

Recuperado 6 de febrero de 2020, de <https://cutt.ly/UmZatvj>

Merefsa. (s. f.). *Caucho de Silicona*. Características Generales del Caucho de Silicona.

https://www.merefsa.com/es/productos/cauchos-de-silicona_kgr/

Merriam-Webster. (s. f.). Animatronic [Animatrónica]. En *Diccionario Merriam-Webster.com*.

<https://www.merriam-webster.com/dictionary/animatronic>

MIT Media Lab. (2018). *Personalized Machine Learning for Autism Therapy [Aprendizaje*

- automático personalizado para terapia de autismo*]. *Affective Computing*. Recuperado 6 de febrero de 2020, de <https://www.media.mit.edu/projects/engageme/overview/>
- Moosa, A. (2018). *A Comprehensive Guide to Facial Recognition Algorithms – Part 1 [Una guía completa de algoritmos de reconocimiento facial - Parte 1]*. BaseApp Systems. Recuperado 23 de febrero de 2021, de <https://cutt.ly/AmZapOx>
- Mori, M., MacDorman, K., y Kageki, N. (2012). The Uncanny Valley (From the Field) [El Valle Inquietante (desde el campo)]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2), 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>
- OpenCV. (2020). *Face Recognition with OpenCV [Reconocimiento Facial con OpenCV]*. OpenCV Tutorial. Recuperado 23 de febrero de 2021, de <https://cutt.ly/1mZadcl>
- OpenCV. (2021). *About [Acerca]*. Recuperado 15 de febrero de 2021, de <https://opencv.org>
- Organización Mundial de la Salud. (2019, 7 noviembre). *Trastornos del espectro autista*. Recuperado 6 de febrero de 2020, de <https://cutt.ly/7mZagDt>
- PARO Robots. (2014). *PARO Therapeutic Robot [PARO, robot terapéutico]*. <http://www.parorobots.com>
- Pikisuperstar. (2021). *Personas mostrando emociones vector gratuito [Gráfico]*. Freepik.com. Recuperado 10 de junio de 2021, de <https://cutt.ly/7meNbg5>
- Pololu. (2021). *Force-Sensing Resistor: 0.6"-Diameter Circle [Resistencia de Detección de Fuerza: Círculo de 0,6" de Diámetro]*. Recuperado 7 de julio de 2021, de <https://cutt.ly/1QWy5Qn>
- Projecte Autisme la Garriga. (2016). *El autismo*. Todo sobre el autismo. Recuperado 6 de febrero de 2020, de <https://www.autisme.com/es/el-autismo/>
- Python Software Foundation. (2021). *Face Recognition*. Python Package Index. <https://pypi.org/project/face-recognition/>

- Ravanetto. (2021). *Propiedades de la silicona*. ¿Qué es la silicona? ¿Para que sirve y cómo se utiliza este material? Recuperado 8 de julio de 2021, de <https://cutt.ly/JmZaE9L>
- Real Academia Española. (s. f.). Robótica. En *Diccionario de la lengua española*.
<https://dle.rae.es/robótica>
- Reyes, F. (2011). *Robótica. Control de robots manipuladores* (1ª ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Riba Romeva, C. (2002). *Diseño concurrente*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Robles López, L. R., Hernández Barrios, L. R., Peña Rosales, B., De la Rosa Arredondo, T., y Guadarrama Ortiz, P. (2019). Trastorno del espectro autista: una revisión para el médico de primer nivel de atención. *Atención Familiar*, 26(4), 150–157.
<https://doi.org/10.22201/facmed.14058871p.2019.4.70790>
- Rodríguez, A. B., y Calvo, R. M. (2018, 20 febrero). *Tratamiento del Trastorno del Espectro Autista*. Hospital Clínic Barcelona. Recuperado 24 de junio de 2020, de
<https://cutt.ly/7mZaPgv>
- Romero, E. (2019). *Conozcamos las tres principales tecnologías de impresión 3D*. Recuperado 1 de octubre de 2020, de <https://cutt.ly/amZaSyP>
- Shibata, T. (2012). Therapeutic Seal Robot as Biofeedback Medical Device [Robot terapéutico foca como dispositivo médico de biorretroalimentación]. *Proceedings of the IEEE*, 100(8), 2527–2538. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2200559>
- Sicnova. (2019). *Comparativa de Impresión 3D y Mecanizado CNC*. Recuperado 1 de octubre de 2020, de <https://sicnova3d.com/blog/comparativa-de-impresion-3d-y-mecanizado-cnc/>
- Spindler, O., y Fadrus, T. (2009). *Grimace project documentation [Documentación del proyecto Grimace]*. Vienna University of Technology. Recuperado 20 de junio de 2021, de
<https://cutt.ly/bmeME82>

- Torras, C. (2014, 27 julio). *Robots sociales*. Revista Mètode. <https://cutt.ly/9QWurqM>
- Tresde. (2019). *Manufactura: Fabricación Aditiva vs Fabricación Sustractiva*.
<https://tresde.pe/manufactura-fabricacion-aditiva-vs-fabricacion-sustractiva/>
- Trowbridge, T. (2010). *Paro Therapy Robot [Fotografía]*. Flickr. <https://flic.kr/p/7uxjq4>
- Tsesmelis, T. (2020). *Introduction to Principal Component Analysis (PCA) [Introducción al análisis de componentes principales (PCA)]*. OpenCV Tutorial. Recuperado 23 de febrero de 2021, de https://docs.opencv.org/4.5.1/d1/dee/tutorial_introduction_to_pca.html
- Ulrich, K. T., y Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (5ª ed.). McGraw-Hill/Interamericana.
- Ultimaker BV. (2021). *Ultimaker Cura*. Software. Recuperado 10 de julio de 2021, de <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- Waltz, E. (2018, 9 agosto). *Therapy Robot Teaches Social Skills to Children With Autism [Robot de terapia enseña habilidades sociales a niños con autismo]*. IEEE Spectrum. Recuperado 6 de febrero de 2020, de <https://cutt.ly/GmZaHZr>
- Wu, F., Lin, S., Cao, X., Zhong, H., y Zhang, J. (2019). Head Design and Optimization of An Emotionally Interactive Robot for the Treatment of Autism [Diseño de cabeza y optimización de un robot emocionalmente interactivo para el tratamiento del autismo]. *Proceedings of the 2019 4th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3351917.3351992>
- Yoshida, E. (2018, 15 noviembre). *Robots que parecen humanos*. Revista Mètode. <https://doi.org/10.7203/metode.9.11405>
- Yousif, J. H., Kazem, H. A., y Chaichan, M. T. (2019). Evaluation Implementation Of Humanoid Robot For Autistic Children: A Review [Implementación de evaluación de robot humanoide

para niños autistas: una revisión]. *International Journal of Computation and Applied Sciences IJOCAAS*, 6(1), 412–420. <https://www.researchgate.net/publication/331162555>

Zabala, G. (2007). *Robótica. Guía teórica y practica* (1ª ed.). Gradi.

Zhang, L., Hossain, A., y Jiang, M. (2014). Intelligent Facial Action and emotion recognition for humanoid robots [Acción facial inteligente y reconocimiento de emociones para robots humanoides]. *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 739–746. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2014.6889647>

ANEXOS