



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**

**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA:**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ROBÓTICA  
ANTROPOMÓRFICA CON PROYECCIÓN GESTUAL”**

**AUTORES:**

**MASABANDA PAUCAR, CRISTHIAN ESTEBAN**

**OÑA QUISHPE, ANA GABRIELA**

**DIRECTOR:**

**ING. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR**

**SANGOLQUÍ**

**2020**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ROBÓTICA ANTROPOMÓRFICA CON PROYECCIÓN GESTUAL**” fue realizado por los señores **MASABANDA PAUCAR, CRISTHIAN ESTEBAN** y **OÑA QUISHPE, ANA GABRIELA** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 13 de enero de 2020

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'David Loza Matovelles'.

ING. DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE, MSc.

DIRECTOR

C. C.: 1708661549



**ESPE**  
 UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
 INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
 CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **MASABANDA PAUCAR, CRISTHIAN ESTEBAN**, con cédula de identidad N° 1723263842 y **OÑA QUISHPE, ANA GABRIELA**, con cédula de identidad N° 1725267338, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ROBÓTICA ANTROPOMÓRFICA CON PROYECCIÓN GESTUAL”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolqui, 13 de enero de 2020

.....  
 MASABANDA PAUCAR  
 CRISTHIAN ESTEBAN  
 C. C.: 1723263842

.....  
 OÑA QUISHPE  
 ANA GABRIELA  
 C. C.: 1725267338



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, **MASABANDA PAUCAR, CRISTHIAN ESTEBAN** y **OÑA QUISHPE, ANA GABRIELA** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CABEZA ROBÓTICA ANTROPOMÓRFICA CON PROYECCIÓN GESTUAL”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 13 de enero de 2020

.....  
MASABANDA PAUCAR

CRISTHIAN ESTEBAN

C. C.: 1723263842

.....  
OÑA QUISHPE

ANA GABRIELA

C. C.: 1725267338

## **DEDICATORIA**

A Dios por siempre bendecirme y fortalecerme en cada momento.

A mis padres Rubén y Mariana por apoyarme y motivarme en cada uno de mis objetivos, que a pesar de mis caídas siempre estuvieron ahí para ayudarme tanto emocionalmente y económicamente.

A mis hermanos Danny y Rubén Darío que siempre estuvieron ahí motivándome y ayudándome en cada problema.

A mis amigos que siempre me dieron la mano y apoyaron durante la carrera.

Ana Oña

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, quisiera dedicar este trabajo a Dios quien me ha protegido y guiado a lo largo de toda mi vida.

A mis padres quienes con amor, paciencia y esfuerzo me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir mis sueños.

A mis hermanas Diana, Elena, Carla que han sido mi ejemplo a seguir a lo largo de toda mi vida, me han brindado sus consejos y su apoyo para siempre seguir adelante.

Cristhian Masabanda

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme las fuerzas para seguir a pesar de las dificultades.

Agradezco a mi padre Rubén que a pesar que ya no se encuentra junto a mí, desde el cielo sigue bendiciéndome en todo momento y sigue siendo mi fortaleza, agradezco porque siempre me brindo su amor, ayuda, fue mi guía y sin ayuda de él y mi madre no habría podido cumplir esta meta.

A mi madre Mariana por su entrega cada día, por ser mi guía y por motivarme siempre a seguir adelante.

A mis hermanos Danny y Rubén Darío que siempre han sido mi apoyo en todo momento.  
A toda mi familia por brindarme siempre su apoyo.

A mis amigos de la carrera y del grupo juvenil que siempre estuvieron ahí en las dificultades de la carrera.

A mi amigo de tesis Cris que me brindó su apoyo y que a pesar de las dificultades de la tesis logramos cumplir con nuestros objetivos.

Ana Oña

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme vida y fuerza para llegar a este momento de mi carrera profesional.

A mis padres que con sacrificio y trabajo han sabido inculcar en mis los valores de responsabilidad, solidaridad y la idea de que siempre debo superarme y ser mejor cada día en todos los aspectos de la vida.

A mis hermanas Diana y Elena, que su ejemplo de superación y persistencia estuvo presente en mi a lo largo de todo este tiempo de trabajo, A mi hermana Carla que ha sido mi compañera de locuras y vivencias a lo largo de toda mi vida. A mi familia que siempre tuvo una mano de apoyo y un consejo en los momentos difíciles.

A mis amigos quienes han sido las personas con las que he compartido momentos maravillosos y se han convertido en personas que estoy seguro podré contar toda la vida. A mi compañera Anita, que se ha convertido en una de mis mejores amigas y hemos compartido lo momentos buenos y malos de este trabajo, en los cuales siempre hemos encontrado la solución para seguir adelante.

Cristhian Masabanda



**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	i
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	ii
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	iii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vi
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xiv
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xix
<b>RESUMEN</b> .....	xxiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xxiv
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS</b> .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación e importancia .....	4
1.3. Objetivo .....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4

1.3.2.	Objetivos específicos .....	5
1.4.	Descripción general del proyecto .....	5
1.5.	Estructura del documento .....	6
<b>CAPÍTULO 2.....</b>		<b>7</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>		<b>7</b>
2.1.	Cabezas Robóticas .....	7
2.1.1.	Introducción .....	7
2.1.2.	Línea del tiempo de las cabezas robóticas .....	8
2.1.3.	Clasificación de cabezas robóticas.....	11
2.1.4.	Características de cabezas robóticas .....	14
2.1.5.	Análisis comparativo de características y tipos de cabezas robóticas .....	15
2.2.	Antropomorfismo .....	16
2.2.1.	Definición .....	16
2.2.2.	Antropomorfismo en la robótica .....	17
2.2.3.	Valle Inquietante de Mori .....	18
2.3.	Sistemas Sensoriales en Robots.....	19
2.3.1.	Definición .....	19
2.3.2.	Componentes de los sistemas sensoriales .....	20
2.3.3.	Adquisición de datos.....	21

	x
2.3.4.	Interpretación de bajo nivel .....24
2.3.5.	Interpretación de alto nivel .....25
2.4.	Tabla comparativa .....28
2.5.	Resumen .....29
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>.....31</b>
<b>3. DISEÑO MECATRÓNICO</b>	<b>.....31</b>
3.1.	Diseño del sistema basado en la matriz de calidad.....31
3.1.1.	Necesidades del sistema.....32
3.1.2.	Definición de características técnicas .....32
3.1.3.	Matriz de Calidad.....32
3.2.	Definición de subsistemas del ROBOT.....34
3.3.	Subsistema Cuello .....35
3.3.1.	Mecanismo.....35
3.3.1.1.	Selección Mecanismo.....35
3.3.1.2.	Cinemática Inversa del Mecanismo .....39
3.3.2.	Material Carcaza .....46
3.3.2.1.	Selección del Material .....46
3.3.3.	Análisis de esfuerzos de partes críticas.....48
3.3.4.	Diseño electrónico .....54

3.3.5.	Motores .....	54
3.3.5.1.	Análisis esfuerzo motores .....	54
3.3.5.2.	Selección de motores.....	57
3.4.	Subsistema de proyección gestual .....	59
3.4.1.	Máscara .....	59
3.4.1.1.	Selección del material .....	59
3.4.2.	Proceso de conformado.....	61
3.4.2.1.	Selección de proceso .....	61
3.4.3.	Lente .....	63
3.4.3.1.	Selección tipo de lentes .....	63
3.4.4.	Proyector .....	66
3.4.4.1.	Selección Tipo de proyector.....	66
3.4.5.	Diseño de animaciones .....	68
3.4.5.1.	Selección Tipo de software .....	68
3.5.	Subsistema de Interacción .....	70
3.5.1.	Text to Speech TTS .....	71
3.5.1.1.	Selección Tipo de módulo TTS.....	71
3.5.2.	Speech to Text STT .....	73
3.5.2.1.	Selección Tipo de módulo STT.....	73

3.5.3.	Reconocimiento palabras claves .....	75
3.5.3.1.	Selección Tipos de reconocimiento de palabras claves .....	75
3.5.4.	Módulo de Visión Artificial .....	77
3.5.4.1.	Selección tipo de Módulos de Visión Artificial .....	77
3.5.5.	Chatbot .....	78
3.5.5.1.	Selección tipo de Chatbot.....	78
3.6.	Subsistema de comunicación.....	80
3.6.1.	Tarjeta de Control .....	80
3.6.2.	Diseño de la Interfaz Humano Maquina (HMI).....	83
3.6.2.1.	Selección del software.....	83
3.7.	Prototipo simulado.....	85
3.8.	Resumen .....	87
<b>CAPÍTULO 4</b>	.....	<b>88</b>
<b>4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS</b>	.....	<b>88</b>
4.1.	Implementación .....	88
4.1.1.	Construcción Mecánica.....	88
4.1.2.	Hoja de procesos impresión 3D .....	90
4.1.3.	Hoja de procesos CNC.....	91
4.1.4.	Programación y comunicación.....	92

	xiii
4.1.4.1. Pseudocódigos .....	92
4.1.4.2. Diagrama Nodos.....	96
4.1.4.3. HMI .....	97
4.2. Implementación del sistema de retroproyección .....	100
4.2.1. Software Blender .....	101
4.3. Pruebas mecánicas .....	108
4.3.1. Mecanismo .....	108
4.4. Pruebas de proyección .....	111
4.5. Pruebas de usabilidad .....	114
4.6. Resumen .....	117
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>119</b>
<b>5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>119</b>
5.1. Conclusiones.....	119
5.2. Recomendaciones .....	120
5.3. Trabajos Futuros .....	122
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>126</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Comparación de características y tipos de cabezas robóticas .....	16
<b>Tabla 2</b> Ventajas y desventajas de varios tipos de sensores táctiles .....	23
<b>Tabla 3</b> Comparación de los trabajos realizados y características de los robots proyectados.....	28
<b>Tabla 4</b> Necesidades o requerimientos del sistema .....	32
<b>Tabla 5</b> Características técnicas o métricas del sistema .....	32
<b>Tabla 6</b> Tabla de símbolos para la Matriz QFD .....	34
<b>Tabla 7</b> Tabla de Resultados de la matriz QFD.....	34
<b>Tabla 8</b> Subsistemas del proyecto .....	35
<b>Tabla 9</b> Tabla de ventajas y desventajas del mecanismo cuello resorte.....	36
<b>Tabla 10</b> Tabla de ventajas y desventajas del mecanismo cuello paralelo.....	36
<b>Tabla 11</b> Tabla de ventajas y desventajas del mecanismo cuello serie .....	37
<b>Tabla 12</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de mecanismo del cuello ....	38
<b>Tabla 13</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo.....	38
<b>Tabla 14</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Resistencia .....	39
<b>Tabla 15</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Manufactura.....	39
<b>Tabla 16</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de mecanismo del cuello .....	39
<b>Tabla 17</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de material de la carcaza ....	47
<b>Tabla 18</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Costo.....	47
<b>Tabla 19</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Resistencia .....	47
<b>Tabla 20</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Disponibilidad .....	47
<b>Tabla 21</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de material de la carcasa .....	47

<b>Tabla 22</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de motores del sistema .....	57
<b>Tabla 23</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Precisión .....	58
<b>Tabla 24</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Costo .....	58
<b>Tabla 25</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Control .....	58
<b>Tabla 26</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de motor .....	58
<b>Tabla 27</b> Concepto final subsistema cuello .....	59
<b>Tabla 28</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de material de la máscara ...	60
<b>Tabla 29</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo .....	60
<b>Tabla 30</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Transmisión de Luz .....	60
<b>Tabla 31</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Manufactura .....	61
<b>Tabla 32</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de material de la máscara .....	61
<b>Tabla 33</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de proceso de conformado..	62
<b>Tabla 34</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo .....	62
<b>Tabla 35</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio tiempo .....	62
<b>Tabla 36</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Proceso de calentamiento .....	63
<b>Tabla 37</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de proceso de conformado .....	63
<b>Tabla 38</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de lentes .....	64
<b>Tabla 39</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo .....	65
<b>Tabla 40</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio ángulo de visión .....	65
<b>Tabla 41</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Resolución óptica .....	65
<b>Tabla 42</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo lentes .....	65
<b>Tabla 43</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de proyector .....	67



<b>Tabla 44</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo.....	67
<b>Tabla 45</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de portabilidad .....	67
<b>Tabla 46</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de contraste .....	67
<b>Tabla 47</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de proyector.....	68
<b>Tabla 48</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de Software de animación ..	69
<b>Tabla 49</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de disponibilidad.....	69
<b>Tabla 50</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de facilidad de uso .....	69
<b>Tabla 51</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de compatibilidad de Ubuntu...	69
<b>Tabla 52</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Software de animación .....	70
<b>Tabla 53</b> Concepto final subsistema proyección gestual.....	70
<b>Tabla 54</b> Sensores, actuadores y módulos de interacción .....	71
<b>Tabla 55</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Módulo TTS .....	72
<b>Tabla 56</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de claridad d de voz .....	72
<b>Tabla 57</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Fluidez .....	72
<b>Tabla 58</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de disponibilidad.....	72
<b>Tabla 59</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Módulo TTS .....	73
<b>Tabla 60</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Módulo STT .....	74
<b>Tabla 61</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Velocidad de respuesta .....	74
<b>Tabla 62</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de compatibilidad .....	74
<b>Tabla 63</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de disponibilidad.....	74
<b>Tabla 64</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Módulo STT .....	75

<b>Tabla 65</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de reconocimiento de palabras claves.....	75
<b>Tabla 66</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Precisión.....	76
<b>Tabla 67</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Precisión.....	76
<b>Tabla 68</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Compatibilidad.....	76
<b>Tabla 69</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de reconocimiento de palabras claves .....	76
<b>Tabla 70</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Módulo de Visión Artificial .....	77
<b>Tabla 71</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Flexibilidad .....	77
<b>Tabla 72</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Robustez.....	77
<b>Tabla 73</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Fiabilidad .....	78
<b>Tabla 74</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Modulo de visión Artificial .....	78
<b>Tabla 75</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Chatbot .....	79
<b>Tabla 76</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Flexibilidad .....	79
<b>Tabla 77</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Robustez.....	79
<b>Tabla 78</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Compatibilidad.....	79
<b>Tabla 79</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Chatbot .....	80
<b>Tabla 80</b> Concepto final subsistema interacción .....	80
<b>Tabla 81</b> Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Tarjeta de Control.....	81
<b>Tabla 82</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Costo .....	82
<b>Tabla 83</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Velocidad de Procesamiento .....	82

<b>Tabla 84</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Facilidad de Uso .....	82
<b>Tabla 85</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Tarjeta Controladora.....	82
<b>Tabla 86</b> Matriz de selección de criterios para la selección del software para diseño del HMI ...	83
<b>Tabla 87</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de software libre .....	83
<b>Tabla 88</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de facilidad de uso .....	84
<b>Tabla 89</b> Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de compatibilidad .....	84
<b>Tabla 90</b> Tabla de Holmes para la selección del tipo de Software del HMI.....	84
<b>Tabla 91</b> Concepto final subsistema comunicación .....	84
<b>Tabla 92</b> Lista de materiales diseño CAD cabeza antropomórfica .....	86
<b>Tabla 93</b> Hoja de procesos impresión 3D .....	91
<b>Tabla 94</b> Hoja de procesos CNC-Rótula macho .....	91
<b>Tabla 95</b> Shape Keys implementadas en el robot.....	102
<b>Tabla 96</b> Unidades de acción implementadas en el robot. ....	104
<b>Tabla 97</b> Tabla de conversión de fonemas hacia visemas.....	107
<b>Tabla 98</b> Ángulos de rotación .....	108
<b>Tabla 99</b> Ángulos del motor.....	109
<b>Tabla 100</b> Tipos de moldes con diferentes factores .....	112
<b>Tabla 101</b> Nivel de confianza.....	115
<b>Tabla 102</b> Resultado SUS.....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Visard.....	2
<b>Figura 2.</b> Robot NAR.....	3
<b>Figura 3.</b> Robot K-lu-K.....	3
<b>Figura 4.</b> Línea del tiempo de las cabezas robóticas a lo largo de los años.....	10
<b>Figura 5.</b> Robot KISMET.....	11
<b>Figura 6.</b> Robot Albert Hubo.....	12
<b>Figura 7.</b> Robot GRACE.....	13
<b>Figura 8.</b> Robot SOCIBOT.....	14
<b>Figura 9.</b> Diferentes tipos de robots antropomórficos.....	17
<b>Figura 10.</b> Mapa ilustrativo de antropomorfismo aplicado a las cabezas robóticas.....	18
<b>Figura 11.</b> Valle Inquietante.....	19
<b>Figura 12.</b> Componentes de los sistemas sensoriales en robots.....	20
<b>Figura 13.</b> Diferentes tipos de cámaras a) Xtion Prolive b) Kinect Xbox 360 c) Intel RealSense d) Mynt Eye.....	22
<b>Figura 14.</b> Modelo RGB y HSV de colores.....	25
<b>Figura 15.</b> Detección facial y características faciales.....	26
<b>Figura 16.</b> Zonas Prosémicas de Hall.....	27
<b>Figura 17.</b> Matriz QFD del proyecto.....	33
<b>Figura 18.</b> Prototipo de mecanismo Cuello Resorte.....	36
<b>Figura 19.</b> Prototipo de mecanismo cuello paralelo.....	37
<b>Figura 20.</b> Prototipo de mecanismo cuello serie.....	38

<b>Figura 21.</b> Diagrama principal del mecanismo paralelo del cuello.....	40
<b>Figura 22.</b> Vectores, Puntos y Sistemas de coordenadas para el método grafico .....	41
<b>Figura 23.</b> Coordenadas de los puntos de la junta esférica de la parte inferior.....	42
<b>Figura 24.</b> Coordenadas de la plataforma interior del mecanismo.....	42
<b>Figura 25.</b> Sistemas de referencia y ángulo de giro para el vector V2.....	43
<b>Figura 26.</b> Análisis esfuerzo Von Mises-Rótula .....	48
<b>Figura 27.</b> Tasa de convergencia Von Mises-Rótula .....	49
<b>Figura 28.</b> Reporte de resultados-Rótula.....	49
<b>Figura 29.</b> Análisis esfuerzo Von Mises-Manivela.....	50
<b>Figura 30.</b> Tasa de convergencia Von Mises-Manivela.....	51
<b>Figura 31.</b> Reporte de resultados-Manivela .....	51
<b>Figura 32.</b> Análisis de esfuerzos Von Mises Base-Robot .....	52
<b>Figura 33.</b> Tasa de convergencia Base-robot .....	53
<b>Figura 34.</b> Reporte de resultados Base-Robot.....	53
<b>Figura 35.</b> Diseño de la placa.....	54
<b>Figura 36.</b> Diagrama del cuerpo libre de la junta manivela motor.....	55
<b>Figura 37:</b> Diagrama del cuerpo libre para el movimiento de la base del robot .....	56
<b>Figura 38.</b> Fotografía con el lente Panomorph.....	64
<b>Figura 39.</b> Fotografía con el lente ojo de pez.....	64
<b>Figura 40.</b> Explotado 3D de la Cabeza Robótica Antropomórfica .....	85
<b>Figura 41.</b> Prototipo Cabeza Antropomórfica .....	86
<b>Figura 42.</b> Impresión torso del robot.....	88

<b>Figura 43.</b> Partes impresas en 3D a) soporte para el proyector y lente ojo de pez b) carcasa del robot c) mecanismo para el movimiento del cuello-junta universal d) base del robot.....	89
<b>Figura 44.</b> Partes manufacturadas CNC a) Manivela-motor b) rótula .....	89
<b>Figura 45.</b> Máscara termo conformada .....	90
<b>Figura 46.</b> Ensamble total del robot .....	90
<b>Figura 47.</b> Esquema de Comunicación Control Motores .....	92
<b>Figura 48.</b> Esquema de comunicación nodo Cinemática Inversa .....	93
<b>Figura 49.</b> Ejemplo de la detección del algoritmo de visión artificial .....	94
<b>Figura 50.</b> Esquema de comunicación nodo Visión Artificial .....	94
<b>Figura 51.</b> Esquema de comunicación nodo Dialog Flow .....	95
<b>Figura 52.</b> Diagrama de Nodos completo .....	97
<b>Figura 53.</b> Distribución de Ventanas del HMI.....	97
<b>Figura 54.</b> Ventanas de la Interface Humano Maquina.....	98
<b>Figura 55.</b> Rostro base en Blender .....	101
<b>Figura 56.</b> Proceso de creación de las shapes keys .....	102
<b>Figura 57.</b> Bones acoplados a la base del rostro y unidos a la armadura.....	103
<b>Figura 58.</b> Emociones implementadas al robot a) Felicidad b) Enojo c) Sorpresa d) Tristeza) .	104
<b>Figura 59.</b> Características cliente servidor para comunicación blender ros.....	105
<b>Figura 60.</b> Mensajes de verificación para la correcta comunicación de blender con ros .....	106
<b>Figura 61.</b> Ejemplo de reconocimiento del módulo STT .....	106
<b>Figura 62.</b> Recepción de la respuesta de la base da tos de dialog flow.....	106

<b>Figura 63.</b> Archivo de visemas para la frase Hola. ¿Cómo estás? .....	108
<b>Figura 64.</b> Posición inicial de los motores .....	109
<b>Figura 65.</b> Primera prueba motores .....	110
<b>Figura 66.</b> Segunda prueba motores .....	110
<b>Figura 67.</b> Tercera prueba motores .....	111
<b>Figura 68.</b> Cuarta prueba motores .....	111
<b>Figura 69.</b> Escala ortográfica con diferentes factores a) Factor de escala 4.5 b) Factor de escala 5.2 c) factor de escala 6 .....	112
<b>Figura 70.</b> Tipos de moldes para los rostros con diferentes factores a) Cuboide b) Cilíndrico c) Esférico.....	113
<b>Figura 72.</b> Resultados encuesta SUS.....	117
<b>Figura 73.</b> Proyecto futuro acoplando una arquitectura gaze control. ....	122

## **RESUMEN**

El proyecto consiste en el diseño y la construcción de una cabeza robótica antropomórfica con proyección gestual. Los componentes principales del proyecto son la estructura de la cabeza robótica, los sistemas de interacción humano-máquina y la proyección gestual. La estructura tiene las siguientes partes: torso, cabeza y mecanismo de movilidad tomando en cuenta las dimensiones reales de una cabeza humana. La cabeza fue dividida en dos partes: el rostro, parte principal de la proyección gestual y la estructura. El mecanismo de movilidad es un mecanismo de 3 grados de libertad, controlado a partir de servomotores, ubicado en el torso, que permiten la movilidad de la cabeza en X, Y y Z. Los sistemas de interacción humano máquina que se implementaron fueron los módulos TTS, STT de google, reconocimiento de palabras claves usando snowbody, visión artificial se utilizó el algoritmo de viola jones Haar-cascade que ubicó un punto característico sobre la nariz lo que permitió el seguimiento y chatbot que permitieron al robot interactuar de mejor manera con el usuario además de comunicarse con las personas. También el robot tiene la capacidad de simulación de uno o más sentidos del ser humano como son la vista y el oído. Por tanto, el propósito del trabajo fue diseñar y construir una cabeza robótica antropomórfica flexible, de costo moderado, con antropomorfismo aceptable, también la implementación de los sentidos vista y oído. Se diseñó un rostro humano capaz de mostrar expresiones faciales con ayuda de la creación de unidades de acción vinculándolos a los bones que permitieron el movimiento del rostro.

### **PALABRAS CLAVES**

- **CABEZA ROBÓTICA**
- **ANTROPOMORFISMO**
- **UNIDADES DE ACCIÓN**



## **ABSTRACT**

The project consists in the design and construction of an anthropomorphic robotic head with gestural projection. The main components of the project are the structure of the robotic head, the human-machine interaction systems and the gestural projection. The structure has the following parts: torso, head and mobility mechanism taking into account the real dimensions of a human head. The head was divided into two parts: the face, the main part of the gestural projection and the structure. The mobility mechanism is a mechanism of 3 degrees of freedom, controlled from servomotors, located in the torso, which allows the mobility of the head in X, Y and Z. The human machine interaction systems that were implemented were the modules TTS, google STT, keyword recognition using snowbody, artificial vision, the viola jones Haar-cascade algorithm was detected that located a characteristic point on the nose which recognized the tracking and chatbot that allowed the robot to interact better with the user in addition to communicating with people. The robot also has the ability to simulate one or more human senses such as sight and hearing. Therefore, the purpose of the work was to design and build a flexible anthropomorphic robotic head, of moderate cost, with acceptable anthropomorphism, also the implementation of the senses seen and heard. A human face was designed capable of showing facial expressions with the help of the creation of action units linking them to the bones that allowed the movement of the face.

## **KEYWORDS**

- **ROBOTIC HEAD**
- **ANTHROPOMORPHISM**
- **ACTION UNITS**

## CAPÍTULO 1

### 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El capítulo resume los antecedentes, objetivos, justificación e importancia sobre el diseño y construcción de una cabeza robótica antropomórfica con proyección gestual. Además, en el capítulo se explica brevemente acerca de los robots sociales, objetivos del proyecto y la estructura del documento para los demás capítulos.

#### 1.1. Antecedentes

Los avances en la ingeniería y la inteligencia artificial son fundamentales para el desarrollo tecnológico y de robots. Según (Garrell, 2010) en la actualidad los robots desempeñan tareas dentro del hogar, ayuda médica, asistencia a personas discapacitadas, educación, rastreo etc.

A medida que surge el campo de la vida artificial y la necesidad de integrar robots al entorno físico y social. Según (Duffy B. , 2003) la forma humanoide es una estrategia que integra a los robots con el entorno, en consecuencia, hoy en día el fin de muchos investigadores es construir un robot con una apariencia similar a un humano para facilitar la interacción social con las personas.

Actualmente, existen varios trabajos desarrollados en el ámbito de la robótica social, interacción humano-robot y el antropomorfismo realizados por estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE entre ellos se pueden describir:

Según (Ochoa Arias & Trávez Acuña, 2018) el “Diseño y construcción de una plataforma robótica para pruebas de técnicas sobre visión artificial que permita el aprendizaje y desarrollo del software en robots interactivos” se observa en la Figura 1 el cual tiene por objetivo crear una plataforma que sirva como herramienta en el aprendizaje y desarrollo de software para robots

interactivos. También se implementa en la plataforma las técnicas de visión artificial como la detección de expresiones faciales, detección y seguimiento de objetos, además de desarrollar un algoritmo que estima la distancia entre el objeto y plataforma por último se hace pruebas y un análisis de resultados.



**Figura 1.** Visard

Fuente: (Ochoa Arias & Trávez Acuña, 2018)

El “Rediseño y construcción de un robot social para interacción hombre máquina orientado a la educación de niños/as de 2 a 5 años”, según (Espinosa Erazo & Almeida Gallardo, 2018) se realiza una nueva versión llamada NAR que se orienta a la educación, se obtuvo un robot de 7 grados de libertad. Las emociones que expresa NAR son tristeza, felicidad, enojo, duda y sorpresa por medio de los movimientos de la cabeza, cejas. También es capaz de detectar y seguir rostros. Contiene los módulos TTS y un chatbot. Y tiene módulos de enseñanza tanto de números como de colores para niños de 2 a 5 años al final se realizan pruebas del funcionamiento en donde se define el entorno, con la finalización de un juego para niños.



**Figura 2.** Robot NAR

Fuente: (Espinosa Erazo & Almeida Gallardo, 2018)

“Diseño y construcción de un rostro robótico de apariencia humana, con capacidad de ejecutar gestos y emociones, para la ESPE extensión Latacunga”, según (Ruales Cortés, 2015) se desarrolla el robot K-lu-K que busca reproducir los comportamientos del ser humano, puede comunicarse por medio de un módulo de reconocimiento de voz, módulo de reproducción de sonidos y un sistema de audio, además el robot genera movimientos sincronizados de la cabeza, parpados, ojos, boca, frente con ayuda de servomotores. Se desarrolló una interfaz para interactuar entre en hombre y el robot.



**Figura 3.** Robot K-lu-K

Fuente: (Ruales Cortés, 2015)

## **1.2. Justificación e importancia**

Los robots sociales se han creado para la interacción entre humano-robot en varias áreas como la educación, salud, calidad de vida, entretenimiento etc. Pero a pesar del progreso significativo hacia el desarrollo social realista, aún existe una serie de problemas por resolver. Primero, los robots sociales actuales aún no tienen la capacidad suficiente para tener una interacción social adecuada con el ser humano. Segundo, la construcción y su mantenimiento son costosos. En tercer lugar, los robots sociales actuales aún tienen que alcanzar todas las capacidades emocionales y sociales necesarias para una interacción rica y robusta con los seres humanos. Finalmente, encontrar un grado de antropomorfismo adecuado que debe tener el robot social puesto que al asemejarse tanto a la apariencia de un ser humano puede existir un punto de inflexión en donde la reacción del ser humano puede convertirse en una antipatía debido al exceso de semejanza.

El propósito del trabajo es diseñar y construir una cabeza robótica antropomórfica que sea flexible, de costo moderado, con antropomorfismo aceptable evitando caer en una reacción negativa por parte de ser humano, también la implementación de los sentidos y proyección gestual para ayudar a la naturalidad en la interacción.

Con ayuda del software Blender de animación se creará un rostro humano que tenga la capacidad de mostrar expresiones faciales como alegría, sorpresa, tristeza y enojo, para luego ser proyectado en una máscara translúcida con ayuda de un proyector que será colocado en el mecanismo implementado en el cuello el cual podrá moverse como una cabeza humana.

## **1.3. Objetivo**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Diseñar y construir una cabeza robótica antropomórfica con proyección gestual

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar, construir y obtener el mecanismo y la cinemática inversa de la cabeza robótica.
- Desarrollar e implementar un sistema de proyección gestual a la cabeza robótica.
- Generar e integrar a la cabeza robótica los módulos de interacción como son TTS<sup>1</sup> etc.
- Realizar una interfaz gráfica para facilitar la operación del prototipo.
- Integrar un sistema de sensores a la cabeza robótica para la simulación de los sentidos de la vista y el oído.

### 1.4. Descripción general del proyecto

El proyecto consiste en el diseño y la construcción de una cabeza robótica antropomórfica con proyección gestual. Los componentes principales del proyecto son la estructura de la cabeza robótica, los sistemas de interacción humano-máquina, y la proyección gestual.

La estructura de la cabeza robótica tiene las siguientes partes principales: torso, cabeza y mecanismo de movilidad. El torso en la base del robot, será diseñado a partir en un software de diseño CAD y manufacturado en impresión 3D. La cabeza será diseñada en el mismo software que el torso, pero será dividida en dos partes: el rostro, parte principal de la proyección gestual, y la estructura que al igual será manufacturada del mismo modo que el torso. El mecanismo de movilidad es un mecanismo de 3 grados de libertad, controlado a partir de servomotores, ubicado en el torso, que permiten la movilidad de la cabeza en X, Y y Z.

La proyección gestual es la parte principal del proyecto, el cual permite la proyección del rostro y de las diferentes expresiones que va a presentar, aquí se puede medir también el grado de

---

<sup>1</sup> TTS: Text to speech

antropomorfismo de nuestro proyecto, el cual busca conseguir un grado aceptable a un bajo costo, permitiendo de mejor manera la interacción con las personas a su alrededor.

Los sistemas de interacción humano máquina permiten al robot interactuar, comunicarse con las personas, los sistemas de interacción están compuestos por diferentes módulos que permiten la simulación de uno o más sentidos del ser humano, entre ellos se encuentra: Text to Speech, reconocimiento de rostros y gestual, chatbot básico.

### **1.5. Estructura del documento**

El documento se compone de cinco capítulos: El Capítulo I es una descripción básica del proyecto en se presentan los antecedentes, estudios e investigaciones desarrollados tanto a nivel nacional como internacional acerca del tema planteado, también se presentan los objetivos, alcance, importancia y una descripción del mismo

El Capítulo 2 es una fundamentación teórica acerca de los temas relacionados con el proyecto, los temas más importantes en el siguiente capítulo son: Robótica Social, características de los robots sociales, antropomorfismo.

El Capítulo 3 expone el diseño de la cabeza robótica entre los más importantes la estructura, el mecanismo de movilidad, los sistemas de interacción y proyección, y la integración de los mismos para su funcionamiento.

El Capítulo 4 describe las pruebas realizadas de funcionamiento y los resultados obtenidos, con el fin de lograr medir a través del estudio de las diferentes variables de nuestro sistema.

El Capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas una vez concluida la elaboración del proyecto y las recomendaciones para trabajos o estudios a futuro.

## CAPÍTULO 2

### 2. ESTADO DEL ARTE

El capítulo se desarrolla una recopilación acerca de las bases científicas y tecnológicas en la cuales se basa el proyecto. Las cabezas robóticas es el tema central, los puntos claves son definición, planteamiento del problema, la clasificación, las características, así como una comparación entre los diferentes tipos de cabezas robóticas.

Posterior se describe el antropomorfismo, tocando temas como definición, el papel que ha tenido en la robótica, vale inquietante como los más importantes. Se describe también los sistemas sensoriales, dando una pequeña definición, para posterior pasar a las etapas y presentar un resumen de cada una de ellas.

#### 2.1. Cabezas Robóticas

##### 2.1.1. Introducción

Para definir cabeza robótica, es necesario partir de la definición de robot social. Según (Chaminade et al., 2002), un robot social es aquel que consigue comunicarse con el ser humano, comprende e incluso se relaciona con las personas de una manera personal, además debe tener la capacidad de entender a los humanos y a su vez, los seres humanos deberían entender al robot.

Por la siguiente razón los robots sociales se han convertido en un campo de estudio muy amplio, la necesidad de tener robots que pueden ser introducidos en ambientes no controlados y que puedan ayudar en tareas cotidianas como son educación, entretenimiento, asistencia social y compañía. Acorde con (Duffy B. , 2003), la interacción humano- robot es un aspecto básico para los tipos de robots, y se puede facilitar dependiendo de ciertas características de los robots como



son el antropomorfismo, la capacidad de tener expresiones semejantes a la de un humano, así mismo como la de comprender las mismas y reaccionar de una manera acorde a ellas.

Entonces, según (Delaunay F. C., 2016) la definición de cabeza robótica es un robot social, cuyo objetivo es el de simular o aparentar expresiones del rostro humano, para facilitar la interacción humano-robot, mediante el uso de diferentes tecnologías como son actuadores mecánicos, avatares en pantallas o a proyecciones de luz. Para generar una mejor predisposición de los usuarios hacia el robot permitiendo al mismo desempeñarse mejor en la tarea a la cual haya sido asignado.

### **2.1.2. Línea del tiempo de las cabezas robóticas**

El estudio de cabezas robóticas en los últimos 20 años ha permitido el nacimiento de varios prototipos, los cuales buscan cubrir la función principal de emular los rasgos y emociones de las personas, analizar y predecir comportamientos, es decir una interacción considerable entre humano-máquina, En la Figura 4, se observa una línea del tiempo en la cual se presentan todos los robots, comenzando por cabezas de tecnología de retroproyección, pasando por cabezas mecatrónicas y androides y terminando con el sistema Tengai.

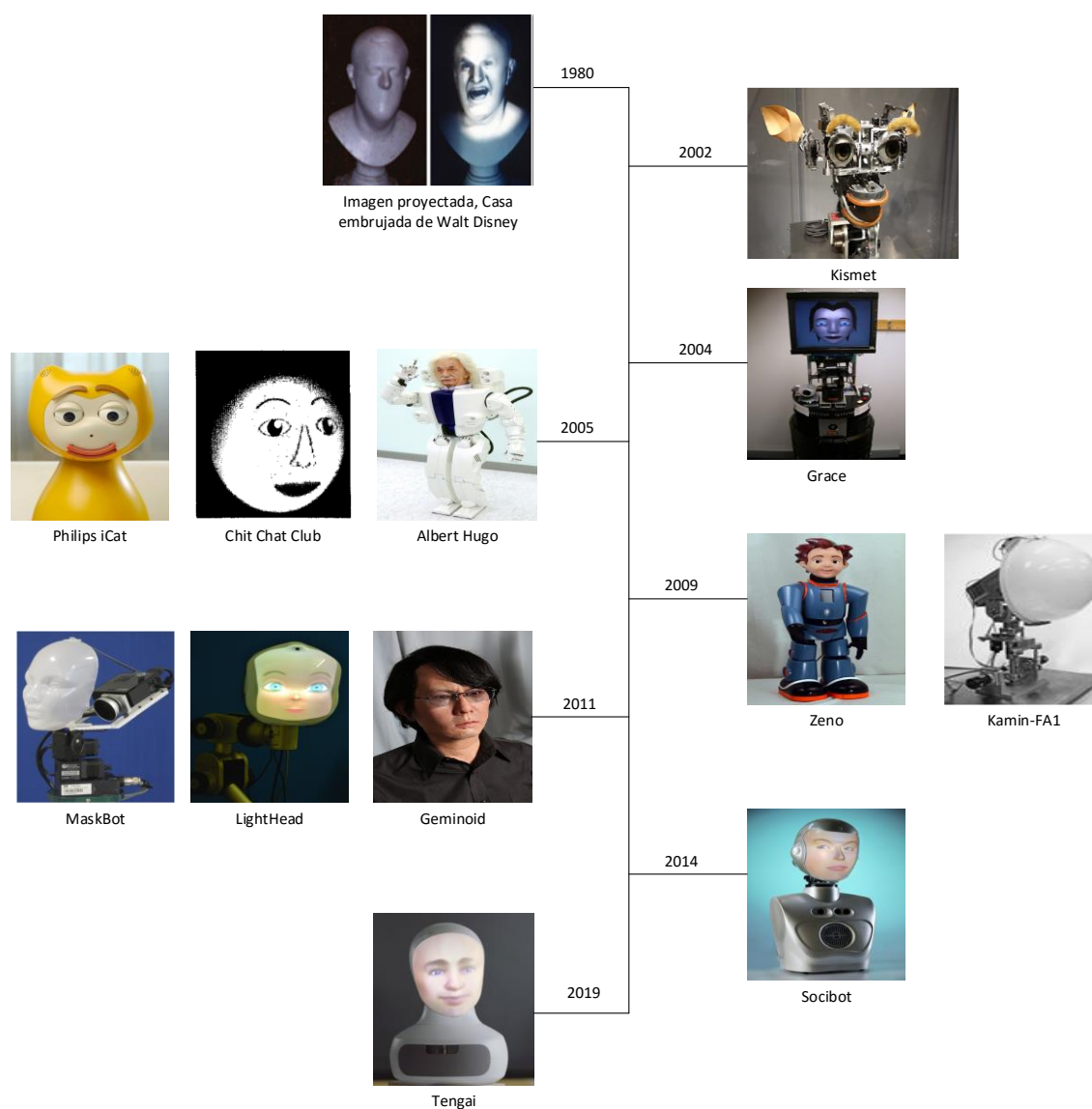
Se presentan los avances de la tecnología en los diferentes prototipos de cabezas tanto mecatrónicas como proyectadas. Según (Naimark, 1980), el inicio de la retroproyección nace en la Imagen proyectada en la casa embrujada de Walt Disney donde la imagen en movimiento de una mujer se proyectaba en una pantalla con forma de cara, lo que resultó en una proyección en 3D. Sin embargo, el material proyectado solo se basaba en películas, aún no se implementaba en aplicaciones robóticas.

Kismet , según (Breazeal, 2003) una cabeza robótica que apareció en el año de 2002, construido en el MIT por la doctora Cynthia Breazeal, el robot puede imitar ciertos gestos humanos y también mover los ojos, cejas y boca, más adelante aparece el robot llamado Grace construido por RWI, tiene una cara expresiva en una plataforma panorámica, Grace puede hablar con un sintetizador de voz de alta calidad y comprender las respuestas con su micrófono y software de reconocimiento de voz (Simmons et al., 2004). Durante el año 2005 se encuentra algunos prototipos como iCat, según (Breemen et al., 2005) fue desarrollado por la empresa Philips un robot de interfaz de usuario emocionalmente inteligente. Otro tipo de construcción son los androides, una primera aproximación, es el robot Albert Hubo, según (Ho et al., 2006) que fue un robot humanoide creado por el Kaist, su principal característica es la de utilizar piel sintética con el fin de obtener un parecido más real, otros académicos como (Karahalios & Dobson, 2005) crea a Chit Chat Club un robot retro proyectado que junta un entorno físico y virtual

Después hicieron sus apariciones los androides Zeno, según (Salvador et al., 2015) y Geminoid, según (Nishio, Ishiguro, & Hagita, 2007) respectivamente. También dentro de las diferentes investigaciones sobre retroproyección de lámparas de sombreado se encuentran Hashimoto con el robot Kamin-FA1 que tiene una función de expresión facial y utiliza una pantalla de superficie curva (Hashimoto et al., 2009), posteriormente Lincoln sobre el potencial de las lámparas de sombreado animatrónicas para robótica. Además, se encuentra LightHead y MaskBot. (Kuratate et al., 2011).

En las últimas investigaciones sobre retroproyección, según (Marks, 2014) se encuentra a Socibot implementado en el 2014 que es un robot compacto y sociable diseñado para interactuar entre humanos y robots con la capacidad de detectar rostros, rasgos, emociones, habla y gestos. En

el 2018 según (Savage, 2019) se desarrolla el Sistema Furhat: Tangai que usa la tecnología de proyección para transferir una cara a una base móvil con forma de cabeza, posee seguimiento visual en tiempo real. Una cámara rastrea a quien se está comunicando con Furhat, permitiendo que la cabeza, con tres grados de libertad, se incline y mantenga el contacto visual.



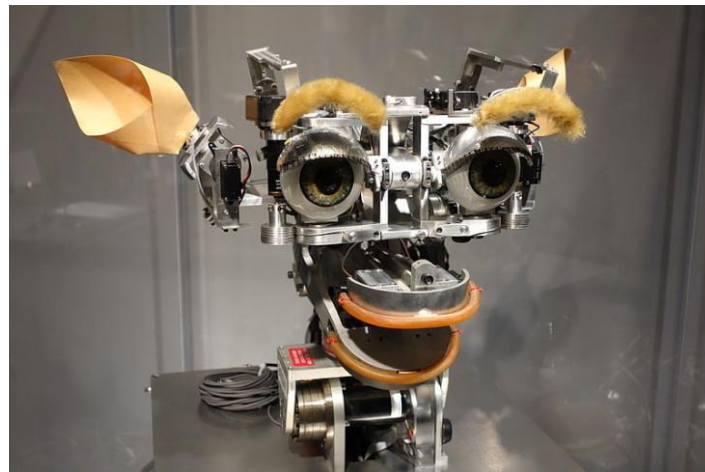
**Figura 4.** Línea del tiempo de las cabezas robóticas a lo largo de los años

### 2.1.3. Clasificación de cabezas robóticas

Existen varios diseños para cabezas robóticas que van desde avatares gráficos 2D a cabezas robóticas controladas mecánicamente. Los diseños se pueden separar en cuatro categorías principales:

- **Cabezas Mecatrónicas**

Las cabezas mecatrónicas según, (Espinosa Erazo & Almeida Gallardo, 2018) son robots implementados que hacen uso de dispositivos mecatrónicos y actuadores eléctricos para controlar los elementos faciales como son ojos, nariz, boca. El robot Kismet como se observa en la Figura 5, es uno de los primeros robots expresivos que tiene la capacidad de controlar párpados, cejas, labios e incluso orejas. Según (Mollahosseini et al., 2014), las cabezas mecatrónicas tienen la ventaja de ser 3D, pero tiene las desventajas de ser inflexibles y tener una limitada capacidad a la hora de mostrar expresiones faciales y habla, tener un costo de construcción muy alto y además una dificultad en la construcción del mismo.

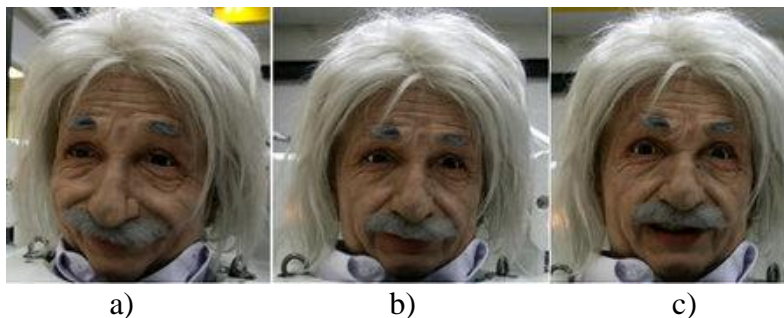


**Figura 5.** Robot KISMET

Fuente: (Breazeal, 2003)

- **Androides**

Los androides son otro tipo de robots implementados físicamente tiene su origen en la Animatrónica<sup>2</sup>. A diferencia de las cabezas mecatrónicas tienen un mayor número de actuadores que controlan una piel elástica flexible, son más realistas y tiene un aspecto más humano. El robot Albert Hubo como se observa en la Figura 6, son claros ejemplos de los tipos de caras, la desventaja es que son muy complejos mecánicamente, gran costo de diseño y construcción, y una gran demanda de recursos para el mantenimiento de los mismos. (Abdollahi et al., 2017)



**Figura 6. Robot Albert Hubo**  
a) sonrisa b) tristeza c) sorpresa  
Fuente: (Ho et al., 2006)

- **Avatares en pantalla**

Los avatares en pantalla son cabezas robóticas más simples y más antiguas, entre los ejemplos más conocidos, según (Simmons et al., 2003) se encuentran Grace como se observa en la Figura 7. Las animaciones para los modelos se desarrollan por cada expresión, para luego mostrar cada uno de ellas en una pantalla de computadora. La ventaja de los avatares es que son de bajo costo y tienen una alta flexibilidad, pero poseen varias limitaciones desde el punto de vista estético

---

<sup>2</sup> **Animatrónica:** Es la técnica que haciendo uso de mecanismos robóticos y electrónicos, simula el aspecto y comportamiento de los seres vivos empleando marionetas y otros muñecos mecánicos.

y no se puede establecer una mirada mutua debido a efecto Mona Lisa<sup>3</sup>, otra limitación importante son la fatal de ciertas características antropomórficas, por ejemplo no tienen textura.



**Figura 7.** Robot GRACE

Fuente: (Michalowski et al., 2006)

- **Avatares físicos proyectados con luz**

Los avatares físicos proyectados por luz, consisten en máscaras 3D translúcidas con avatares proyectadas sobre ellas. Los avatares físicos con luz proyectada son una herramienta de investigación altamente flexible, en relación con las cabezas mecatrónicas y de androide, en la Figura 8 se puede observar el Socibot, según (Wills et al., 2016).

Dichos sistemas, según (Delaunay & Belpaeme, 2012) evitan el efecto Mona Lisa y, por lo tanto, los usuarios pueden percibir correctamente la dirección de la mirada del robot, otras características que también se presentan son que tiene un costo y consumo de energía relativamente bajo, una reacción rápida y tiene un gran grado de antropomorfismo, aumentando el grado de

---

<sup>3</sup> **Efecto Mona Lisa:** se refiere a la impresión de que los ojos de una persona en una imagen parecen seguir al espectador cuando se mueve frente a la imagen.

aceptación que el sistema puede tener antes las personas, así como otras características importantes como una alta flexibilidad y un alto rango expresivo. Una desventaja de los avatares proyectados con luz no cuenta con la textura como si lo harían los androides al momento de tocar alguna parte de la cabeza.



**Figura 8.** Robot SOCIBOT.

Fuente: (Wills et al., 2016)

#### **2.1.4. Características de cabezas robóticas**

**Antropomorfismo:** un robot capaz de reproducir algunas de las características del ser humano, imitando rasgos distintivos como la apariencia y los movimientos. (Duffy B. R., 2003)

**Efecto Mona Lisa:** La impresión de que los ojos de una imagen estén siguiendo al objeto, que persiste independientemente de la perspectiva del espectador. (Delaunay F. C., 2016)

**Costo de desarrollo:** En el caso del costo de desarrollo para una cabeza robótica se tiene en cuenta una amplia gama de estructuras, mecanismos que son partes mecánicas, también existen componentes electrónicos, de control y simulación que utilizan plataformas comerciales tanto de software y hardware como arduino, raspberry, para control y simulación se encuentra ROS y

RobotC y la parte computacional en la cual se desarrollan los entornos de realidad virtual. (Sandoval et al., 2015)

**Rango expresivo:** Las cabezas robóticas muestran capacidades de comunicación e interacción. Puede mostrar e identificar comportamientos emocionales, reconocimiento de voz, fuentes de sonido, detección de rostros, así como sus estados de ánimo. (Delaunay F. C., 2016)

**Aceptación por parte del usuario:** Aquí se describe el Valle inquietante, es decir la afinidad o empatía de las personas hacia los robots pues al llegar a cierto nivel de semejanza, la respuesta emocional positiva se puede convertir en negativa. (Delaunay & Belpaeme, 2012)

**Textura:** La textura que se busca en una cabeza robótica es que se parezca a la piel humana para crear una confianza para el usuario logrando así una apariencia más antropomórfica del robot.

**Autonomía:** Con ayuda de la inteligencia artificial permite a las cabezas robóticas desempeñar actividades complejas, como reconocimiento y seguimiento a personas. (Ibañez, 2017)

**Grados de libertad:** Para el caso del cuello de la cabeza se utiliza para conocer la posición de cada actuador para que el efector llegue a la actividad programada. (Valero, 2006)

### **2.1.5. Análisis comparativo de características y tipos de cabezas robóticas**

En la Tabla 1 se presenta un análisis comparativo entre las características más importantes de cabezas robóticas como son costo de desarrollo, rango expresivo entre otras, y los tipos de cabezas antropomórficas.



**Tabla 1***Comparación de características y tipos de cabezas robóticas*

	<b>Cabezas mecatrónicas</b>	<b>Androides</b>	<b>Avatares en pantalla</b>	<b>Avatares físicos proyectados en luz</b>
<b>Costo de desarrollo</b>	Alto	Muy alto	Bajo	Relativamente bajo
<b>Rango expresivo</b>	Limitado	Limitado	Alto	Alto
<b>Textura</b>	No natural	Cercano a la piel humana	No natural	No Natural
<b>Aceptación por parte del usuario</b>	Relativamente alto	Alto pero puede caer en el valle inquietante	Alto	Alto
<b>Autonomía</b>	Alto	Muy Alto	Relativamente Alto	Relativamente Alto
<b>Grados de libertad</b>	Relativamente alto	Alto	Relativamente bajo	Relativamente bajo
<b>Antropomorfismo</b>	Relativamente alto	Alto pero puede caer en el valle inquietante	Bajo	Alto
<b>Efecto Mona Lisa</b>	Bajo	Bajo	Muy Alto	Relativamente bajo

Fuente: (Delaunay F. C., 2016)

## 2.2. Antropomorfismo

### 2.2.1. Definición

Según (Duffy et al., 2005), la palabra antropomorfismo viene de la palabra griega *anthropos* que significa hombre, y *morphe* que significa forma o estructura y consiste en atribuir características humanas a objetos inanimados, animales u otros con el fin de ayudarnos a reaccionar de una mejor manera ante las situaciones de la vida diaria. Es decir, atribuir estados cognitivos o

emocionales a algo basado en la observación para racionalizar el comportamiento en un entorno social determinado. En la Figura 9 se puede observar diferentes tipos de robots antropomórficos.

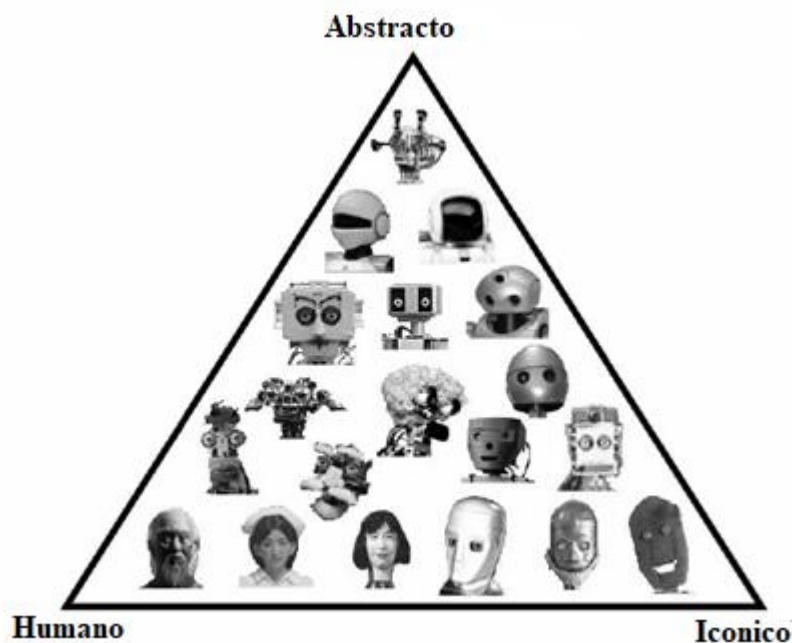


**Figura 9.** *Diferentes tipos de robots antropomórficos.*

Fuente: (“[Skolkovo Robotics V] Applying Anthropomorphic Robots Technology”, 2017)

### **2.2.2. Antropomorfismo en la robótica**

El antropomorfismo en la robótica, se entiende según (Duffy, 2005) como la similitud física a ciertos atributos del ser humano, el antropomorfismo se ha centrado más en las características faciales que se pueden tener, generando familiaridad que facilita la aceptación social de parte de las personas. En la Figura 10 se puede observar un mapa ilustrativo de las cabezas robóticas que poseen algún grado de antropomorfismo. “Human” hace referencia a cabezas robóticas lo más cercas posibles a la cabeza humana, “Iconic” emplea un conjunto mínimo de características como las que se encuentran a menudo en las caricaturas pero que logran ser expresivos, “Abstracto” se refiere a un diseño funcional más mecánico en el cual se hace uso de una estética humana mínima.

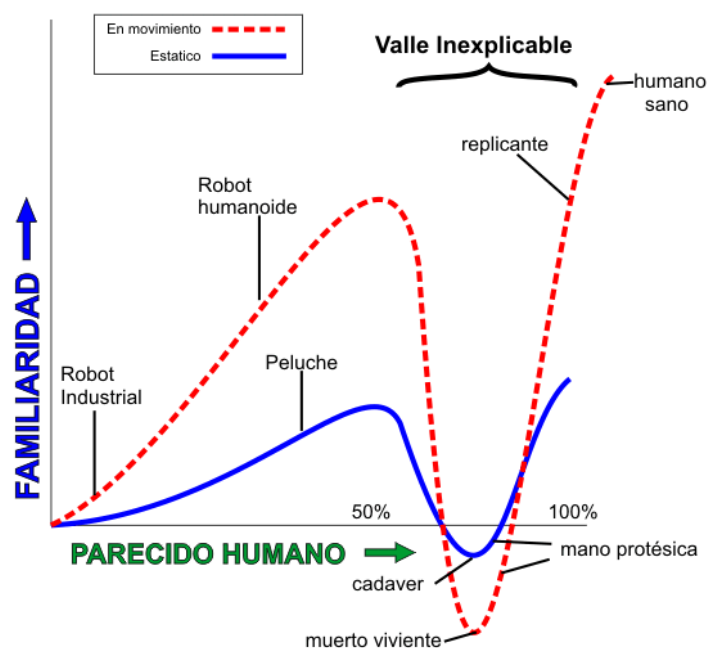


**Figura 10.** Mapa ilustrativo de antropomorfismo aplicado a las cabezas robóticas.

Fuente: (Duffy, 2005)

### 2.2.3. Valle Inquietante de Mori

La forma en que se mide el antropomorfismo fue planteado por Masahiro Mori con el valle inexplicable de Mori Figura 11, definido en (Mori et al., 2012) como una reacción de rechazo ante robots que intentan asemejarse física y gestualmente al hombre por parte de los humanos. Mori explica que mientras permanezca con bajo antropomorfismo provocara la aceptación por parte del usuario, mientras más se acerque a la apariencia humana incrementara su aceptación hasta un punto en donde el nivel de aceptación baje drásticamente para luego volver a subir pasando determinado rango.



**Figura 11.** Valle Inquietante

Fuente:(Sandoval, 2012)

Una explicación del efecto podría ser que un robot tenga aspecto humanoide, los rasgos que no son humanos destacarán, generando así una sensación de frialdad y lejanía, es decir causando rechazo. Otra, explicación propone que el comportamiento se debe a que ciertas acciones y rasgos de los robots, tienen o se asemejan a movimientos de los enfermos o moribundos, los rasgos pueden generar la sensación de riesgo contra la integridad, así como generar una paradoja lógica inconsciente.

## 2.3. Sistemas Sensoriales en Robots

### 2.3.1. Definición

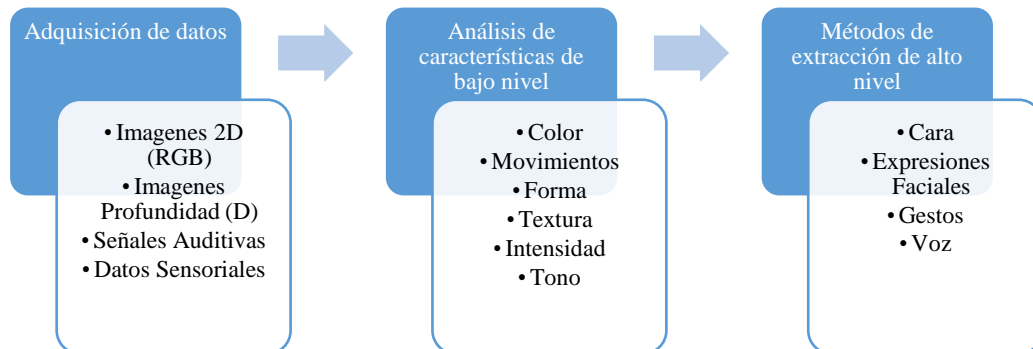
El sistema sensorial en los seres humanos es sumamente desarrollado, se presenta en la mayoría de situaciones de la vida diaria, desde tareas muy sencillas, hasta tareas de alta

complejidad, en dichas tareas es necesario interpretar la información que recoge nuestros sentidos, también coordinarla con la acción que se desarrolla. (Premebida, Ambrus, & Marton, 2019)

De la misma forma los robots han sido dotados de sistemas sensoriales que les permitan desenvolverse de una mejor forma en ambientes donde se encuentren en gran contacto con las personas, para poder tomar decisiones, planificar y operar en las circunstancias que se puedan presentar.

### 2.3.2. Componentes de los sistemas sensoriales

Los sistemas sensoriales necesitan de 3 etapas básicas para tener un alto nivel de interpretación las cuales son adquisición de datos, análisis de características de bajo nivel (LLF<sup>4</sup>), métodos de extracción de alto nivel (HLF<sup>5</sup>) como se observa en la Figura 12. (Premebida et al., 2019)



**Figura 12.** Componentes de los sistemas sensoriales en robots.

Fuente: (Prasad, Anandi, & Murthy, 2017)

A través de las etapas un sistema sensorial, crea una descripción del mundo permitiéndole realizar acciones de mayor complejidad como son la comprensión y el aprendizaje. La adquisición

<sup>4</sup> LLF: Low-level Feature

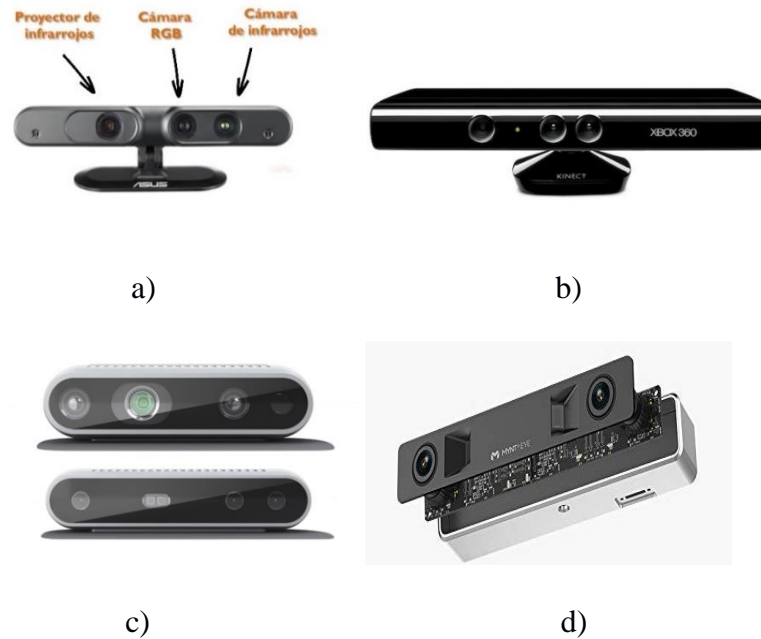
<sup>5</sup> HLF: High-level Feature

de datos recolecta mediante sensores los datos primarios del entorno. El análisis de características de bajo nivel es reducir el tamaño de los datos primarios adquiridos y proporcionar una descripción más eficiente de la información para la siguiente etapa. En la última etapa se analizan las características de alto nivel como son las expresiones faciales, los gestos, la identificación de voz.

### **2.3.3. Adquisición de datos**

Según (Cristina Sánchez, 2016) los sistemas de adquisición en los robots le permiten al mismo obtener información primaria del entorno mediante el uso de diferentes sensores. El proceso se lo realiza con el fin de imitar los sentidos de las personas, el sentido de la vista se lo realiza colocando cámaras las cuales permitan que el robot obtenga información de su entorno, el sentido de oído se lo imita con el uso de micrófonos, el sentido del tacto ha tenido un desarrollo muy amplio en los últimos años, debido a la introducción de robots en la medicina, el sentido del gusto y el olfato, son altamente complejos de imitar prueba de ello es que no han tenido un gran desarrollo en los últimos años.

(Prasad et al., 2017) afirma que entre las señales más importantes podemos encontrar las visuales que son altamente usadas en los sistemas sensoriales de los robots para tareas de percepción, detección facial, análisis de rasgos faciales, reconocimiento facial, seguimiento corporal, entre otros.. En el ámbito de señales visuales la cámara RGB como se observa en la Figura 13 es una de las soluciones más convencionales, pero en realidad dependiendo de diferentes factores como son la sensibilidad cromática, resolución, velocidad de cuadro, óptica (profundidad de enfoque, campo de visión).



**Figura 13.** Diferentes tipos de cámaras a) Xtion Pro Live b) Kinect Xbox 360 c) Intel RealSense d) Mynt Eye

Fuente: (“MYNT EYE Stereo Depth Camera Standard”, s/f)

Las señales auditivas son utilizadas a menudo como una fuente secundaria de información sensorial. Pero a pesar del tiempo el análisis de la señal de audio ha logrado gradualmente un papel clave en los sistemas sensoriales de los robots. El objetivo principal del análisis del procesamiento de señales de audio es extraer características de alto nivel como el habla, la expresión oral, el estado afectivo. Los sensores más utilizados son micrófonos o series de micrófonos.

Además de las señales visuales y auditivas, la percepción táctil también es importante para ampliar la capacidad sensorial del robot. Ahora existen varios sensores táctiles que pueden detectar el contacto humano. Los sensores se pueden colocar en el cuerpo del robot, un grave problema del procesamiento de señales táctiles es por ello que son aplicables en propósitos específicos. Se define la detección táctil como el proceso de detección y medición de una propiedad determinada de un

evento de contacto en un área predeterminada y el procesamiento de las señales. En la actualidad el desarrollo de robots para entornos no estructurados, existen varios sensores táctiles, en la Tabla 2, se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de ellos según (Dahiya & Valle, 2008).

**Tabla 2**

*Ventajas y desventajas de varios tipos de sensores táctiles*

Tipos	Ventajas	Desventajas
<b>Resistivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad</li> <li>• Bajo Costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto consumo de energía</li> <li>• En su mayoría, detecta un punto simple de contacto</li> </ul>
<b>Piezo Resistivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Buena sensibilidad</li> <li>• Poco ruido</li> <li>• Electronica Simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frágil</li> <li>• Respuesta no lineal</li> <li>• Histéresis</li> <li>• Sensible a la temperatura</li> </ul>
<b>Efecto Tunel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad</li> <li>• Flexibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respuesta no lineal</li> </ul>
<b>Capacitivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad</li> <li>• Bajo costo</li> <li>• Disponibles para chips comerciales de A/D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Histéresis</li> <li>• Electrónica compleja</li> </ul>
<b>Óptico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inmune a la interferencia electromagnética</li> <li>• Flexibilidad</li> <li>• Sensibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voluminosos</li> <li>• Perdida de Luz</li> <li>• Consumo de energía</li> </ul>
<b>Caucho Conductor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Histéresis mecánica</li> <li>• Respuesta no lineal</li> </ul>

Fuente: (Dahiya & Valle, 2008)

En relación al sentido del gusto, los intentos de simular este sentido se han centrado en tareas específicas, un claro ejemplo es el sistema de la Universidad Autónoma de Barcelona, es un prototipo de lengua electrónica que está formada por 21 electrodos que buscar distinguir diferentes químicos en diferentes tipos de cervezas.(SINC, 2014). Un estudio más reciente de la Universidad



Arthus en Dinamarca, detectaba cambios en las proteínas más comunes de saliva, para determinar cómo diferencias como son afectadas por compuestos de vino. (Alexandra Ossola, 2014)

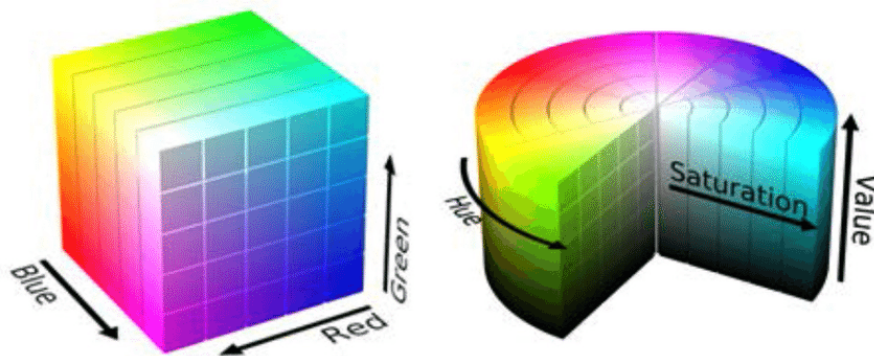
El sentido del olfato, ha tenido sus estudios desde comienzos de los 80, debido a que los robots que puede oler tienen muchas aplicaciones en la vida cotidiana, uno de los estudios más recientes es el de Blanca Lorena Villareal en (Alexandra Ossola, 2014), con la construcción de sensores que pueden medir la concentración de ciertos químicos en el aire.

Los sensores permiten simular los sentidos de los seres humanos y al igual que ellos permiten obtener información del entorno en el cual se encuentra el robot para luego, pasar a la posterior interpretación de bajo nivel.

#### **2.3.4. Interpretación de bajo nivel**

El objetivo principal de la interpretación de bajo nivel según (Prasad et al., 2017) es proporcionar valores descriptivos, es decir pueden ser cuantificables de alguna manera por ejemplo color, textura, forma u otras, a partir de los datos tomados por el sistema de adquisición de datos, que van a ser funcionales para la extracción de alto nivel.

Color: es una de las características visuales más utilizadas en la recuperación de imágenes. Normalmente el color se representa a través de un modelo de color. Existen varios modelos de color que sirven para la descripción, entre los más importantes podemos encontrar: RGB (rojo, verde, azul), y HSV (tono, saturación, valor), dichos modelos se observan en la Figura 14.



**Figura 14.** Modelo RGB y HSV de colores.

Fuente: (Schmoeller da Roza, Ghizoni da Silva, Pereira, & Wildgrube Bertol, 2016)

Textura: es una característica difícil de describir y se sujeta muchas veces a la percepción de cada una de las personas. La extracción de características de textura es computacionalmente intensiva y es altamente utilizada para ciertos sistemas como son los sistemas de recuperación de imágenes basados en contenido. Forma: la cual desempeña un papel esencial entre los diferentes aspectos de la información visual que se puede extraer. Es una característica muy importante en la búsqueda de similitudes.

### **2.3.5. Interpretación de alto nivel**

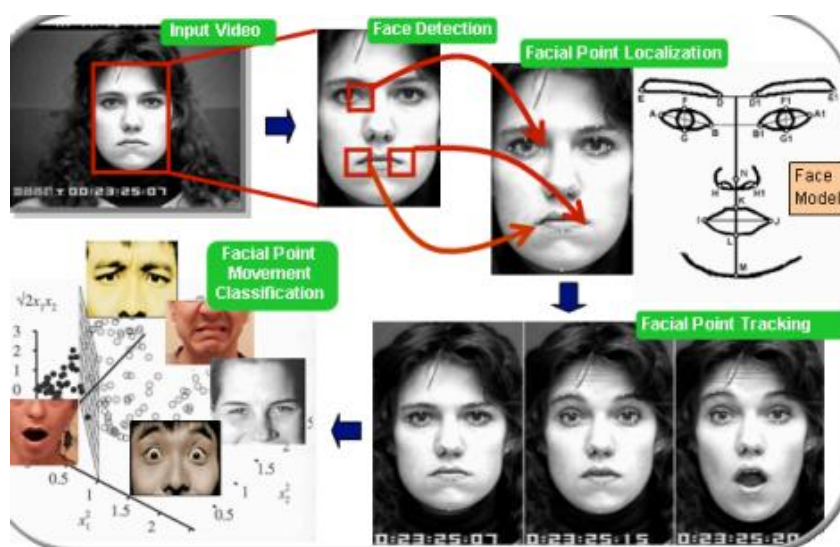
La interpretación de alto nivel consiste en inferir características realizando un análisis de la interpretación de bajo nivel. Por ejemplo, la forma es efectiva para la detección del cuerpo humano y la cara, mientras que la textura ayuda en las tareas de expresión facial. A continuación, se presentan los modelos más efectivos:

- **Reconocimiento facial y características faciales**

El rostro humano es una fuente de información social que las personas transmiten cuando interactúan entre sí. Las expresiones faciales son el canal de comunicación no verbal más importante para expresar actitudes. (Sharif, Javed, & Mohsin, 2012) afirma que a través de las

expresiones faciales se comparte intenciones y emociones, se realiza hincapié en mensajes verbales y regulan las interacciones sociales diarias.

Por dicha razón, la percepción del rostro y la capacidad de analizar las características faciales son una característica esencial que deben tener los robots sociales. La detección facial y el análisis de las características faciales son tareas muy sencillas para los humanos, su extracción es un problema complejo en los sistemas sensoriales como se muestra en la Figura 15



**Figura 15.** Detección facial y características faciales.

Fuente: (Pantic, 2009)

- **Reconocimiento de voz**

El habla es la forma más natural e intuitiva de comunicación entre las personas, y por lo tanto genera un gran interés por parte de los investigadores. Dados los objetivos de los sistemas sensoriales, el desarrollo de un reconocimiento de voz preciso es una de las prioridades clave de la investigación. (Yadav & Alam, 2018) afirma que el reconocimiento del habla requiere procesos similares a los utilizados para el reconocimiento de gestos, ya que el patrón del habla debe extraerse de la información que es tomado de los sensores.

- **Zona Proxémica**

El termino proxémica fue acuñado por el antropólogo Edward T. Hall en su libro de 1996 “La Dimensión Oculta” y se entiende como la percepción que el ser humano hace de su espacio personal, es decir el espacio que lo rodea. Hall también define cuatro zonas proxémicas como se muestran en la Figura 16. Las zonas proxémicas se muestran a continuación:

- Íntimo: tiene un rango de distancia entre 0 a 45 centímetros.
- Personal: tiene un rango de distancia entre 45 a 120 centímetros.
- Social: tiene un rango de distancia entre 1.2 a 3.6 metros.
- Pública: tiene una distancia superior entre 3.6 metros.

Es importante destacar que los estándares de espacio interpersonal dependen de cada cultura y región. Dependiendo de las culturas y de ciertos rangos las distancias pueden variar aumentando o disminuyendo.(Marquardt & Greenberg, 2012)



**Figura 16.** Zonas Prosémicas de Hall

Fuente: (Ballendat et al., 2010)

## 2.4. Tabla comparativa

**Tabla 3**

*Comparación de los trabajos realizados y características de los robots proyectados*

Proyecto	Costo de desarrollo bajo	Rango expresivo	Textura	Aceptación por parte del usuario	Autonomía	Grados de libertad	Antropomorfismo aceptable	Efecto Mona Lisa
Imagen proyectada-Casa embrujada Disney	X	X	-	X	-	-	-	-
Kamin-FA1	X	X	-	-	-	X	-	-
Chit Chat Club	-	X	-	X	X	X	-	-
Avatar Animatronics	-	X	-	X	-	X	X	-
LightHead	-	X	-	X	-	X	X	-
Maskbot	-	X	-	X	-	X	X	-
Soci Bot	-	X	X	X	X	X	X	-
Propuesta	X	X	-	X	-	X	X	-

## 2.5. Resumen

La cabeza robótica es un robot social, cuyo objetivo es simular o aparentar expresiones del rostro humano, para facilitar la interacción humano-robot, mediante el uso de diferentes tecnologías como son actuadores mecánicos, avatares en pantallas o proyecciones de luz. Las cabezas robóticas van desde avatares en 2D a cabezas controladas mecánicamente por tanto los diseños se pueden clasificar en cuatro categorías principales como cabezas mecatrónicas que son robots implementados que hacen uso de dispositivos mecatrónicos y actuadores eléctricos para controlar los elementos faciales como son ojos, nariz, boca. Son inflexibles y se limitan a la hora de mostrar expresiones faciales.

En la clasificación se encuentra los andróides, ellos tienen un mayor número de actuadores mecatrónicos que controlan una piel elástica flexible son realistas y tienen un aspecto más humano por otro lado su costo es mayor y diseño complejo. Los avatares en pantalla muestran las expresiones en una pantalla de computadora, su ventaja es el bajo costo y alta flexibilidad, es poco estético y no se establece una mirada mutua debido al efecto Mona Lisa. Y los avatares físicos proyectados con luz consisten en máscaras 3D translúcidas con avatares proyectadas sobre ellas.

Dentro de las características que tienen las cabezas robóticas se encuentra el antropomorfismo que consiste en atribuir rasgos humanos a objetos inanimados. Principalmente se ha centrado en el antropomorfismo facial generando así estados mentales y familiaridad que facilita la aceptación social de parte de las personas. La manera en cómo se mide el grado de aceptación viene dado por Masahiro Mori con el valle inexplicable de Mori que se define como una reacción de rechazo o empatía ante robots que intentan asemejarse física y gestualmente al ser humano.

El sistema sensorial en los seres humanos es sumamente desarrollado permite interpretar la información que recoge nuestros sentidos, también coordina con la acción que se desenvuelve. De la misma manera ocurre en los robots que se siguen cada vez dotando de los sistemas sensoriales e implementándose. Los sistemas sensoriales en los robots necesitan de 3 etapas básicas para tener un alto nivel de interpretación las cuales son adquisición de datos que recolecta mediante sensores datos primarios del entorno, análisis de características de bajo nivel reduce el tamaño de los datos primarios adquiridos como el color, movimientos, formas, textura, intensidad, tono que ayudan a la siguiente etapa, métodos de extracción de alto nivel se analizan las expresiones faciales, gestos e identificación de voz. En la Tabla 3 se observa una comparación entre algunos de los proyectos realizados y las características.

## CAPÍTULO 3

### 3. DISEÑO MECATRÓNICO

El capítulo presenta el diseño de una cabeza antropomórfica con proyección gestual. El diseño parte de la definición de necesidades y métricas del sistema que son comparadas a través de la matriz de calidad para definir los subsistemas y analizar cada uno de ellos. Los subsistemas de la cabeza son: cuello, proyección gestual, interacción y de comunicación.

El subsistema cuello abarca el mecanismo encargado de dar la movilidad a la cabeza, así como la selección de los actuadores adecuados para el mismo, proyección gestual compuesto por 4 partes importantes: proyector, lente, máscara y el software encargado del diseño del rostro y sus gestos. La interacción está compuesta por varios módulos como son TTS, STT, ChatBot y visión artificial, dichos módulos permiten una relación más fluida entre la cabeza y el entorno que lo rodee. Por último, el subsistema comunicación es el módulo encargado de la conexión entre cada una de las partes y la selección de la tarjeta adecuada para el control de los actuadores del sistema.

#### 3.1. Diseño del sistema basado en la matriz de calidad

El diseño se encuentra basado en la matriz de calidad (QFD) según, (Chan & Wu, 2002) es un método de diseño de productos que permite interpretar las necesidades del cliente en función de las métricas o característica técnicas del producto. Las necesidades y las métricas se pueden observar listadas en la Tabla 4 y en la Tabla 5 respectivamente.



### 3.1.1. Necesidades del sistema

**Tabla 4**

*Necesidades o requerimientos del sistema*

No	Requerimiento
1	Antropomorfismo aceptable
2	Costo Aceptable
3	Facilidad de Manejo
4	Facilidad de Uso
5	Portabilidad
6	Facilidad de Manufactura
7	Durabilidad
8	Estructura y componente livianos
9	Compacto
10	Interacción con las personas

### 3.1.2. Definición de características técnicas

**Tabla 5**

*Características técnicas o métricas del sistema*

N°	Característica Técnica
1	Proyección Gestual
2	Diseño de la mascara
3	Diseño del Mecanismo
4	Diseño de la carcaza
5	Estructura modular
6	Robustez
7	Diseño HMI
8	Software de código abierto
9	Visión Artificial
10	Reconocimiento facial y seguimiento de objetos
11	Reconocimiento de voz
12	Diseño de expresiones faciales

### 3.1.3. Matriz de Calidad

Una vez establecidos las necesidades y las características técnicas del sistema, se elabora la matriz de calidad (QFD), dando una ponderación con el fin de clasificar o dar cierta prioridad a las

características que más relación o importancia posean. En la Figura 17 se muestra la matriz QFD del proyecto.

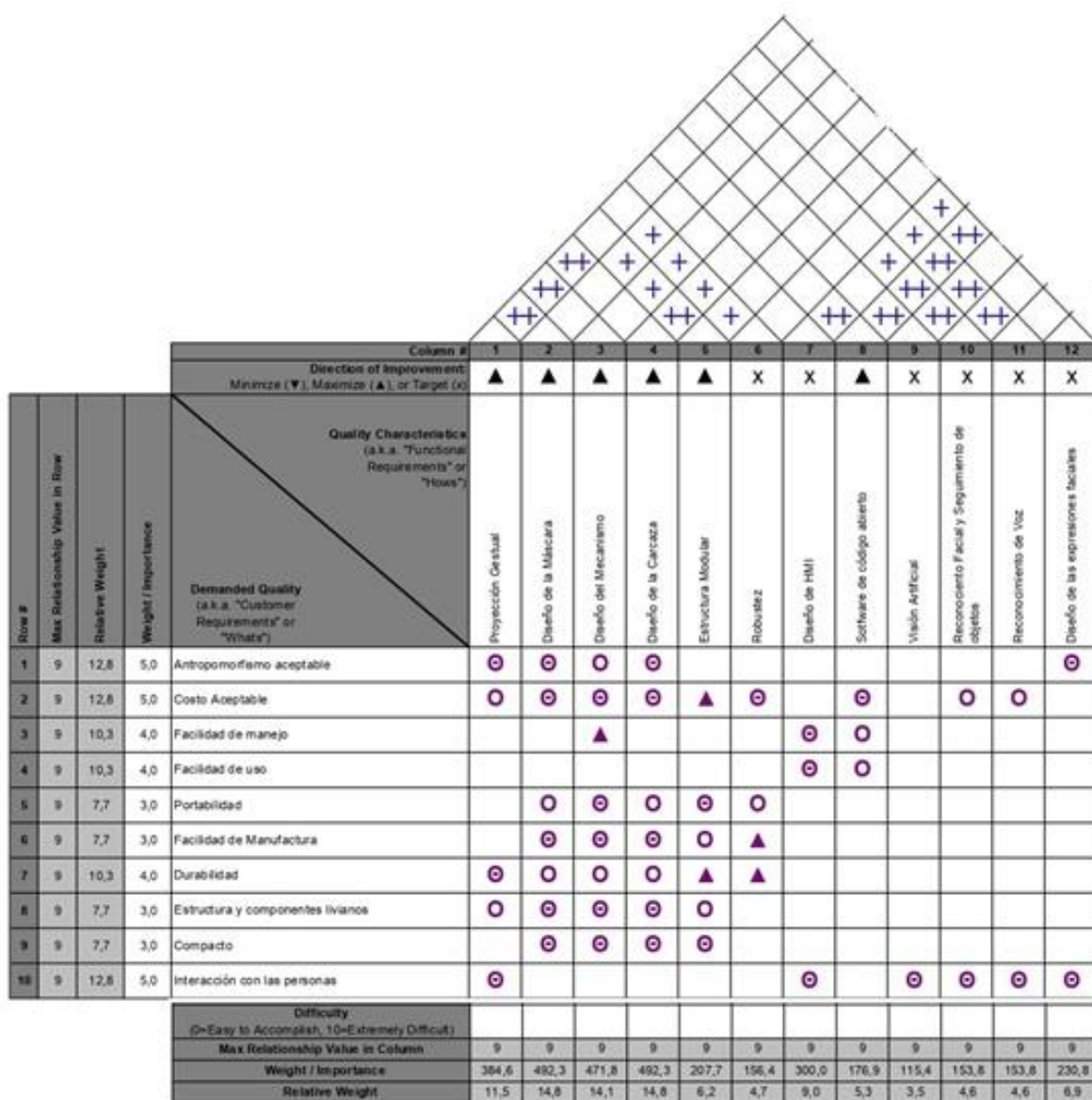


Figura 17: Matriz QFD del proyecto

En la Tabla 6 se muestra los símbolos usados para la elaboración de la matriz de calidad con sus respectivas puntuaciones de valor para su uso posterior en el cálculo del peso de relación.

**Tabla 6***Tabla de símbolos para la Matriz QFD*

Símbolo	Relación	Valor
⊖	Fuertemente Relacionado	9
○	Moderadamente Relacionado	3
▲	Pocamente Relacionado	1
++	Muy Correlacionado	
+	Correlacionado	

Una vez finalizado el análisis de la matriz QFD se extrae la información más importante en la

Tabla 7.

**Tabla 7***Tabla de Resultados de la matriz QFD*

N°	Característica Técnica	Importancia Relativa
1	Proyección Gestual	11.5
2	Diseño de la mascara	14.8
3	Diseño del Mecanismo	14.1
4	Diseño de la carcaza	14.8
5	Estructura modular	6.2
6	Robustez	4.7
7	Diseño HMI	9.0
8	Software de código abierto	5.3
9	Visión Artificial	3.5
10	Reconocimiento facial y seguimiento de objetos	4.6
11	Reconocimiento de voz	4.6
12	Diseño de expresiones faciales	6.9

### 3.2. Definición de subsistemas del ROBOT

Una vez analizados los resultados de la matriz QFD mostrada en Tabla 7, se establece el orden de importancia de las características técnicas, estableciendo los subsistemas con las respectivas

funciones e hitos relacionados que se irán desarrollando posteriormente. En la Tabla 8 se detallan los subsistemas que van a ser implementados.

**Tabla 8**

*Subsistemas del proyecto*

No	Subsistema	Funciones	Hitos
1	Cuello	Bastidor Soporte para los actuadores y el sistema de proyección Generar el movimiento de la cabeza	3,4,5,6
2	Proyección Gestual	Mostrar el rostro y las expresiones	1,2,8,12
3	Interacción	Reconocimiento y seguimiento de Rostro Reconocimiento de Voz ChatBot Diseño de HMI	1,6,7,8,9,10,11,12
4	Comunicación	Comunicación entre los subsistemas	6,8

### 3.3. Subsistema Cuello

El subsistema cuello hace referencia al mecanismo del cuello que permite el movimiento de la cabeza y también incluye la selección de los actuadores adecuados para el mismo.

#### 3.3.1. Mecanismo

##### 3.3.1.1. Selección Mecanismo

###### A. Mecanismo cuello resorte

En la Figura 18 se observa el mecanismo de cuello resorte, se compone de un resorte que es accionado mediante tres cables que se encuentran separados un ángulo de  $120^\circ$  entre ellos, y un motor en la parte superior que permite el giro de la cabeza. En la Tabla 9 muestra las ventajas y desventajas del mecanismo cuello-resorte.

**Tabla 9**

*Tabla de ventajas y desventajas del mecanismo cuello resorte*

Ventajas	Desventajas
Similar flexibilidad del cuello humano Produce un movimiento esférico	Centro de rotación depende de las características del resorte y actuadores



**Figura 18.** Prototipo de mecanismo Cuello Resorte

Fuente: (Yang et al., 2015)

#### B. Mecanismo cuello paralelo

La arquitectura del mecanismo de cuello paralelo se muestra en la Figura 19, es un mecanismo que posee una plataforma y una base unidas mediante un par esférico pasivo y se orienta mediante tres patas del tipo RSSU (U Junta Universal, R Junta Rotacional y S Junta Esférica). En la Tabla 10 muestra las ventajas y desventajas del mecanismo en paralelo

**Tabla 10**

*Tabla de ventajas y desventajas del mecanismo cuello paralelo*

Ventajas	Desventajas
Alta precisión Alta capacidad de carga Alta rigidez Inercia de la parte móvil es relativamente pequeña	Materiales de la junta esférica y rotacional deben tener alta resistencia a cortante Cadena Cinemática cerrada



**Figura 19:** Prototipo de mecanismo cuello paralelo  
Fuente: (Yang et al., 2015)

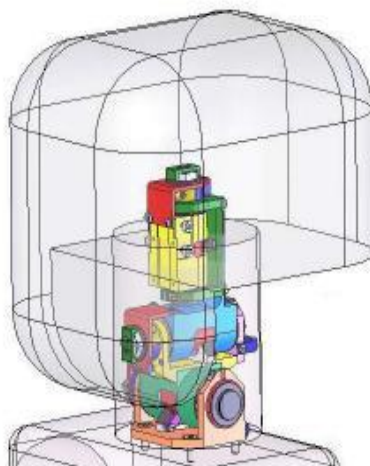
### C. Mecanismo cuello serie

Una solución para el movimiento del cuello es un mecanismo con tres grados de libertad en serie como se observa en la Figura 20, está formado por 3 motores de tipo DC adicional uso de engranes planetarios, o servomotores sin el uso de engranajes. En la Tabla 11 muestra las ventajas y desventajas del mecanismo en serie

**Tabla 11**

*Tabla de ventajas y desventajas del mecanismo cuello serie*

Ventajas	Desventajas
Robusto	La inercia del mecanismo como conjunto
Fácil Control	es relativamente alta
Cadena cinemática abierta se puede usar el método de Denavit Hartenberg	La capacidad de carga de los motores no es la misma en cada grado de libertad
Alto Rendimiento	



**Figura 20.** Prototipo de mecanismo cuello serie

Fuente: (Yang et al., 2015)

Para la selección del tipo de mecanismo de cuello se toman en cuenta los siguientes factores costo, resistencia y manufactura con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15, comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 12**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de mecanismo del cuello*

Criterio	Costo	Resistencia	Manufactura	Suma +1	Ponderación
<b>Costo</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Resistencia</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Manufactura</b>	0,5	0	-	1,5	0,25
			Total	6	

**Tabla 13**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	Suma +1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Solución B</b>	1	-	0,5	2,5	0,42
<b>Solución C</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			Total	6	

**Tabla 14***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Resistencia*

Resistencia	Solución A	Solución B	Solución C	Suma +1	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	0,75	2,75	0,46
Solución C	1	0,25	-	2,25	0,38
Total				6	

**Tabla 15***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Manufactura*

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	Suma +1	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,17
Solución B	1	-	0,75	2,75	0,46
Solución C	1	0,25	-	2,25	0,38
Total				6	

**Tabla 16***Tabla de Holmes para la selección del tipo de mecanismo del cuello*

	Costo	Resistencia	Manufactura	Suma	Prioridad
Solución A	0,069	0,056	0,042	0,167	3
Solución B	0,174	0,153	0,115	0,441	1
Solución C	0,174	0,125	0,094	0,392	2
Total				1,000	

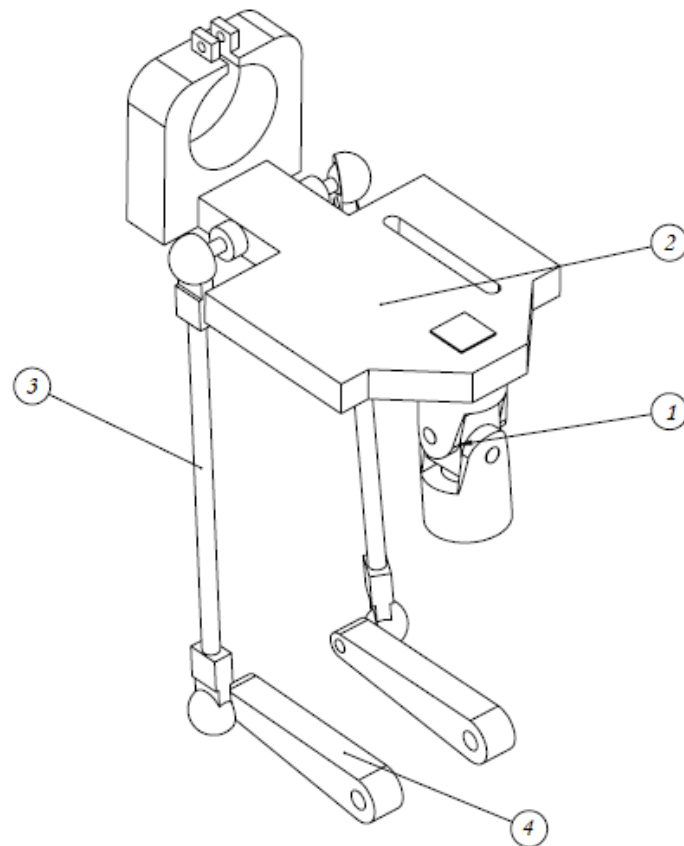
Después de realizar la matriz de Holmes para seleccionar el tipo de mecanismo para el movimiento del cuello como se muestra en la Tabla 16 se concluye que la opción B: mecanismo cuello paralelo es la mejor por su costo, resistencia y manufactura lo cual es óptimo para cumplir con lo planteado.

### 3.3.1.2. Cinemática Inversa del Mecanismo

La cinemática inversa del mecanismo del cuello se lo realizó mediante el método gráfico, que permite calcular la posición de los actuadores una vez se haya dado una inclinación de la plataforma superior. A continuación, en la Figura 21 se muestra las partes más importantes del mecanismo la

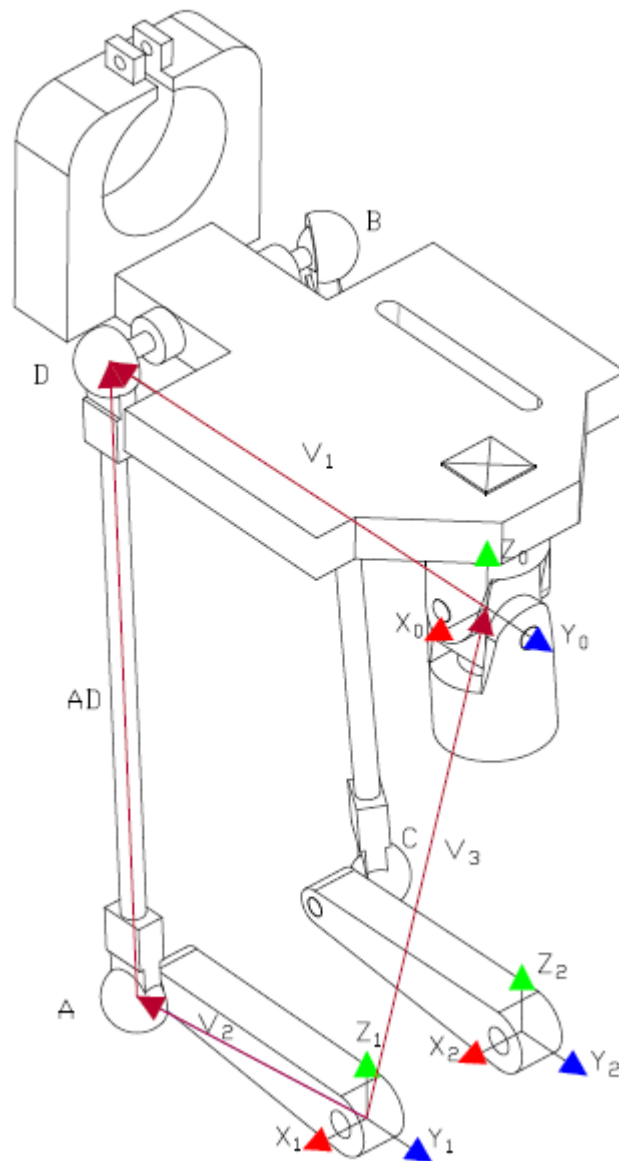


parte 1 es la es la junta universal que posee dos grados de libertad, las parte 2 es la plataforma superior, la parte 3 es la barra que permite la conexión entre las rótulas de la plataforma superior y la manivela, y la parte 4 es la manivela que trasmite la rotación del motor a la barra.



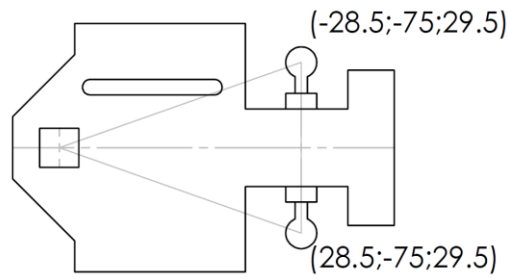
**Figura 21.** Diagrama principal del mecanismo paralelo del cuello

El método gráfico utiliza vectores y matrices de rotación para encontrar la posición de un punto una vez se haya realizado un giro en la plataforma superior, a continuación, en la Figura 22 se puede observar los sistemas de coordenadas y los vectores que van a ser utilizados para el cálculo del mecanismo.



**Figura 22.** Vectores, Puntos y Sistemas de coordenadas para el método gráfico

El primer paso es encontrar el  $\vec{V}_1$ , En la Figura 23 se muestra las coordenadas de los puntos B y D con respecto al sistemas de coordenadas del sistema del centro de la junta universal, obteniendo los puntos que se muestran a continuación.



**Figura 23.** Coordenadas de los puntos de la junta esférica de la parte inferior

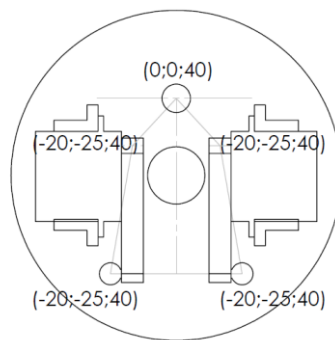
Una vez obtenido las coordenadas de los puntos D y B mostrados con anterioridad se procede a calcular la posición una vez la plataforma haya girado una cierta cantidad de grados en sus dos grados de libertad es decir haya realizado un giro en torno al eje x y al eje y.

$$V1 = R_x R_y P_D \quad (1)$$

$$V1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_3) & -\sin(\alpha_3) \\ 0 & \sin(\alpha_3) & \cos(\alpha_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_4) & 0 & \sin(\alpha_4) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_4) & 0 & \cos(\alpha_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 28.5 \\ -78 \\ 33 \end{bmatrix} \quad (2)$$

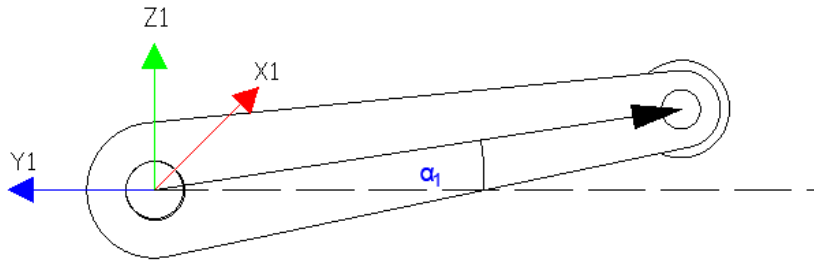
$$V1 = \begin{bmatrix} 28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) \\ 28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) \\ 33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) - 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) \end{bmatrix} \quad (3)$$

El siguiente paso una vez obtenido las coordenadas del vector  $\vec{V}_1$ , es obtener  $\vec{V}_2$  para ello de la misma manera que el paso anterior se obtuvo las coordenadas de los puntos A y C como se muestra en la Figura 24.



**Figura 24.** Coordenadas de la plataforma interior del mecanismo

Una vez obtenido las coordenadas de los puntos C y D se puede obtener el vector  $\vec{V}_2$ , conociendo que la rotación se lo realiza a través del eje X como se muestra en Figura 25.



**Figura 25.** Sistemas de referencia y ángulo de giro para el vector V2

$$V2 = R_x P_B \quad (4)$$

$$V2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_1) & -\sin(\alpha_1) \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 15.75 \\ -54.7 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$V2 = \begin{bmatrix} -15.75 \\ -54.7 \cos(\alpha_1) \\ -54.7 \sin(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

El vector  $\vec{V}_3$  es el vector entre el eje de rotación del ingreso del motor, y del centro de la junta universal.

$$V3 = P_1 - P_0 \quad (7)$$

$$V3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 160.40 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 20 \\ -25 \\ 40 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20 \\ 25 \\ 120.40 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$V3 + V1 = V2 + AD \quad (9)$$

$$AD = V3 + V1 - V2 \quad (10)$$

$AD =$

$$\begin{cases} 28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) - 35.75 \\ 28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) + 54.7 \cos(\alpha_1) + 25.0 \\ 33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) - 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) + 54.7 \sin(\alpha_1) + 120. \end{cases} \quad (11)$$

$AD$

$$= \begin{cases} 28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) - 35.75 \\ 28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) + 54.7 \cos(\alpha_1) + 25.0 \\ 33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) - 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) + 54.7 \sin(\alpha_1) + 12 \end{cases} \quad (12)$$

Conociendo la distancia  $\overline{AD} = 153.59 \text{ mm}$ , y utilizando la forma de la distancia entre dos puntos se encuentra dos ecuaciones en función de los ángulos  $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_4$

$$\begin{aligned} & (28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) - 35.75)^2 \\ & + (28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) \\ & - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) + 54.7 \cos(\alpha_1) + 25.0)^2 \\ & + (33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) \\ & - 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) + 54.7 \sin(\alpha_1) + 120.4)^2 \\ & - 153.59^2 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$a \cos \alpha_1 + b \sin \alpha_1 = c \quad (14)$$

Donde:

$$a = 28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) + 25.0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} b = & 33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) - 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) \\ & + 120.4 \end{aligned} \quad (16)$$

$$c = 28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) - 35.75 \quad (17)$$

$$d = \frac{153.59^2 - 54.7^2 - c - a^2 - b^2}{109.4\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (18)$$

Por lo tanto:

$$\alpha_1 = \arcsin d - \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \quad (19)$$

En el caso del segundo ángulo

$$\begin{aligned} & (-28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) + 35.75)^2 \\ & + (-28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) \\ & - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) + 54.7 \cos(\alpha_1) + 25.0)^2 \\ & + (33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) \\ & + 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) + 54.7 \sin(\alpha_1) + 120.4)^2 \\ & - 153.59^2 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_1 = & -28.5 \sin(\alpha_3) \sin(\alpha_4) - 78.0 \cos(\alpha_3) - 33.0 \cos(\alpha_4) \sin(\alpha_3) \\ & + 25.0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} b_1 = & 33.0 \cos(\alpha_3) \cos(\alpha_4) - 78.0 \sin(\alpha_3) + 28.5 \cos(\alpha_3) \sin(\alpha_4) \\ & + 120.4 \end{aligned} \quad (22)$$

$$c_1 = -28.5 \cos(\alpha_4) + 33.0 \sin(\alpha_4) + 35.75 \quad (23)$$

$$d_1 = \frac{153.59^2 - 54.7^2 - c_1 - a_1^2 - b_1^2}{109.4\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (24)$$

Por lo tanto:

$$\alpha_2 = \arcsin d_1 - \arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right) \quad (25)$$

### 3.3.2. Material Carcaza

El término carcaza hace referencia a la mayoría de partes de la cabeza, entre las más importantes tenemos el torso, la base, la parte externa de la cabeza, y el soporte para los motores. Otro punto que se debe tomar en cuenta es que el proceso de manufactura aditiva es Impresión 3D.

#### 3.3.2.1. Selección del Material

- A. PLA: es el plástico más utilizado en impresión 3D debido a las características y la versatilidad que tiene, se denomina así por su nombre en inglés Poly-Lactic Acid (Ácido Poli-Láctico), es un material biodegradable basado en su totalidad en recursos renovables que son ricos en almidón como son maíz, remolacha, trigo entre otras.
- B. ABS: es un plástico utilizado para impresión 3D su principal característica es la resistencia a impactos y su bajo peso, se denomina así por sus siglas en inglés Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), conocido también como plástico de ingeniería debido a la complejidad de su elaboración y procesamiento.

Para la matriz selección del tipo de material de la carcasa se toman en cuenta los siguientes factores costo, resistencia y disponibilidad con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20, comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 17**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de material de la carcasa*

Criterio	Costo	Resistencia	Disponibilidad	Suma+1	Ponderación
Costo	-	0,5	0,5	2	0,33
Resistencia	0,5	-	0,5	2	0,33
Disponibilidad	0,5	0,5	-	2	0,33
			Total	6	

**Tabla 18**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Costo*

Costo	Solución A	Solución B	Suma +1	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Total	3	

**Tabla 19**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Resistencia*

Resistencia	Solución A	Solución B	Suma +1	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Total	3	

**Tabla 20**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Disponibilidad*

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Suma +1	Ponderación
Solución A	-	0,5	1,5	0,50
Solución B	0,5	-	1,5	0,50
		Total	3	

**Tabla 21**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de material de la carcasa*

	Costo	Resistencia	Disponibilidad	Suma	Prioridad
Solución A	0,167	0,167	0,167	0,500	1
Solución B	0,167	0,167	0,167	0,500	1
			Total	1,000	



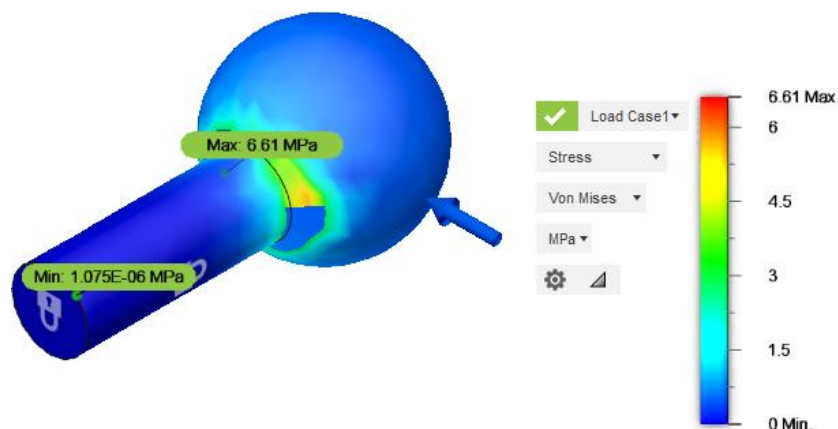
Después de realizar la matriz de Holmes para seleccionar el material de la carcasa como se muestra en la Tabla 21 se concluye que las dos opciones PLA y ABS son adecuadas para la impresión de la carcasa debido a su costo, resistencia y disponibilidad lo cual es óptimo para cumplir con lo planteado.

### 3.3.3. Análisis de esfuerzos de partes críticas

Aplicado un análisis estático de esfuerzos realizado en el software CAD Fusión 360. Mediante la selección de las partes más críticas del diseño y tomando en cuenta el tipo de material del elemento se obtuvieron los siguientes datos:

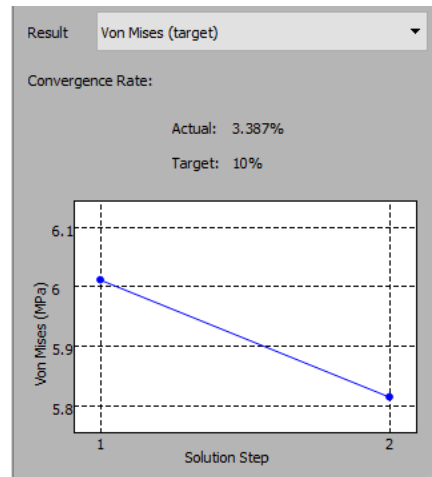
**Rótula Macho:** Se procede hacer el análisis partiendo del material que es el aluminio, y la suma del peso total de la estructura para calcular la fuerza a la que se somete la rótula que va hacer de 19,6 N.

En la Figura 26 se muestra el esfuerzo máximo que soporta la rótula con un valor de 6,61 MPa, y el factor de seguridad de 15. Obteniendo como punto más crítico el inicio de la parte esférica garantizando que la misma pueda trabajar de la manera adecuada una vez se encuentre en funcionamiento la cabeza.



*Figura 26.* Análisis esfuerzo Von Mises-Rótula

En la Figura 27 se observa el resultado de la convergencia de la rótula. Un estudio de convergencia permite encontrar el valor de malla exacto para obtener el mejor resultado del estudio, para el caso de la rótula se observa que necesito de dos iteraciones para encontrar el valor adecuado que es de 5.82 MPa.



**Figura 27.** Tasa de convergencia Von Mises-Rótula

A continuación Figura 28 se presenta la tabla de resultados del análisis de esfuerzos obtenidos en el software de simulación con un resumen de los datos más importantes.

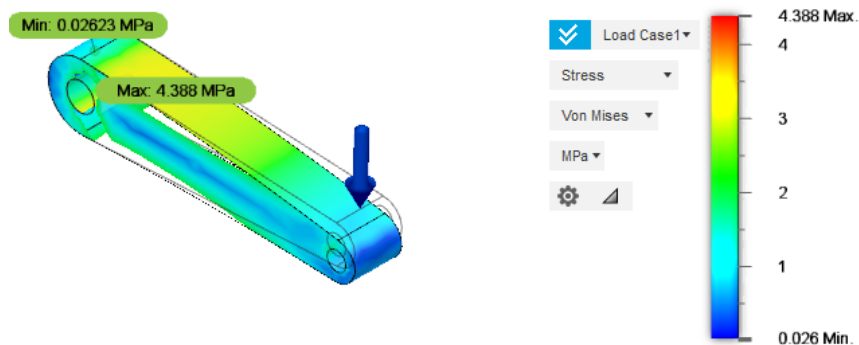
Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	4.172	15
Stress		
Von Mises	1.075E-06 MPa	6.61 MPa
1st Principal	-4.302 MPa	9.601 MPa
3rd Principal	-9.543 MPa	4.195 MPa
Normal XX	-4.896 MPa	4.715 MPa
Normal YY	-9.387 MPa	9.296 MPa
Normal ZZ	-4.494 MPa	4.222 MPa
Shear XY	-2.526 MPa	2.422 MPa
Shear YZ	-1.7 MPa	1.828 MPa
Shear ZX	-0.8704 MPa	0.8543 MPa
Displacement		
Total	0 mm	9.185E-04 mm
X	-9.185E-04 mm	2.524E-06 mm
Y	-4.402E-04 mm	4.357E-04 mm
Z	-7.665E-06 mm	8.224E-06 mm

**Figura 28.** Reporte de resultados-Rótula

**Manivela-Motor:** Se procede hacer el análisis partiendo del material que es el aluminio, y la suma del peso total de la estructura para calcular la fuerza a la que se somete la rótula que va hacer de 19,6 N.

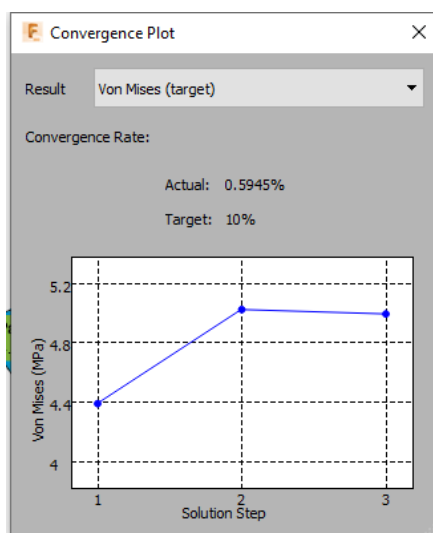
En la Figura 29 se muestra el esfuerzo máximo que soporta la manivela con un valor de 4,388 MPa. La manivela es la parte encargada de la transmisión del movimiento desde el motor hacia la rótula, permitiendo el giro de la plataforma superior con respecto a algunos de los ejes x e y.

Se puede observar claramente que la pieza no trabaja en su valor máximo de esfuerzo es decir no existe la posibilidad de falla cuando el robot se encuentre trabajando con normalidad.



**Figura 29.** Análisis esfuerzo Von Mises-Manivela

En la Figura 30 se observa el resultado de la convergencia de la manivela. Un estudio de convergencia permite encontrar el valor de malla exacto para obtener el mejor resultado del estudio, para el caso de la rótula se observa que necesito de dos iteraciones para encontrar el valor adecuado que es de 4.91 MPa.



**Figura 30.** Tasa de convergencia Von Mises-Manivela

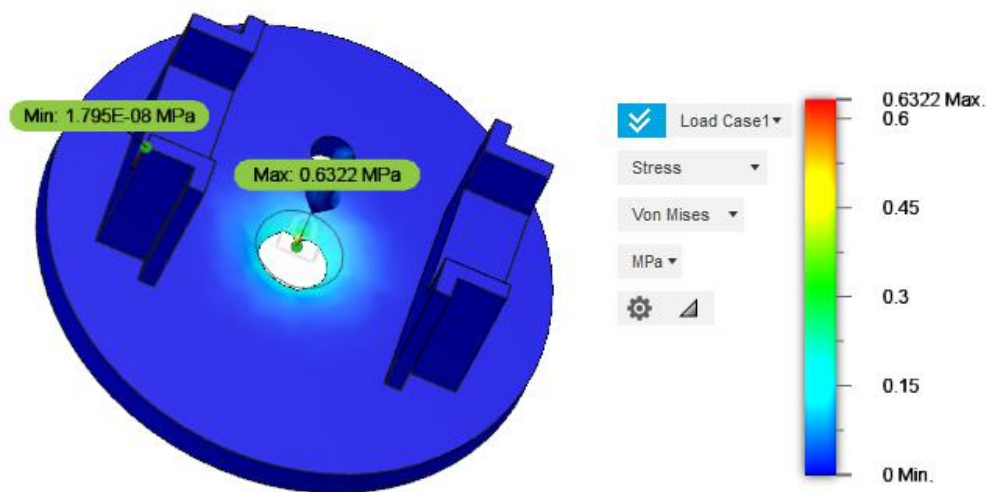
A continuación en la Figura 31 se presenta la tabla de resultados del análisis de esfuerzos obtenidos en el software de simulación con un resumen de los datos más importantes.

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	5.523	15
Stress		
Von Mises	0.02085 MPa	4.992 MPa
1st Principal	-0.4674 MPa	5.112 MPa
3rd Principal	-4.553 MPa	0.4447 MPa
Normal XX	-4.176 MPa	4.709 MPa
Normal YY	-1.13 MPa	1.503 MPa
Normal ZZ	-1.985 MPa	2.053 MPa
Shear XY	-0.4414 MPa	0.4699 MPa
Shear YZ	-0.64 MPa	0.5916 MPa
Shear ZX	-1.98 MPa	2.644 MPa
Displacement		
Total	0 mm	0.01336 mm
X	-0.001497 mm	0.001492 mm
Y	-7.766E-05 mm	7.78E-05 mm
Z	-0.01336 mm	1.106E-04 mm

**Figura 31.** Reporte de resultados-Manivela

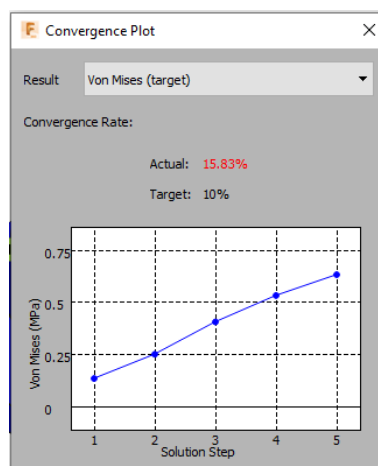
**Base-Plataforma Inferior:** Se procede hacer el análisis partiendo del material que es ABS, y la suma del peso total de la estructura para calcular la fuerza a la que se somete la base de la plataforma inferior que va hacer de 19,6 N.

En la Figura 32 se muestra el esfuerzo máximo que soporta la rótula con un valor de 0,6322 MPa. La base plataforma inferior es la encargada de soportar el peso de los motores para el movimiento de los ejes x e y, y todos los elementos como son el mecanismo, el casco, la cámara, el lente y el proyector. Por ello es considerado uno de las partes más críticas de la estructura, el estudio permite observar que dicho componente no fallara en funcionamiento constante de la cabeza.



**Figura 32.** Análisis de esfuerzos Von Mises Base-Robot

En la Figura 33 se observa el resultado de la convergencia de la base-plataforma inferior. Un estudio de convergencia permite encontrar el valor de malla exacto para obtener el mejor resultado del estudio, para el caso de la rótula se observa que necesito de dos iteraciones para encontrar el valor adecuado que es de 0.65 MPa.



**Figura 33.** Tasa de convergencia Base-robot

A continuación en la Figura 34 se presenta la tabla de resultados del análisis de esfuerzos de la base del robot obtenidos en el software de simulación con un resumen de los datos más importantes.

Name	Minimum	Maximum
Safety Factor		
Safety Factor (Per Body)	15	15
Stress		
Von Mises	1.795E-08 MPa	0.6322 MPa
1st Principal	-0.04345 MPa	0.2246 MPa
3rd Principal	-0.715 MPa	0.0891 MPa
Normal XX	-0.3324 MPa	0.1029 MPa
Normal YY	-0.7121 MPa	0.1916 MPa
Normal ZZ	-0.09021 MPa	0.2228 MPa
Shear XY	-0.05855 MPa	0.1203 MPa
Shear YZ	-0.1226 MPa	0.02996 MPa
Shear ZX	-0.1203 MPa	0.05818 MPa
Displacement		
Total	0 mm	7.072E-04 mm
X	-1.963E-04 mm	1.883E-04 mm
Y	-6.137E-04 mm	1.833E-05 mm
Z	-2.265E-04 mm	3.599E-04 mm

**Figura 34.** Reporte de resultados Base-Robot

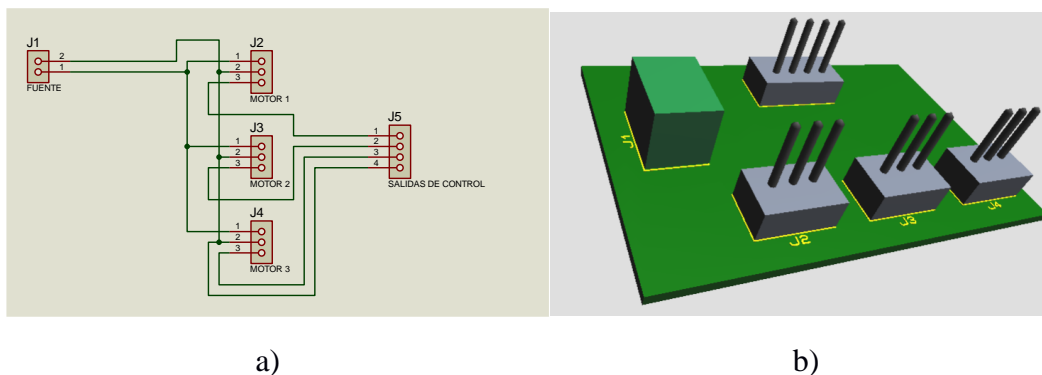
### 3.3.4. Diseño electrónico

Para el diseño de la parte electrónica se detalla los elementos que se usarán en la placa para la conexión con arduino con sus respectivos pines a utilizar:

Elementos:

- 1 bornera: Para la conexión a la fuente
- Entradas y salidas
- 9 espadines para la alimentación y señal de los motores
- 4 espadines para las salidas de control
- Alimentación 5V
- Tierra

A continuación en la Figura 35 se muestra el diseño de la placa en PBC realizado en Proteus.



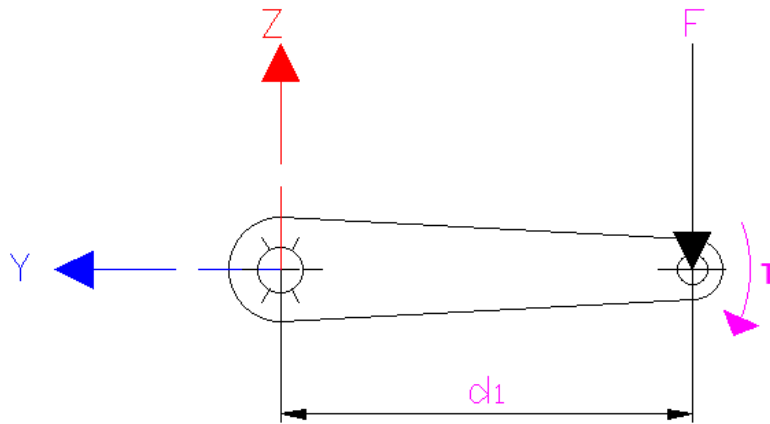
**Figura 35.** Diseño de la placa  
a) Vista Esquemática b) Diseño 3D

### 3.3.5. Motores

#### 3.3.5.1. Análisis esfuerzo motores

Para la selección de los motores, es necesario el uso de un análisis estático de esfuerzos para saber la capacidad de carga de los motores. En el caso de los actuadores que son usados en la junta

manivela motor se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre como se muestra en la Figura 36, y se calcula el torque necesario a continuación:



**Figura 36.** Diagrama del cuerpo libre de la junta manivela motor

$$\tau = F \cdot d_1 \quad (26)$$

$$\tau = 6.66N \cdot \frac{54.70}{1000} m \quad (27)$$

$$\tau = 0.365 N \cdot m \quad (28)$$

Con un factor de seguridad  $n = 2.5$

$$\tau = 0.911 N \cdot m \quad (29)$$

$$\tau = 9.296 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (30)$$

Los motores elegidos son los motores MG995

Para el actuador de la base se realizará el siguiente análisis estático, se tomará la parte superior del robot como un cilindro con las siguientes características a fin de calcular la inercia.

$$I = \frac{1}{2} M \cdot R^2 \quad (31)$$



La masa es 2 kg y el radio es de 75mm.

$$I = \frac{1}{2} \cdot (2kg) \cdot \left(\frac{75}{1000} m\right)^2 \quad (32)$$

$$I = 0.005625 \text{ kg} \cdot m^2 \quad (33)$$

Obtenida la inercia, se procede a calcular el torque necesario para el motor que permitirá el movimiento del robot, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

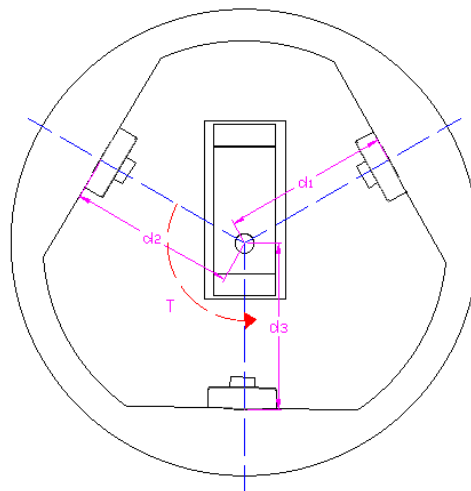
$$a_t = 5 \frac{m}{s^2} \quad (34)$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = 53 \text{ mm} \quad (35)$$

$$a_T = \alpha R \Rightarrow 5 \frac{m}{s^2} = \alpha \cdot \left(\frac{53}{1000} m\right) \quad (36)$$

$$\alpha = 94.33 \frac{rad}{s^2} \quad (37)$$

La distancia de 53 mm hace referencia a la ubicación desde el centro del motor al centro de los rodamientos que se utilizan de apoyo para permitir el giro de la cabeza, la Figura 37 muestra el diagrama de cuerpo libre.



**Figura 37:** Diagrama del cuerpo libre para el movimiento de la base del robot

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (38)$$

$$\tau = 0.005625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 94.33 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (39)$$

$$\tau = 0.53066 \text{ Nm} \quad (40)$$

Con un factor de seguridad  $n = 2.5$

$$\tau = 0.911 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (41)$$

$$\tau = 9.296 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (42)$$

El motor elegido será el MG996

### 3.3.5.2. Selección de motores

Los motores son los actuadores del mecanismo de cuello paralelo, que permite el movimiento de la posición del cuello en cualquiera de sus grados de libertad. Las opciones para los actuadores son motor dc, servomotor y motor a pasos. Los criterios de selección son la precisión costo y control.

Para la matriz de selección del tipo de motores del sistema se toman en cuenta los siguientes factores precisión costo y control con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 22**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de motores del sistema*

criterio	Precisión	Costo	Control	Suma +1	Ponderación
<b>Precisión</b>	-	0,5	0,5	2	0,33
<b>Costo</b>	0,5	-	0	1,5	0,25
<b>Control</b>	0,5	1	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	6	

**Tabla 23***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Precisión*

Precisión	Motor Dc	Servo Motor	Motor Pasos	Suma +1	Ponderación
Motor Dc	-	0	0	1	0,17
Servo Motor	1	-	0	2	0,33
Motor Pasos	1	1	-	3	0,50
Total				6	

**Tabla 24***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Costo*

Costo	Motor Dc	Servo Motor	Motor Pasos	Suma +1	Ponderación
Motor Dc	-	0,5	0	1,5	0,25
Servo Motor	0,5	-	1	2,5	0,42
Motor Pasos	1	0	-	2	0,33
Total				6	

**Tabla 25***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Control*

Control	Motor Dc	Servo Motor	Motor Pasos	Suma +1	Ponderación
Motor Dc	-	0	0,5	1,5	0,25
Servo Motor	1	-	1	3	0,50
Motor Pasos	0,5	0	-	1,5	0,25
Total				6	

**Tabla 26***Tabla de Holmes para la selección del tipo de motor*

	Precisión	Costo	Control	Suma	Prioridad
Motor Dc	0,056	0,063	0,104	0,222	3
Servo Motor	0,111	0,104	0,208	0,424	1
Motor Pasos	0,167	0,083	0,104	0,354	2
Total				1,000	

Después de realizar la matriz de Holmes para seleccionar el tipo de motor como se muestra en la Tabla 26 se concluye que la mejor opción es la Solución B: servomotor MG996R debido a su costo y fácil control por tanto es óptimo para cumplir con lo planteado.

### Concepto final

El resumen los elementos utilizados para el subsistema cuello se observa en la Tabla 27

**Tabla 27:**  
*Concepto final subsistema cuello*

Subsistema	Concepto final
Cuello	Mecanismo paralelo
	Material ABS y PLA
	Servomotor MG996r

## 3.4. Subsistema de proyección gestual

### 3.4.1. Máscara

Para el diseño de la geometría de la máscara se expresan únicamente las características que no varían como la forma de la nariz, los globos oculares y la forma del rostro, mientras la boca, cejas y ojos debido al movimiento que realizan no se muestran en el diseño, sino se incorporará posteriormente con la proyección de gestos.

#### 3.4.1.1. Selección del material

- A. Poliestireno blanco de alto impacto (HIPS): Polímero, compuesto por PS cristal, es duro, opaco, translúcido, blanco, versátil, económico y resistente a los impactos además se mecaniza y fabrica fácilmente
- B. Poliestireno transparente rígido y quebradizo (EPS): Polímero de baja conductividad térmica, usado como aislante en construcción y embalaje de productos frágiles. Se caracteriza por ser ligero, resistente a la humedad y absorbe impactos.

C. Poliestireno de uso general (GPPS): Polímero, transparente duro y frágil, es fácilmente moldeable al calentarse arriba de su temperatura vítrea. Su flexibilidad es limitada.

Para la matriz selección del tipo de material de la máscara se toman en cuenta los siguientes factores costo, transmisión de luz y manufactura con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 28, Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 28**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de material de la máscara*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Transmisión de luz</b>	<b>Manufactura</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Transmisión de luz</b>	1	-	0,5	2,5	0,42
<b>Manufactura</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 29**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo*

<b>Costo</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Solución C</b>	0	1	-	2	0,33
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 30**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Transmisión de Luz*

<b>Transmisión de luz</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Solución C</b>	0	1	-	2	0,33
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 31***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Manufactura*

Manufactura	Solución A	Solución B	Solución C	Suma + 1	Ponderación
Solución A	-	0,5	0,5	2	0,33
Solución B	0,5	-	0,5	2	0,33
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Total	6	

**Tabla 32***Tabla de Holmes para la selección del tipo de material de la máscara*

	Costo	Resistencia	Manufactura	Suma	Prioridad
Solución A	0,083	0,208	0,139	0,431	1
Solución B	0,028	0,069	0,139	0,236	3
Solución C	0,056	0,139	0,139	0,333	2
			Total	1,000	

Después de realizar la matriz de Holmes para seleccionar el material de la máscara como se muestra en la Tabla 32 se concluye que la mejor opción es la Solución A: el poliestireno blanco de alto impacto (HIPS) debido a su transmisión de luz, manufactura y costo el cual es óptimo para cumplir con lo planteado.

### 3.4.2. Proceso de conformado

Consiste en aplicar temperaturas elevadas y una presión determinada a un molde establecido.

#### 3.4.2.1. Selección de proceso

- A. Moldeo por inyección: Para el proceso se requiere una máquina de moldeo de inyección, un molde y el plástico. El plástico se funde en la máquina y después se inyecta en el molde donde se enfría y se solidifica.
- B. Moldeo por soplado. Es un proceso de formar un tubo termoplástico hueco calentado se infla en un molde cerrado que toma la forma de la cavidad del molde.

C. Moldeo por termo conformado: El proceso se realiza con una lámina de plástico que se calienta hasta ablandarse. Por medio de una presión externa, la lámina se estira adhiriéndola a un molde para que tome la forma de éste.

Para la matriz selección del tipo de proceso de conformado se toman en cuenta los siguientes factores costo, tiempo y proceso de calentamiento con sus respectivas ponderaciones como se muestra en las Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 33**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de proceso de conformado*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Tiempo</b>	<b>proceso de calentamiento</b>	<b>Ponderación</b>	
<b>Costo</b>	-	0,5	1	2,5	0,45
<b>Tiempo</b>	0	-	1	2	0,36
<b>Proceso de calentamiento</b>	0	0	-	1	0,18
			<b>Total</b>	<b>5,5</b>	

**Tabla 34**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo*

<b>Costo</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Solución B</b>	1	-	0,5	2,5	0,42
<b>Solución C</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 35**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio tiempo*

<b>Tiempo</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma +1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Solución B</b>	1	-	0,25	2,25	0,38
<b>Solución C</b>	1	0,75	-	2,75	0,46
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 36**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Proceso de calentamiento*

Proceso de calentamiento	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderación
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	

**Tabla 37**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de proceso de conformado*

	Costo	Tiempo	Proceso de calentamiento	Suma	Prioridad
Solución A	0,069	0,069	0,083	0,222	3
Solución B	0,174	0,156	0,042	0,372	2
Solución C	0,174	0,191	0,042	0,406	1
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de proceso de conformado de la Tabla 37 la solución más óptima es la C: moldeo por termo conformado debido al tiempo que toma en el calentamiento y deformación.

### 3.4.3. Lente

El lente es un elemento importante en la proyección del rostro, pues se requiere acortar la distancia al proyectar además de deformar la imagen para ello se encontraron dos tipos de lentes que cumplen la función.

#### 3.4.3.1. Selección tipo de lentes

- A. Panomorph: Utiliza el sensor de la cámara con el uso de una máquina elíptica, lo que hace que la imagen mostrada sea elíptica como se observa en la Figura 38 lo que permite mayor pixeles en los borde de la visión por tanto mayor calidad de imagen.





**Figura 38.** Fotografía con el lente Panomorph

Fuente: (Fritsch et al., 2017)

- B. Ojo de pez: Conocido como ultra gran angular, debido al ángulo de visión similar al ser humano con  $180^\circ$  es decir que el lente captura todo lo que ve el humano. Al distorsionarse se asemeja a una imagen reflejada en una esfera como se observa en la Figura 39.



**Figura 39.** Fotografía con el lente ojo de pez

Fuente: (Fritsch et al., 2017)

Para la matriz selección del tipo de lente de proyección se toman en cuenta los siguientes factores costo, ángulo de visión y resolución óptica con sus respectivas matrices de ponderaciones como se observa en las Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40 y Tabla 41 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 38**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de lentes*

Criterio	Costo	Ángulo de Visión	Resolución Óptica	Suma + 1	Ponderación
Costo	-	0,5	0,5	2	0,33
Ángulo de Visión	0,5	-	1	2,5	0,42
Resolución Óptica	0,5	0	-	1,5	0,25
			Total	6	

**Tabla 39***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo*

Costo	Solución A	Solución B	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0	1	0,33
<b>Solución B</b>	1	-	2	0,67
			3	

**Tabla 40***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio ángulo de visión*

Ángulo de Visión	Solución A	Solución B	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0,5	1,5	0,50
<b>Solución B</b>	0,5	-	1,5	0,50
			3	

**Tabla 41***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio Resolución óptica*

Resolución Óptica	Solución A	Solución B	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	1	2	0,67
<b>Solución B</b>	0	-	1	0,33
			3	

**Tabla 42***Tabla de Holmes para la selección del tipo lentes*

	Costo	Ángulo de Visión	Resolución Óptica	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,111	0,208	0,167	0,486	2
<b>Solución B</b>	0,222	0,208	0,083	0,514	1
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de lentes de la Tabla 42 la solución B: Lente ojo de pez es la más óptima cumpliendo con las métricas establecidas como es su costo y la resolución Óptica.

### **3.4.4. Proyector**

Para una visualización óptima la proyección debe distribuirse uniformemente y cubrir en lo posible toda el área del rostro. Por tanto, el rayo del proyector debe encontrarse en el centro de la máscara lo que puede dificultar la integración en la carcasa. Debido a que la mayoría de los proyectores tiene una relación de aspecto de 16:9 su posición debe ser vertical. A continuación, se presentan algunas opciones de proyectores:

#### **3.4.4.1. Selección Tipo de proyector**

- A. Proyector DLP (Digital Light Processing): Dispositivo de visualización que utiliza un dispositivo de micro espejo digital, una pantalla LCD que usa píxeles para reflejar el color y la luz en pantalla.
- B. Proyector LCD: Proyector basado en pantallas de cristal líquido, funciona con una tecnología transmisiva.
- C. Proyector LCoS: Es un proyector que une las tecnologías LCD y DLP, utiliza chips de cristal líquido con un respaldo reflejado, por tanto, son reflectantes como DLP y bloquean la luz como las LCD

Para la matriz selección del tipo de proyector se toman en cuenta los siguientes factores costo, portabilidad y contraste con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 43, Tabla 44, Tabla 45 y Tabla 46 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 43***Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de proyector*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Portabilidad</b>	<b>Contraste</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Portabilidad</b>	1	-	0,5	2,5	0,42
<b>contraste</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 44***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio costo*

<b>Costo</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0,17
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 45***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de portabilidad*

<b>Portabilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Solución C</b>	0,5	1	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 46***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de contraste*

<b>Contraste</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0,5	0,25	1,75	0,29
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,25	1,75	0,29
<b>Solución C</b>	0,75	0,75	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 47**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de proyector*

	Costo	Portabilidad	Contraste	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,083	0,174	0,122	0,378	1
<b>Solución B</b>	0,056	0,069	0,122	0,247	3
<b>Solución C</b>	0,028	0,174	0,174	0,375	2
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de proyector de la Tabla 47 la solución A: Mini Proyector HD DLP es la más óptima cumpliendo con las métricas establecidas como es su portabilidad y el costo moderado.

### **3.4.5. Diseño de animaciones**

#### **3.4.5.1. Selección Tipo de software**

- A. BLENDER: Software informático multiplataforma libre, dedicado especialmente al modelado, iluminación, renderizado, animación y creación de gráficos tridimensionales.
- B. UNITY: Es una aplicación para animaciones que desarrolla juegos multiplataforma de código cerrado.
- C. MAYA: Desarrollado por Autodesk, Software de animación, modelado, simulación y renderizado 3D por computador.

Para la matriz selección del tipo de software de animación se toman en cuenta los siguientes factores disponibilidad, facilidad de uso y compatibilidad con Linux con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 48, Tabla 49, Tabla 50 y Tabla 51 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 48**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de Software de animación*

<b>Criterio</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Compatibilidad Linux</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Disponibilidad</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Facilidad de uso</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Compatibilidad Ubuntu</b>	0,5	1	-	2,5	0,42
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 49**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de disponibilidad*

<b>Disponibilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	0,5	1,5	0,25
<b>Solución C</b>	0	0,5	-	1,5	0,25
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 50**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de facilidad de uso*

<b>Facilidad de uso</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0,17
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 51**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de compatibilidad de Ubuntu*

<b>Compatibilidad Ubuntu</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0,5	1	2,5	0,42
<b>Solución B</b>	0,5	-	1	2,5	0,42
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0,17
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 52**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de Software de animación*

	Disponibilidad	Facilidad de uso	Compatibilidad Ubuntu	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,208	0,083	0,174	0,465	1
<b>Solución B</b>	0,104	0,056	0,174	0,333	2
<b>Solución C</b>	0,104	0,028	0,069	0,201	3
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de Software de animación de la Tabla 52 la solución A: Software Blender pues es un software libre que es compatible con Ubuntu y su facilidad en el diseño, modelado de animaciones en 3D.

### Concepto final

El resumen los elementos utilizados para el subsistema proyección gestual se observa en la Tabla 53

**Tabla 53**

*Concepto final subsistema proyección gestual*

Subsistema	Concepto final
<b>Proyección gestual</b>	Poliestireno blanco opal de alto impacto (HIPS)
	Proceso de termoconformado
	Lente ojo de pez
	Mini proyector
	Diseño animación en blender

### 3.5. Subsistema de Interacción

De acuerdo a los requerimientos en el trabajo de titulación se encuentra subsistema de Interacción que con la integración y trabajo conjunto de sensores y actuadores y los módulos de Interacción que se presentan en la Tabla 54 serán implementados en el software.

**Tabla 54***Sensores, actuadores y módulos de interacción*

<b>Sensores</b>	<b>Actuadores</b>	<b>Módulos de Interacción</b>
<b>Cámara</b>	Proyector	TTS
<b>Micrófono</b>	Parlante	STT
		Reconocimiento de palabras claves
		Visión Artificial
		Chatbot

El robot se realizará en el sistema operativo Ubuntu 18.04.2 que es un software libre y la programación en el entorno de Python por la compatibilidad que tiene con Ubuntu y otros programas que usarán en el trabajo. Al definir los puntos importantes de los cuales consta el subsistema de Interacción, se seleccionarán a continuación el software, programas y algoritmos óptimos para el desarrollo de la interacción Humano-Robot creando las matrices de selección de criterios, de ponderación y de Holmes que se detallan en las siguientes tablas.

### **3.5.1. Text to Speech TTS**

#### **3.5.1.1. Selección Tipo de módulo TTS**

- A. GTTS (Módulo de google)
- B. Festival
- C. eSpeak

Para la matriz selección del tipo de módulo TTS se toman en cuenta los siguientes factores claridad de voz, fluidez y disponibilidad con sus respectivas ponderaciones como se muestran en las Tabla 55, Tabla 56, Tabla 57 y Tabla 58 comparados a través de la matriz de Holmes.



**Tabla 55***Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Módulo TTS*

<b>Criterio</b>	<b>Claridad de Voz</b>	<b>Fluidez</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Claridad de voz</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Fluidez</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Disponibilidad</b>	0,5	0	-	1,5	0,25
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 56***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de claridad d de voz*

<b>Claridad de voz</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0,17
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 57***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Fluidez*

<b>Fluidez</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0,75	0,5	2,25	0,38
<b>Solución B</b>	0,25	-	0,25	1,5	0,25
<b>Solución C</b>	0,5	0,75	-	2,25	0,38
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 58***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de disponibilidad*

<b>Disponibilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0,5	0,5	2	0,33
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,5	2	0,33
<b>Solución C</b>	0,5	0,5	-	2	0,33
<b>Total</b>				<b>6</b>	

**Tabla 59**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de Módulo TTS*

	Claridad de voz	Fluidez	Disponibilidad	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,208	0,125	0,083	0,417	1
<b>Solución B</b>	0,139	0,083	0,083	0,306	2
<b>Solución C</b>	0,069	0,125	0,083	0,278	3
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de Módulo TTS de la Tabla 59 la solución A: GTTS es la más óptima cumpliendo con las métricas establecidas como es su velocidad de respuesta debido a su conexión a la red, la compatibilidad y disponibilidad ya que son módulos de google.

### **3.5.2. Speech to Text STT**

#### **3.5.2.1. Selección Tipo de módulo STT**

- A. GSTT (Módulo de Google):
- B. Julius:
- C. DeepSpeech

Para la matriz selección del tipo de módulo STT se toman en cuenta los siguientes factores velocidad de respuesta, compatibilidad y disponibilidad con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 60, Tabla 61, Tabla 62 y Tabla 63 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 60***Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Módulo STT*

<b>Criterio</b>	<b>Velocidad de respuesta</b>	<b>Compatibilidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Velocidad de respuesta</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Compatibilidad</b>	1	-	0,5	2,5	0,42
<b>Disponibilidad</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 61***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Velocidad de respuesta*

<b>Velocidad de respuesta</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Solución C</b>	0,5	1	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 62***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de compatibilidad*

<b>Compatibilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	0,5	1,5	0,25
<b>Solución C</b>	0	0,5	-	1,5	0,25
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 63***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de disponibilidad*

<b>Disponibilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0,5	0,5	2	0,33
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,5	2	0,33
<b>Solución C</b>	0,5	0,5	-	2	0,33
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 64**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de Módulo STT*

	Velocidad de respuesta	Compatibilidad	Disponibilidad	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,069	0,208	0,139	0,417	1
<b>Solución B</b>	0,028	0,104	0,139	0,271	3
<b>Solución C</b>	0,069	0,104	0,139	0,313	2
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de Módulo STT de la Tabla 64 la solución A: GSTT es la más óptima cumpliendo con las métricas establecidas como es su velocidad de respuesta debido a su conexión a la red, la compatibilidad y disponibilidad ya que son módulos de google.

### 3.5.3. Reconocimiento palabras claves

#### 3.5.3.1. Selección Tipos de reconocimiento de palabras claves

- A. Snowbody
- B. Pocketsphinx
- C. Porcupine

Para la matriz selección del tipo de reconocimiento de palabra clave se toman en cuenta los siguientes factores precisión, idiomas y compatibilidad con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 65, Tabla 66, Tabla 67 y Tabla 68 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 65**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo de reconocimiento de palabras claves*

Criterio	Precisión	Idiomas	Compatibilidad	Suma + 1	Ponderación
<b>Precisión</b>	-	1	0	2	0,33
<b>Idiomas</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Compatibilidad</b>	1	1	-	3	0,50
			Total	6	

**Tabla 66***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Precisión*

Precisión	Solución A	Solución B	Solución C	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Solución C</b>	0,5	1	-	2,5	0,42
Total				6	

**Tabla 67***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Precisión*

Idiomas	Solución A	Solución B	Solución C	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0,5	1	2,5	0,42
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,75	2,25	0,38
<b>Solución C</b>	0	0,25	-	1,25	0,21
Total				6	

**Tabla 68***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Compatibilidad*

Compatibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0,5	0,5	2	0,33
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,5	2	0,33
<b>Solución C</b>	0,5	0,5	-	2	0,33
Total				6	

**Tabla 69***Tabla de Holmes para la selección del tipo de reconocimiento de palabras claves*

	Precisión	Idiomas	Compatibilidad	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,139	0,069	0,167	0,375	1
<b>Solución B</b>	0,056	0,063	0,167	0,285	3
<b>Solución C</b>	0,139	0,035	0,167	0,340	2
Total				1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de reconocimiento de palabras clave de la Tabla 69 la solución A: Snowbody es la mejor opción cumpliendo con los parámetros establecidas como son el idioma por la diversidad que tiene y la precisión.

### 3.5.4. Módulo de Visión Artificial

#### 3.5.4.1. Selección tipo de Módulos de Visión Artificial

- A. Segmentación
- B. Viola Jones
- C. Transformada de Hough

Para la matriz selección del tipo de módulo de visión artificial se toman en cuenta los siguientes factores flexibilidad, robustez y fiabilidad con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 70, Tabla 71, Tabla 72 y Tabla 73 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 70**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Módulo de Visión Artificial*

Criterio	Flexibilidad	Robustez	Fiabilidad	Suma + 1	Ponderación
<b>Flexibilidad</b>	-	1	0,5	2,5	0,42
<b>Robustez</b>	0	-	0,5	1,5	0,25
<b>Fiabilidad</b>	0,5	0,5	-	2	0,33
			Total	6	

**Tabla 71**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Flexibilidad*

Flexibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Solución B</b>	1	-	1	3	0,50
<b>Solución C</b>	1	0	-	2	0,33
			Total	6	

**Tabla 72**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Robustez*

Robustez	Solución A	Solución B	Solución C	Suma + 1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0	0,5	1,5	0,25
<b>Solución B</b>	1	-	0,75	2,75	0,46
<b>Solución C</b>	0,5	0,25	-	1,75	0,29
			Total	6	

**Tabla 73**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Fiabilidad*

<b>Fiabilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,17
<b>Solución B</b>	1	-	0,5	2,5	0,42
<b>Solución C</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	6	

**Tabla 74**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de Modulo de visión Artificial*

	<b>Flexibilidad</b>	<b>Robustez</b>	<b>Fiabilidad</b>	<b>Suma</b>	<b>Prioridad</b>
<b>Solución A</b>	0,069	0,063	0,056	0,188	3
<b>Solución B</b>	0,208	0,115	0,139	0,462	1
<b>Solución C</b>	0,139	0,073	0,139	0,351	2
			<b>Total</b>	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de Módulo de Visión Artificial de la Tabla 74 la solución B: Módulo de Viola Jones es la mejor opción cumpliendo con los parámetros establecidas como son su flexibilidad y viabilidad.

### **3.5.5. Chatbot**

#### **3.5.5.1. Selección tipo de Chatbot**

- A. Dialagflow
- B. TensorFlow
- C. Word-spotting

Para la matriz selección del tipo de chatbot se toman en cuenta los siguientes factores flexibilidad, robustez y compatibilidad con sus respectivas ponderaciones como se observa en la Tabla 75, Tabla 76, Tabla 77 y Tabla 78 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 75***Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Chatbot*

<b>Criterio</b>	<b>Flexibilidad</b>	<b>Robustez</b>	<b>Compatibilidad</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Flexibilidad</b>	-	1	0	2	0,33
<b>Robustez</b>	0	-	0	1	0,17
<b>Compatibilidad</b>	1	1	-	3	0,50
			<b>Total</b>	6	

**Tabla 76***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Flexibilidad*

<b>Flexibilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0,17
			<b>Total</b>	6	

**Tabla 77***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Robustez*

<b>Robustez</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0,5	1	2,5	0,42
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,75	2,25	0,38
<b>Solución C</b>	0	0,25	-	1,25	0,21
			<b>Total</b>	6	

**Tabla 78***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Compatibilidad*

<b>Compatibilidad</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b>Suma + 1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	1	1	3	0,50
<b>Solución B</b>	0	-	1	2	0,33
<b>Solución C</b>	0	0	-	1	0,17
			<b>Total</b>	6	



**Tabla 79**

*Tabla de Holmes para la selección del tipo de Chatbot*

	<b>Flexibilidad</b>	<b>Robustez</b>	<b>Compatibilidad</b>	<b>Suma</b>	<b>Prioridad</b>
<b>Solución A</b>	0,167	0,069	0,250	0,486	1
<b>Solución B</b>	0,111	0,063	0,167	0,340	2
<b>Solución C</b>	0,056	0,035	0,083	0,174	3
			<b>Total</b>	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de Módulo de Chatbot de la Tabla 79

la solución A: Dialogflow es la mejor opción debido a su flexibilidad, robustez y compatibilidad comparado con la solución B: Tensor Flow y C: Word-spotting.

### **Concepto final**

El resumen los elementos utilizados para el subsistema interacción se observa en la Tabla 80

**Tabla 80**

*Concepto final subsistema interacción*

<b>Subsistema</b>	<b>Concepto final</b>
<b>Proyección gestual</b>	TTS google
	STT google
	Visión artificial Viola Jones
	DialogFlow
	Reconocimiento palabra clave Snowbody

## **3.6. Subsistema de comunicación**

### **3.6.1. Tarjeta de Control**

#### **A. Arduino Mega**

Es una tarjeta de desarrollo que posee 54 pines de entrada y salida, 14 de ellos tienen la capacidad de ser salidas PWM, además posee 16 entradas analógicas y 4 puertos serie (UART). Tiene un Cristal de 16 MHz y una memoria flash de 256K. La alimentación de entrada tiene un rango de 5 a 12 VDC y una alimentación de trabajo en los pines de 5VDC. Se comunica a la computadora a través de puerto serie.

### B. Raspberry Pi 3 Model B+

Es una placa controladora que posee 40 pines GPIO (Pines de propósito General), posee un procesador 1.4GHz quad-core ARM Cortex A53 de 64-bit, con 1 GB de memoria RAM y viene incluidos varios puertos como: HDMI de tamaño completo, 4 puertos USB 2.0, Slot para Micro SD, además de conexión inalámbrica a través de Bluetooth 4.2 y un puerto Ethernet de 300 Mbps.

### C. Jetson Nano

Es una computadora de una sola tarjeta que posee una gran capacidad de procesamiento de un tamaño pequeño 69.6 x 45 milímetros, posee un procesador CPU ARM Cortex-A57 MPCore de 4 núcleos, 4 Gb de RAM, 16 GB de almacenamiento además incluye varios puertos como: HDMI, 4 puertos USB 3.0, un puerto Ethernet de 300 Mbps y 260 pines GPIO.

Para la matriz selección del tipo de tarjeta de control se toman en cuenta los siguientes factores costo, velocidad de procesamiento y facilidad de uso con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 81, Tabla 82, Tabla 83 y Tabla 84 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 81**

*Matriz de selección de criterios para la selección del tipo Tarjeta de Control*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Velocidad de Procesamiento</b>	<b>Facilidad de Uso</b>	<b>Suma +1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	0,5	0	1,5	0,25
<b>Velocidad de Procesamiento</b>	0,5	-	0,5	2	0,33
<b>Facilidad de Uso</b>	1	0,5	-	2,5	0,42
			<b>Total</b>	<b>6</b>	

**Tabla 82***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Costo*

Costo	Arduino Mega	Raspberry Pi	Jetson	Suma +1	Ponderación
Arduino Mega	-	1	1	3	0,50
Raspberry Pi	0	-	0,7	1,7	0,28
Jetson	0	0,3	-	1,3	0,22
			Total	6	

**Tabla 83***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Velocidad de Procesamiento*

Velocidad de Procesamiento	Arduino Mega	Raspberry Pi	Jetson	Suma +1	Ponderación
Arduino Mega	-	0	0	1	0,17
Raspberry Pi	1	-	0,5	2,5	0,42
Jetson	1	0,5	-	2,5	0,42
			Total	6	

**Tabla 84***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de Facilidad de Uso*

Facilidad de Uso	Arduino Mega	Raspberry Pi	Jetson	Suma +1	Ponderación
Arduino Mega	-	1	1	3	0,50
Raspberry Pi	0	-	0,5	1,5	0,25
Jetson	0	0,5	-	1,5	0,25
			Total	6	

**Tabla 85***Tabla de Holmes para la selección del tipo de Tarjeta Controladora*

	Costo	Velocidad de Procesamiento	Facilidad de Uso	de Suma	Prioridad
Arduino Mega	0,125	0,056	0,208	0,389	1
Raspberry Pi	0,071	0,139	0,104	0,314	2
Jetson	0,054	0,139	0,104	0,297	3
			Total	1,000	

Según la matriz de Holmes para la selección del tipo de tarjeta controladora de la Tabla 85 la solución A: Arduino Mega es la mejor opción cumpliendo con los parámetros establecidos como son el costo de la tarjeta que es bajo y la facilidad de uso.

### 3.6.2. Diseño de la Interfaz Humano Maquina (HMI)

#### 3.6.2.1. Selección del software

- A. PyQt
- B. Tkinter
- C. WxPython

Para la matriz selección del tipo de software HMI se toman en cuenta los siguientes factores software libre, facilidad de uso y compatibilidad con sus respectivas ponderaciones como se observa en las Tabla 86, Tabla 87, Tabla 88 y Tabla 89 comparados a través de la matriz de Holmes.

**Tabla 86**

*Matriz de selección de criterios para la selección del software para diseño del HMI*

Criterio	Software Libre	Facilidad de Uso	Compatibilidad	Suma +1	Ponderación
Software Libre	-	0,5	0,5	2	0,33
Facilidad de Uso	0,5	-	1	2,5	0,42
Compatibilidad	0,5	0	-	1,5	0,25
			Total	6	

**Tabla 87**

*Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de software libre*

Software Libre	Solución A	Solución B	Solución C	Suma +1	Ponderación
Solución A	-	0,5	0,5	2	0,33
Solución B	0,5	-	0,5	2	0,33
Solución C	0,5	0,5	-	2	0,33
			Total	6	

**Tabla 88***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de facilidad de uso*

Facilidad de Uso	Solución A	Solución B	Solución C	Suma +1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0,8	0,8	2,6	0,43
<b>Solución B</b>	0,2	-	0,5	1,7	0,28
<b>Solución C</b>	0,2	0,5	-	1,7	0,28
			Total	6	

**Tabla 89***Ponderación de las soluciones con respecto al criterio de compatibilidad*

Compatibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Suma +1	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0,5	0,5	2	0,33
<b>Solución B</b>	0,5	-	0,5	2	0,33
<b>Solución C</b>	0,5	0,5	-	2	0,33
			Total	6	

**Tabla 90***Tabla de Holmes para la selección del tipo de Software del HMI*

	Software Libre	Facilidad de Uso	Compatibilidad	Suma	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,111	0,181	0,083	0,375	1
<b>Solución B</b>	0,111	0,118	0,083	0,313	2
<b>Solución C</b>	0,111	0,118	0,083	0,313	3
			Total	1	

**Concepto final**

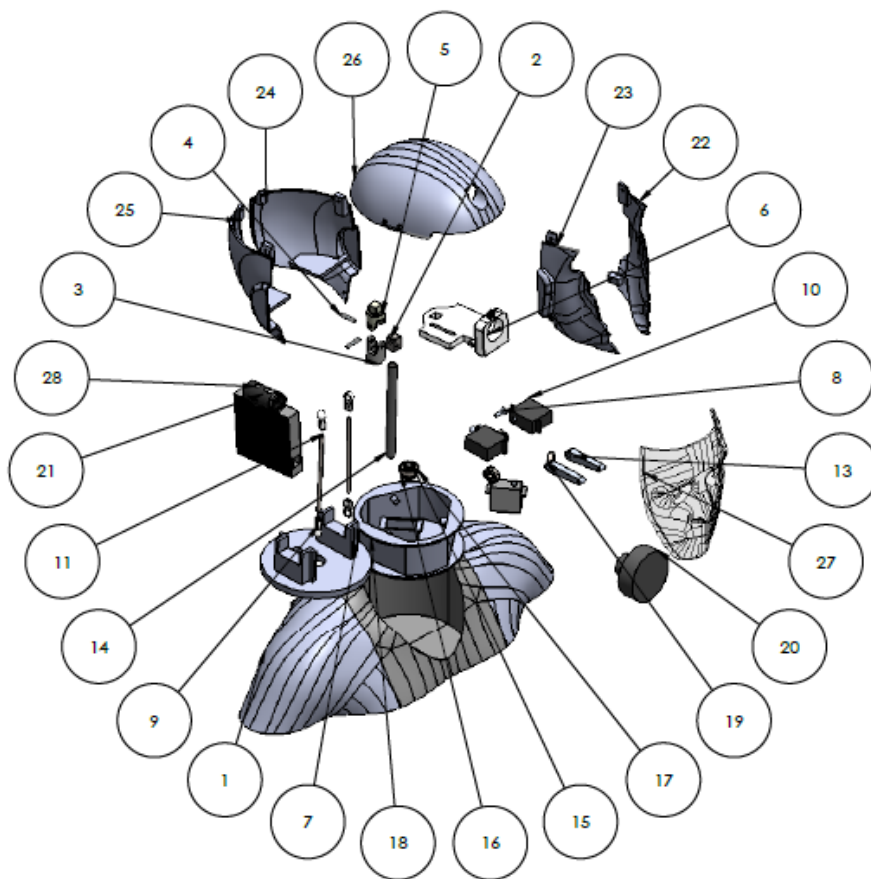
El resumen los elementos utilizados para el subsistema comunicación se observa en la Tabla 91.

**Tabla 91***Concepto final subsistema comunicación*

Subsistema	Concepto final
<b>Comunicación</b>	Tarjeta de control- Arduino
	PyQt5 HMI

### 3.7. Prototipo simulado

Se presenta un esquema gráfico del diseño completo explotado del prototipo de la cabeza antropomórfica el cual se puede observar en la Figura 40.



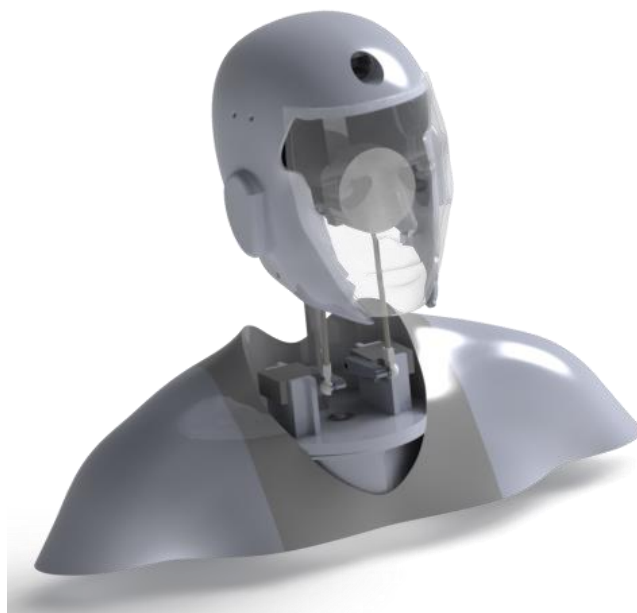
**Figura 40.** Explotado 3D de la Cabeza Robótica Antropomórfica

Consta de 28 partes cada una con una función en específica como son bastidor, sujeción, transmitir movimiento, entre las más importantes podemos encontrar la base que permite la sujeción de 2 servo motores, la plataforma superior que contiene el proyector y lente, el casco que permite la sujeción de la cámara y de la máscara de proyección y torso. En la se puede ver la denominación de cada una de estas piezas.

**Tabla 92***Lista de materiales diseño CAD cabeza antropomórfica*

Número	Denominación	Número	Denominación
1	Torso	15	Bocín
2	Junta universal inferior	16	Acople motor bocín
3	Junta universal unión	17	Rodamiento ISO15 ABB- 1010
4	Tornillo M6x30	18	Base
5	Junta universal superior	19	Rodamiento ISO15 ABB- 108
6	Plataforma superior	20	Lente ojo de pez
7	Plataforma inferior	21	Mini Proyector
8	Rotula macho	22	Casco frontal derecha
9	Rotula hembra	23	Casco frontal izquierda
10	Servo Motor MG-995	24	Casco posterior derecha
11	Barra de Acero M6	25	Casco posterior izquierda
12	Eje Motor	26	Casco_Superior
13	Manivela	27	Mascara de proyección
14	Eje unión plataformas	28	LifeCam HD

En la Figura 41 se puede observar una vista del prototipo final.

**Figura 41.** Prototipo Cabeza Antropomórfica

### 3.8. Resumen

En el capítulo se presentó todo el diseño mecatrónico realizado para la cabeza antropomórfica proyectada, partió de la definición de necesidades y métricas del sistema a partir de la matriz QFD y la clasificación del proyecto en subsistemas con el propósito de buscar un mejor enfoque. Para el desarrollo del prototipo los subsistemas fueron: Subsistema Mecánico, Proyección Gestual, Interacción y comunicación. En el subsistema mecánico se realizó la selección del mecanismo del cuello que fue un paralelo asimismo el cálculo de la cinemática inversa para el posicionamiento de la cabeza, el análisis de esfuerzos y selección del motor a usar que fue un servomotor MG996R, la selección del material de la carcasa que se eligió fue ABS y PLA. En el subsistema Proyección gestual se realizó la selección del material de la máscara que fue el Poliestireno blanco de alto impacto (HIPS) y el proceso de conformado que es por termo conformado, se eligió el lente tipo ojo de pez y el proyector DLP Mini Proyector Portátil HD, para el diseño de la animación del rostro se utilizó el software Blender. Para el subsistema de interacción se tuvo en cuenta los requerimientos planteados que fue interactuar fluidamente con la cabeza para ello se implementaron algunos módulos como TTS y STT de google, reconocimiento de palabras clave se escogió Snowbody, para el caso de la detección y seguimiento se utilizó el módulo de Visión Artificial de Viola Jones y para el chatbot se realizó con un api de google llamado Dialogflow. En el subsistema de comunicación se empezó por elegir la placa de control a utilizar que fue un arduino mega. Se presentó el esquema de programación del robot por partes, se diseñó la HMI, se realizó el análisis de esfuerzos de las partes más críticas de la cabeza, se mostró el diseño electrónico y la placa y por último se presentó el diseño completo explotado en CAD. En el capítulo siguiente se evaluarán todas las opciones seleccionadas.



## CAPÍTULO 4

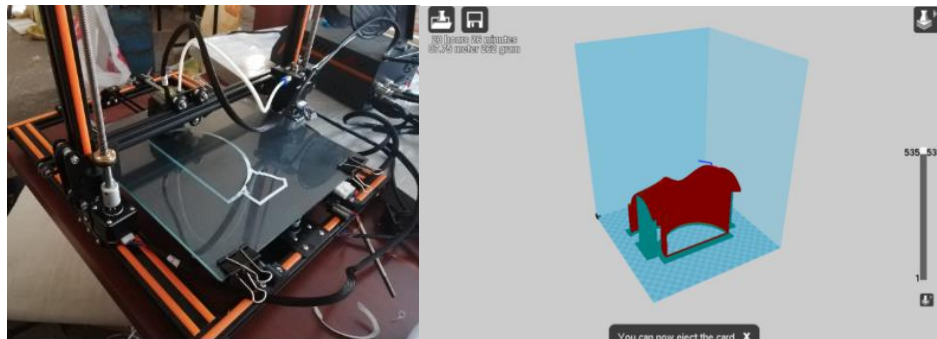
### 4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En el capítulo se realiza la construcción e implementación del diseño que se explicó en el capítulo anterior. Se realizarán las pruebas mecánicas al mecanismo del cuello. También se mostrará las pruebas de proyección del rostro variando el encuadre de la cámara y la forma, además se va a explicar las pruebas y resultados de funcionamiento del robot obtenidos de acuerdo a las pruebas de usabilidad con el usuario que permitan medir el nivel de satisfacción, su desempeño y facilidad de uso.

#### 4.1. Implementación

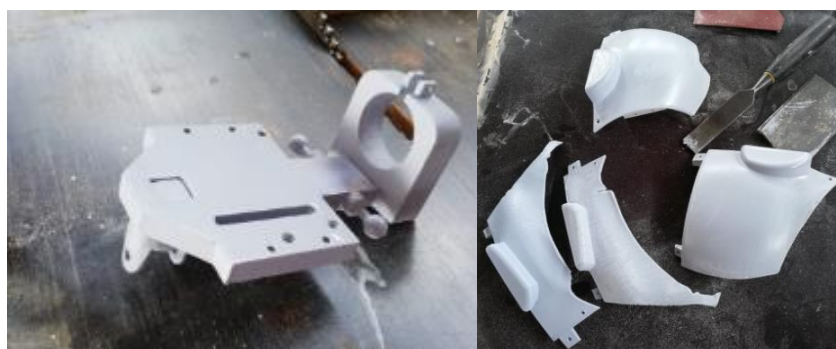
##### 4.1.1. Construcción Mecánica

Para comenzar con la construcción, se imprimió todas las partes del robot en 3D tanto en ABS y PLA como se muestra en la Figura 42



*Figura 42.* Impresión torso del robot

A continuación en la Figura 43 se observan algunas de las partes impresas.



a)

b)



c)

d)

**Figura 43.** Partes impresas en 3D a) soporte para el proyector y lente ojo de pez b) carcasa del robot c) mecanismo para el movimiento del cuello-junta universal d) base del robot

También se fabricaron partes como la rótula y manivela Figura 44 en aluminio utilizando la CNC.



a)

b)

**Figura 44.** Partes manufacturadas CNC a) Manivela-motor b) rótula

A continuación se observa en la Figura 45 el modelo del rostro termo conformado en acrílico translúcido blanco-opal.



*Figura 45.* Máscara termo conformada

En la Figura 46 se encuentra la construcción total del robot integrando cada uno de los componentes.

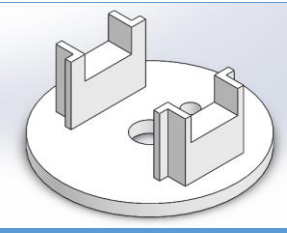


*Figura 46.* Ensamble total del robot

#### **4.1.2. Hoja de procesos impresión 3D**

En la Tabla 93 se observa el procedimiento realizado para la impresión 3D de los elementos que compone el robot. El procedimiento es el mismo para todas las partes impresas variando en el tiempo y costo de impresión.


**Tabla 93***Hoja de procesos impresión 3D*

<b>N°:</b>	<b>1</b>				
<b>Pieza:</b>	Plataforma inferior base				
<b>Conjunto:</b>	Prusa I3				
<b>N° plano:</b>					
<b>Realizado:</b>	Ana Oña-Cristhian Masabanda				
<b>Fecha de inicio</b>	16/12/2019				
<b>Fecha final</b>	23/12/2019				
<b>Archivo:</b>	Base.stl				
<b>Fase</b>	Operación	Herramienta	Tiempo en min	US	
				14,40\$	
<b>1</b>	Importar STL	Solidworks	2	1\$	
<b>2</b>	Modelado 3D	Solidworks	722	14,40\$	
<b>3</b>	Drawing	Solidworks	60	0\$	

**4.1.3. Hoja de procesos CNC**

El mecanizado para la rótula macho se realizó en aluminio debido a que debe soportar esfuerzo cortante, el maquina se hizo en una CNC por el tiempo de mecanizado y su facilidad. A continuación en la Tabla 94 muestra la hoja de procesos.

**Tabla 94***Hoja de procesos CNC-Rótula macho*

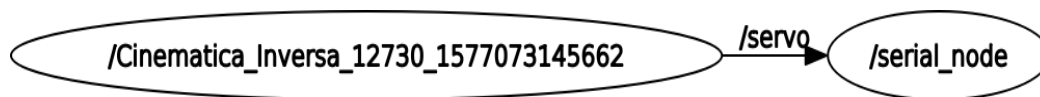
<b>PROYECTO:</b>		TESIS RM		<b>PLANO N°</b>		1	<b>TRABAJO N°</b>		1	<b>FECHA</b>		23/12/19
<b>PIEZA:</b>		RÓTULA MACHO		<b>PLANO N°</b>		1	<b>HOJA:</b>		1			
<b>MATERIAL:</b>		ALUMINIO		<b>DIMENSIONES EN BRUTO:</b>				10*25 mm				
<b>REALIZADO POR:</b>		Masabanda Cristhian-Oña Ana										
												
Fase	Oper	Denominación	Velocidad de corte (Vc) [m/min]	Velocidad mandril (n) [RPM]	Pasadas	# de pasada	Profundidad de pasada a [mm]	Fuerza principal de corte Fs [N]	Velocidad de avance Vf [mm/min]	Fuerza específica de corte Ks [N]	Tiempo de corte Tc [min/Pasada]	Tiempo de corte total (min)
0		Refrentado	150	1194	1	1	2	262	357	698	0.5	0.5
1	1	Cilindrado de 10 a 4 mm Longitud 10.69	150	1592	7	1	1	377	477	838	0.12	0.84
						2	1	377	477	838	0.12	
3	1	Mov 2 Punto 2 a punto 3 semiesfera	150	1591.55	2	1	0.5	41	477	279	0.11	0.22
						2	0.5	41	477	279	0.11	
<b>TIEMPO TOTAL</b>												<b>1.56 min</b>

#### 4.1.4. Programación y comunicación

##### 4.1.4.1. Pseudocódigos

##### Control Motores

Control Motores es un nodo que permite el manejo de giro de los mismo, usa el método de comunicación de Ros Serial, el cual da la facilidad del envío de arreglo de datos desde la computadora hacia el Arduino, siguiendo el esquema que se muestra en la Figura 47.



**Figura 47.** Esquema de Comunicación Control Motores

El pseudocódigo que se muestran a continuación permite observar la lógica de funcionamiento y programación del mismo, tenga en cuenta que el primer paso es el envío de las posiciones iniciales de los tres servos del sistema e inicia además el nodo subscriptor Arduino. Comprueba la existencia de datos enviados a través de Ros Serial por el nodo de cinemática inversa, si la comprobación es verdadera entonces el nodo Arduino se suscribe al nodo servo, para posterior a ello guardar los datos que existan en la variable ángulos y esta misma ser traducida a señales de control de cada uno de los motores.

##### Pseudocódigo 1 Control Motores

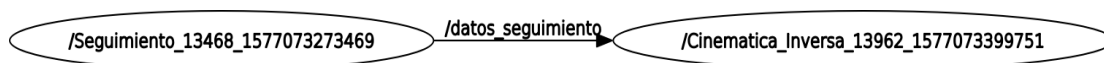
```

Iniciar posiciones iniciales Servo;
Iniciar Nodo Subscriptor Arduino;
Si (Datos_Cinematica_Inversa != Vacio) entonces {
  Arduino.Suscribirse(Servo);
  Si (Arduino.Suscribirse(Servo) != 0) entonces {
    angulos = Arduino.Leer(Servo);
    EscribirServo(Angulos);
  }
}

```

## Cinemática Inversa

Cinemática Inversa es un nodo que permite la resección de datos del nodo de seguimiento a través del tópico de datos\_seguimiento, una vez obtenidos, mediante las ecuaciones de movimiento del mecanismo paralelo obtenidos en el capítulo anterior, calcula el ángulo de giro de cada uno de los motores para alcanzar la posición deseada como se muestra en la Figura 48.



**Figura 48.** Esquema de comunicación nodo Cinemática Inversa

El pseudocódigo que se muestra a continuación permite observar la lógica de funcionamiento y programación del mismo, en primer lugar inicia el nodo Subscriptor de nombre “Cinematica\_Inversa”, con el fin de obtener los datos enviados del nodo de “Seguimiento”, a través del tópico “datos\_seguimiento”, para posteriormente mediante un serie de ecuaciones obtenidas en la cinemática inversa del mecanismo paralelo en el capítulo anterior calcular los valores de los ángulos de cada uno de los actuadores del sistema, para su posterior publicación.

### Pseudocódigo 2 Cinemática Inversa

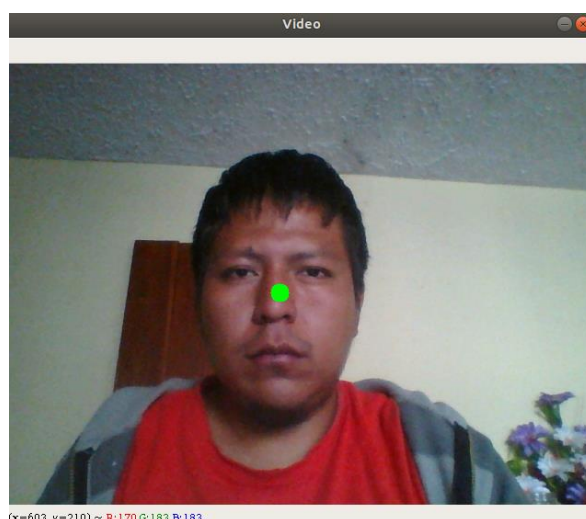
```

Iniciar Nodo Cinematica_Inversa;
Si ( Seguimiento != vacio ) entonces {
    Si ( Cinematica_Inversa.Sub(datos_seguimiento) != vacio) entonces {
        Angulos = Cinematica_Inversa.Leer(datos_seguimiento);
        Angulos = Cinematica_Inversa.Calcular(Angulos)
        Cinematica_Inversa.Publicar(Angulos)
    }
}
  
```

## Visión Artificial

La visión artificial es el modulo encargado de detección y dar seguimiento al robot, tiene como objetivo principal la simulación de la vista del mismo. Para ello se implementó una cámara en la parte superior de la cabeza, la cual permite obtener datos de la parte exterior del robot.

La visión artificial tiene un principio de funcionamiento que se observa en la Figura 49, consiste en la detección del rostro a través del algoritmo de viola jones utilizando el filtro de Hard Cascade, el cual permite detectar los puntos de interés alrededor de un rostro humano. El funcionamiento consiste en pintar un punto verde en la ubicación central del rostro que ha sido definida como la nariz y toma este como referencia para obtener los valores x e y de este punto.



**Figura 49.** Ejemplo de la detección del algoritmo de visión artificial

Visión Artificial es un nodo que permite la detección y el seguimiento de rostros, basado en el marco de detección de viola-jones, escrito en Python con la ayuda de la biblioteca de Open CV, utiliza la cámara Microsoft LifeCam ubicada en la parte superior de la cabeza para obtener los datos de la ubicación de la nariz en la imagen y posteriormente interpretarlos, como se muestra en la Figura 50.



**Figura 50.** Esquema de comunicación nodo Visión Artificial

El pseudocódigo que se muestra a continuación permite observar la programación del nodo de visión artificial, cuenta como pasos iniciales, iniciar el nodo “vision\_robot” e iniciar la cámara

(Microsoft LifeCam), para obtener los datos de ubicación x e y de la posición de la nariz en la imagen con el fin, de publicarlos a través del topic “topic\_open\_cv”, hacia el nodo de “Seguimiento”, para su posterior interpretación.

### Pseudocódigo 3 Visión Artificial

```

Iniciar Nodo visión_robot;
IniciarCamara(Microsoft LifeCam);
Mientras(Verdad) {
    Camara.Leer();
    Si( Camara.Leer() > vacio ) entonces {
        Rostro = detectar_rostro(Camara.Leer())
        Si ( Rostro > 0 ) entonces {
            Coordenadas = Rostro.Coordenadas();
            vision_robot.Publicar(Coordenadas);
        }
    }
}

```

### Dialog Flow

Dialog Flow es un API de google que permite desarrollar aplicaciones basadas en lenguaje natural, en el proyecto es la denominación del nodo que permite la comunicación fluida de las personas con la cabeza, se encuentra escrita en lenguaje Python haciendo uso de las librerías de Google Assistant, el modelo de comunicación con los otros nodos se puede observar en la Figura 51.



**Figura 51.** Esquema de comunicación nodo Dialog Flow

El pseudocódigo que se muestra a continuación tiene la lógica de programación de Dialog Flow, los primeros pasos es iniciar el nodo “Dialog\_Flow”, este nodo cuenta con algunos módulos de interacción como son TTS, STT y la detección de palabra clave y un asistente que tiene comunicación directa con la plataforma de google, una vez realice todo el proceso enviará la



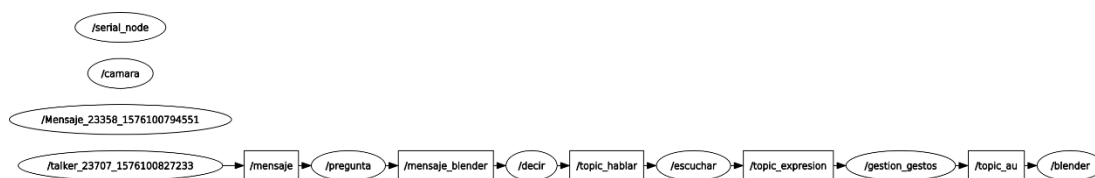
respuesta al nodo “Transferencia\_DialogFlow\_Blender”, mediante el t3pico “Mensaje\_Dialog\_Flow”,

#### **Pseudoc3digo 4 Dialogo Flow**

```
Iniciar Nodo Dialog_Flow;
Iniciar Asistente();
Mientras ( Asistente.Estado == Activo ) hacer {
    Asistente.Escuchar();
    Asistente.BuscarRespuesta();
    Asistente.Responder();
    Dialog_Flow.Publicar(Asistente.Respuesta());
}
```

#### **4.1.4.2. Diagrama Nodos**

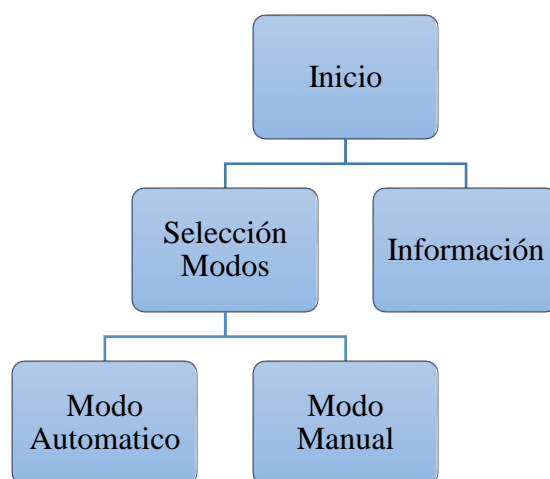
A continuaci3n, se presenta el diagrama de nodos de comunicaci3n de ROS en la Figura 52. La Interfaz Humano Maquina es la que permite activar y desactivar los nodos dependiendo del modo que haya sido elegido en la misma. En modo Autom3tico se lanzan un total de 10 programas que se comunican a trav3s de diferentes nodos publicadores y suscriptores. Los nodos en comunicaci3n constante son el nodo de mensaje, mensaje blender, hablar, gesti3n gestos y blender, nodos que permiten el movimiento y el habla del robot, los nodos serial node, camera y mensaje son nodos que se activan dependiendo de la tarea que se le asigne, los cuales se activan una vez se d3 la orden de seguimiento, de esta manera se activara el nodo del mismo nombre que permitir3 que el robot realice la tarea de seguir a la primera persona que encuentre. En Modo Manual estos nodos funcionan como dos cadenas sin comunicaci3n pues en el existen botones para activaci3n y desactivaci3n de gestos y seguimiento.



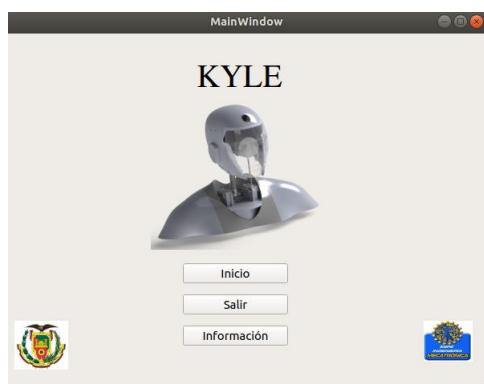
**Figura 52.** Diagrama de Nodos completo

#### 4.1.4.3. HMI

La Interfaz Humano Maquina (HMI por sus siglas en inglés), es aquella que permite controlar los diferentes modos de operación del robot. Consta de cinco ventanas que se distribuyen como se muestra en la Figura 53.



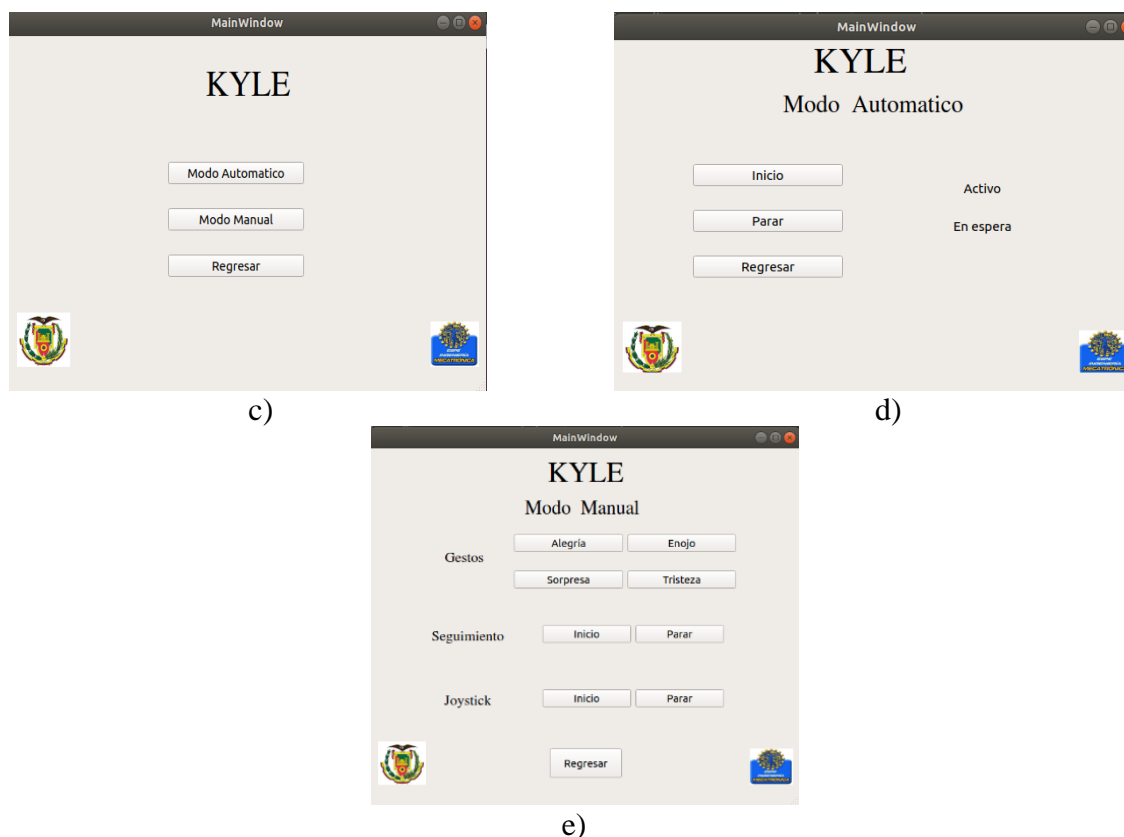
**Figura 53.** Distribución de Ventanas del HMI



a)



b)



**Figura 54.** Ventanas de la Interface Humano Maquina

a) Ventana de inicio b) Ventana de información c) Ventana de modos d) Ventana de modo automático e) Ventana de modo manual

### Ventana de Inicio

La ventana de Inicio es una presentación del sistema, las partes principales son nombre de la cabeza robótica, 3 imágenes en las cuales aparece el sello de la universidad, el sello de la carrera y una imagen del sistema completo. Y 3 botones que permiten navegar a las diferentes pestañas del sistema como son Inicio, Salir e Información como se muestra en la Figura 54.

El botón de inicio permite acceder a la ventana de Selección de Modos, el botón cierra el HMI completamente y el botón información permite acceder a una pestaña donde consta información general como son el nombre de los autores, nombre del proyecto, tutor del proyecto, año y lugar de desarrollo.

### **Ventana de Selección de Modos**

La ventana selección de modos permite la navegación entre las diferentes formas de funcionamiento del sistema como son modo automático y modo manual, tiene similitud con la ventana de inicio, pues el título y las imágenes de sello de la carrera y la universidad serán un patrón en todas las ventanas. La variación se presenta en los botones que son los siguientes: modo automático, modo manual y regresar, como se observa en la Figura 54.

El botón de modo automático permite acceder a la ventana de modo automático, el botón de modo manual analógicamente al anterior permite acceder a modo manual, y el botón regresar permite regresar a la pantalla de Inicio.

### **Ventana de Modo Automático**

La ventana de modo Automático permite encender y apagar el mismo, las partes de la misma son: el patrón de título y logos de la universidad y la carrera, un subtítulo que permite visualizar la ventana en la cual se encuentra y un arreglo de 3 botones como son Inicio, Parar y Regresar como se muestra en la Figura 54.

El botón de inicio permite iniciar el sistema en dicho modo, este proceso lo realiza a través del lanzamiento de una serie de comandos permitiendo la apertura de los nodos necesarios, el botón parar cierra los ciclos abiertos por el inicio, y el botón regresar permite acceder a la ventana de selección de modos, y dos indicadores para señales visuales para conocer el estado del micrófono activo o en espera.

### **Ventana de Modo Manual**

La ventana de modo manual consta de las siguientes partes: patrón de título y logo de la universidad y la carrera, título de la ventana de modo manual, y consta de tres grupos de botones,

el primer arreglo de 4 botones permite enviar ciertas emociones al robot, el segundo arreglo de 2 botones por el contrario permite dar inicio y parar el seguimiento implementado en el mismo, el último arreglo permite dar inicio y paro al módulo de manejo del mecanismo del robot a través de un joystick y un botón adicional que permite regresar al nivel anterior es decir la ventana Selección de modos como se observa en la Figura 54.

El primer grupo consta de 4 botones: alegría, enojo, sorpresa y tristeza. Con los mismos se puede enviar un diferente tipo de emoción al robot para luego regresar la forma original del rostro. El segundo grupo consta de 2 botones: inicio y parar. Con ellos se puede dar inicio al modo de seguimiento y detener el modo de seguimiento. El botón de regresar permite navegar de regreso a la ventana anterior de selección de modo.

### **Ventana de Información**

La ventana de modo Manual consta de las siguientes partes: patrón de título y logo de la universidad y la carrera, título de la ventana de modo manual, y consta de una serie de indicadores textuales en los cuales se da información sobre el título de proyecto, los autores, el tutor, el año y la ciudad, como se observa en la Figura 54.

## **4.2. Implementación del sistema de retroproyección**

El sistema de proyección es la parte visible del proyecto pues su función es la de transmitir los gestos y las emociones del robot hacia el exterior, consta de 4 partes principales las cuales son:

- Rostro y gestos en blender
- Proyector LCD
- Lente ojo de pez
- Mascara de proyección.

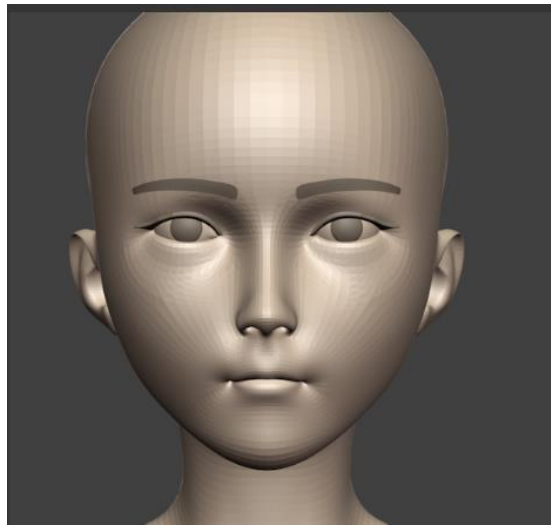
En el capítulo 3 se presentaron las componentes para el sistema, a continuación, se mostrará la implementación necesaria para que el sistema trabaje en las condiciones óptimas de funcionamiento.

#### **4.2.1. Software Blender**

Según, (Kadam et al., 2013) el software de diseño Blender fue utilizado para la creación de rostro y los gestos del mismo, cuenta con un gran número de herramientas que facilitan el trabajo de diseño de los gestos y de proyección del rostro.

##### **Rostro**

El rostro se puede observar en la Figura 55, fue tomado de la página CGTrader, es la base y el punto de partida para la realización de los gestos, en él se implementaran las shape keys y bones.



*Figura 55.* Rostro base en Blender

##### **Shape Keys**

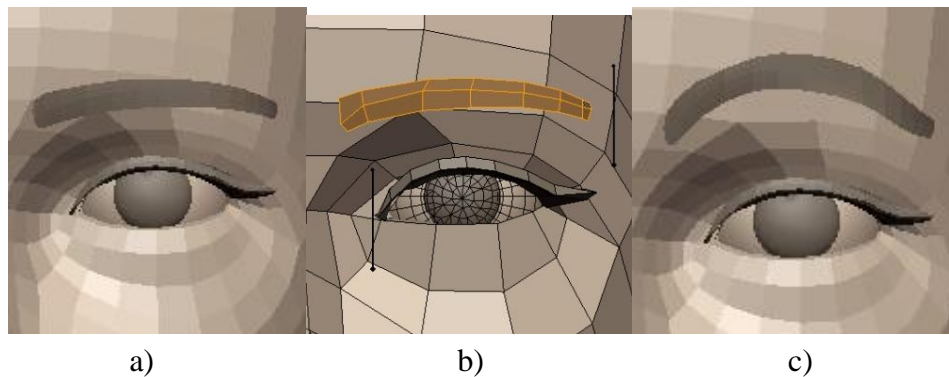
Los Shape Keys son herramientas utilizadas para la deformación de objetos como mallas, curvas y superficies, son comúnmente usados en animaciones faciales. Fueron implementadas 13 shape keys que se muestran a continuación en la Tabla 95.

**Tabla 95**

*Shape Keys implementadas en el robot.*

Shape Keys	Movimiento
1	Abrir boca
2	Sonrerir boca
3	Tristeza
4	Enojo
5	Parpadeo
6	Guiño
7	Cejas sorpresa
8	Cejas
9	Ojos sorpresa
10	Mover ojos
11	Pómulos
12	Cejas 1
13	Nariz

Cada una de las shape keys fue realizada mediante la selección de ciertas caras o vértices que permiten en el movimiento. Este proceso se muestra en la Figura 56, en la cual se parte desde la imagen base en el ejemplo se puede observar la cara en la posición inicial, elegidos las caras para el movimiento, se procede a darles el valor final de posición y de esta manera generando la animación 8 que consisten en el movimiento de la gente.



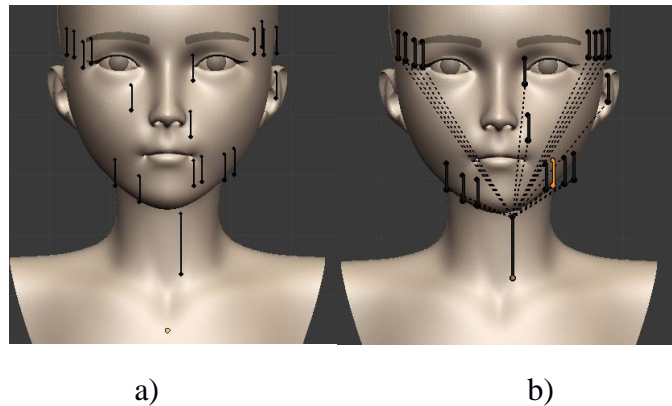
**Figura 56.** Proceso de creación de las shapes keys

a) Sin deformación b) selección malla c) shape keys terminada

## Bones

Antes de hablar de bones y explicar su funcionamiento, es necesario definir Armadura. La armadura es un elemento básico para animación de elementos en blender, puede ser considerado analógicamente como un esqueleto real, y al igual que un esqueleto real cuenta con varios huesos (bones).

Los bones son elementos básicos que se encuentran ligados a las armaduras y permiten controlar el movimiento dependiendo de la shape key a la cual se encuentran asociados. En la Figura 57, se pueden observar los 13 bones creados y asociados a cada una de shape keys. Al igual



**Figura 57.** Bones acoplados a la base del rostro y unidos a la armadura

a) bones b) armadura

## Unidades de Acción

La comunicación visual del rostro de una persona juega un papel muy importante a la hora de interacción de una persona con otra. Se demostró que solo el 7 % de la información afectiva es transferida por el habla, el 38% se transfiere por los gestos del cuerpo y el 55% se transmite a través de las expresiones faciales.

Por dicha razón se implementó un total de 16 Unidades de Acciones que se pueden observar a continuación en la Tabla 96, las cuales permiten la creación de los gestos de nuestro robot.

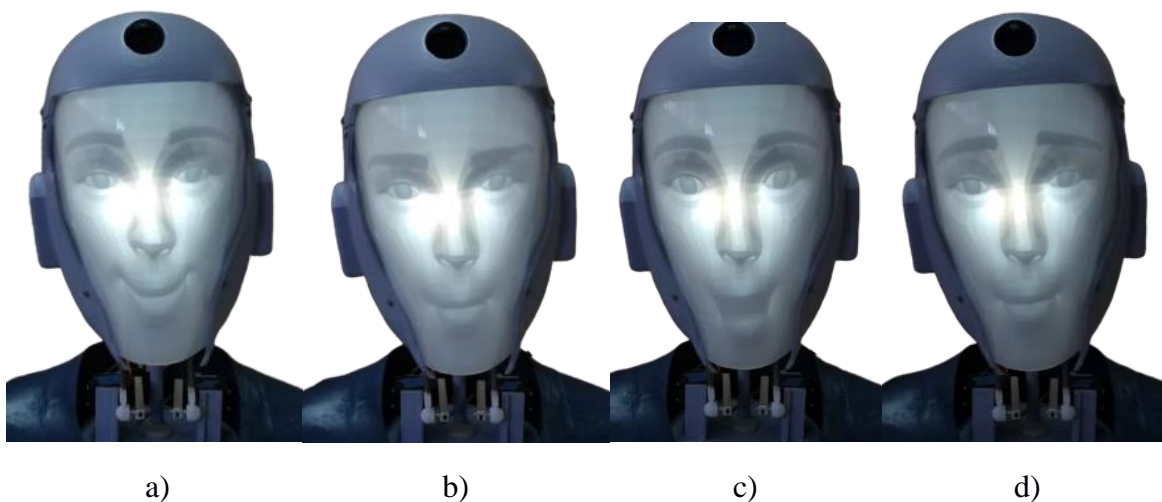


**Tabla 96**

*Unidades de acción implementadas en el robot.*

Unidad de Acción	Shape Key	Movimiento
AU1	1	Abrir boca
AU2	2	Sonreír boca
AU3	3	Tristeza
AU4	4	Enojo
AU5	5	Parpadeo
AU6	6	Guiño
AU7	7	Cejas sorpresa
AU8	8	Cejas
AU9	9	Ojos sorpresa
AU10	10	Mover ojos
AU11	11	Pómulos
AU12	12	Cejas 1
AU13	13	Nariz

La cabeza antropomórfica cuenta con un total de 4 gestos en modo manual como son Felicidad, Enojo, Tristeza y Sorpresa, los cuales nacen de la combinación de diferentes unidades de acción, que son procesadas por el software Blender y mostradas mediante el sistema de proyección, a continuación en la Figura 58, se muestran los diferentes gestos implementados en el robot.

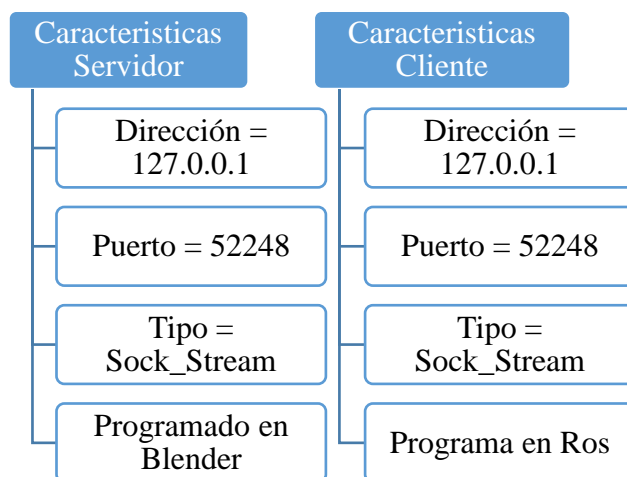


**Figura 58.** Emociones implementadas al robot a) Felicidad b) Enojo c) Sorpresa d) Tristeza)

## Comunicación Blender Ros

La comunicación entre blender y ros se lo se lo realiza a través de una conexión cliente servidor, haciendo uso de la librería socket. La librería socket es un módulo estándar del lenguaje de programación Python que proporciona una interfaz para crear conexiones del tipo TCP/IP y UDP. La conexión generada es de tipo lógico, esto permite crear un servidor no necesariamente en el mismo programa.

Para el caso del proyecto, se decidió generar un servidor el cual fue programado en Blender, tiene la facilidad de contar con un editor de texto para generación de códigos de programación. En la Figura 59 se puede observar las características más importantes como son la dirección ip, puerto, tipo y el programa donde se alberga. El cliente fue generado con las características similares compartiendo los valores de dirección, puerto y tipo, teniendo como única diferencia el programa donde se alberga pues este cambia para ser generado como un nodo en ROS.



**Figura 59.** Características cliente servidor para comunicación blender ros

Es necesario aclarar que para que la conexión sea exitosa se debe primero ejecutar el programa de blender, y posterior a ello correr el programa de Ros con el fin de obtener los mensajes como se muestran a continuación en la Figura 60.

```
GL_ARB_texture_env_combine supported? yes.
GL_ARB_texture_non_power_of_two supported yes.
servidor creado
cliente conectado
cris@cris-HP-ENVY-15-Notebook-PC:~$ rosrund tesis ros_blender_bridge.py
Nodo creado
ROS conectado con éxito
```

**Figura 60.** Mensajes de verificación para la correcta comunicación de blender con ros

Módulo STT se encuentra incorporado en la biblioteca de dialog flow y permite realizar el reconocimiento de las preguntas que se podrán hacer al robot en la Figura 61, se puede observar el funcionamiento del mismo cuando un usuario ha realizado una pregunta. La pregunta realizada fue “hablar con asistente”, la misma que permitirá ingresar al asistente personal.

```
ON_RECOGNIZING_SPEECH_FINISHED:
{"text": "hablar con asistente"}

ON_RESPONDING_STARTED:
{"is_error_response": false}
```

**Figura 61.** Ejemplo de reconocimiento del módulo STT

Una vez la pregunta es obtenida por el módulo STT, la biblioteca de dialog flow, busca la respuesta adecuada en la base precargada y transcribe esa respuesta para su posterior envío al módulo de TTS como se muestra en la Figura 62, que igualmente está basado en google y que posterior a ello trabajara en conjunto con los gestos para la simulación del movimiento de la boca.

```
ON_RENDER_RESPONSE:
{"text": "Hola. ¿cómo estás?", "type": RenderResponseType.TEXT}
Hola. ¿cómo estás?
ON_RESPONDING_FINISHED
```

**Figura 62.** Recepción de la respuesta de la base de datos de dialog flow

## Visemas

Un visema es la imagen visual del articulema (postura de los órganos articulatorios durante la emisión del fonema), es decir es el movimiento que realizarían ciertos músculos de la cara. Son muy utilizadas para la comunicación con personas sordo mudas para la lectura de los labios.

Los visemas son utilizados para la generación del movimiento de la boca al momento de la interacción con el robot, en la Tabla 97, se puede observar la traducción de la respuesta Hola. ¿Cómo estás?, en la cual cada letra ha sido traducida a un visema específico para su posterior generación de unidades de acción.

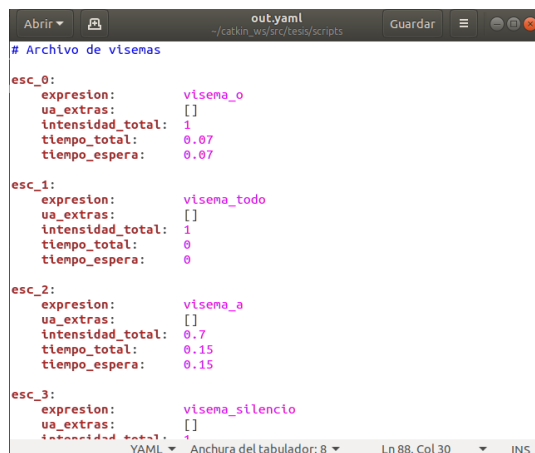
**Tabla 97**

*Tabla de conversión de fonemas hacia visemas*

Fonema	Visema
H	-
O	O
L	L
A	A
.	-
¿	-
C	K
Ó	I
M	M
O	O
E	E
S	S
T	T
Á	A
S	S
?	-

Las visemas generadas por lenguaje de programación Python son traducidas a una base de datos en las cuales se definió las unidades de acción y la intensidad de las mismas para su posterior generación de un archivo de salida que será enviado a través de los nodos antes explicados hacia

la simulación en blender. A continuación, en la Figura 63 se muestra un ejemplo del archivo de visemas para la respuesta Hola. ¿Cómo estás?



```

# Archivo de visemas
esc_0:
  expresion: visema_o
  ua_extras: []
  intensidad_total: 1
  tiempo_total: 0.07
  tiempo_espera: 0.07

esc_1:
  expresion: visema_todo
  ua_extras: []
  intensidad_total: 1
  tiempo_total: 0
  tiempo_espera: 0

esc_2:
  expresion: visema_a
  ua_extras: []
  intensidad_total: 0.7
  tiempo_total: 0.15
  tiempo_espera: 0.15

esc_3:
  expresion: visema_silencio
  ua_extras: []
  intensidad_total: 1
  tiempo_total: 0
  tiempo_espera: 0
  
```

**Figura 63.** Archivo de visemas para la frase Hola. ¿Cómo estás?

### 4.3. Pruebas mecánicas

#### 4.3.1. Mecanismo

Para las pruebas del funcionamiento del cuello se da valores a los ángulos de rotación Yaw, pitch y roll respectivamente después con ayuda de la Cinemática Inversa calcula el ángulo de giro que va a tener cada uno de los motores para alcanzar la posición deseada. Como se muestra en las Tabla 98 y Tabla 99

Ángulos de rotación

**Tabla 98**

*Ángulos de rotación*

Ángulos	Inicial	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
<b>Yaw</b>	0	15	0	0	-10
<b>Pitch</b>	0	0	-15	0	10
<b>Roll</b>	90	90	90	120	75

Datos de los ángulos del motor obtenidos de la cinemática inversa

**Tabla 99**

*Ángulos del motor*

Ángulos	Inicial	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
<b>Motor 1</b>	70	47	77	70	78
<b>Motor 2</b>	75	98	84	75	56
<b>Motor 3</b>	90	90	90	90	75

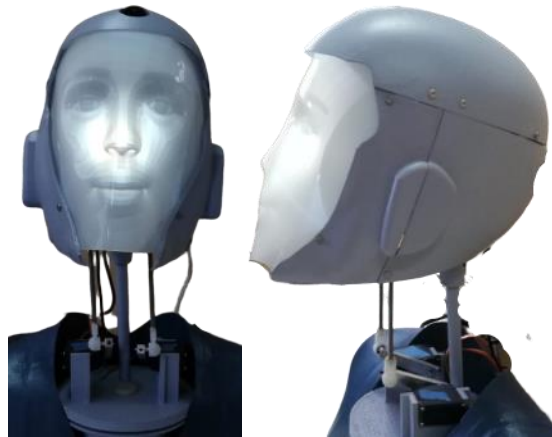
**Posición inicial:**

Para la posición inicial como se observa en la Figura 64 los valores de Yaw es  $0^\circ$ , pitch es  $0^\circ$  y Roll de  $90^\circ$  mientras que los ángulos del motor se posicionan en  $70^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente.



**Figura 64.** Posición inicial de los motores

Prueba 1: En la prueba 1 variamos el ángulo de rotación yaw a 15, mientras que al realizar los cálculos ya explicados, los ángulos del motor son  $47^\circ$ ,  $98^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente como se observa en la Figura 65



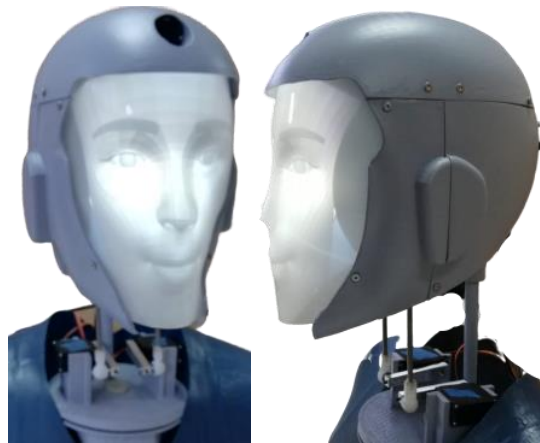
**Figura 65.** Primera prueba motores

Prueba 2: : En la prueba 2 variamos el ángulo de rotación pitch a  $-15$ , mientras que al realizar los cálculos ya explicados, los ángulos del motor son  $77^\circ$ ,  $84^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente como se observa en la Figura 66



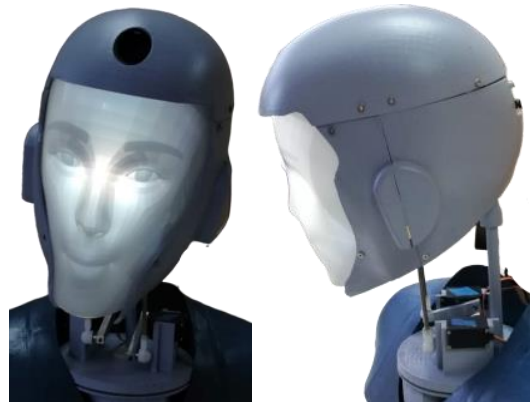
**Figura 66.** Segunda prueba motores

Prueba 3: : En la prueba 3 variamos el ángulo de rotación roll a  $120$ , mientras que al realizar los cálculos ya explicados, los ángulos del motor son  $70^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $120^\circ$  respectivamente como se observa en la Figura 67



*Figura 67.* Tercera prueba motores

Prueba 4: Para la prueba 4 variamos los tres ángulos de rotación dando como resultados los siguientes valores para los motores  $78^\circ$   $56^\circ$  y  $75^\circ$  respectivamente como se muestra en la Figura 68



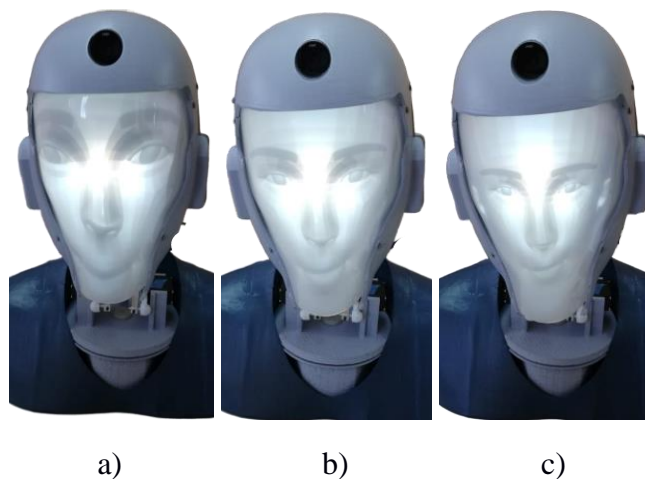
*Figura 68.* Cuarta prueba motores

#### **4.4. Pruebas de proyección**

La forma más sencilla para encontrar la escala ortográfica de cámara fue haciendo varias iteraciones en el factor en donde se hizo coincidir las proporciones de la cámara y la imagen del rostro después poco a poco se alineo la vista y se ajustó el factor de escala hasta que la imagen



proyectada se veía bien. A continuación en la Figura 69 se observa algunas pruebas realizadas con diferentes factores



**Figura 69.** Escala ortográfica con diferentes factores a) Factor de escala 4.5 b) Factor de escala 5.2 c) factor de escala 6

Tipos de rostros con valores

Al realizar la proyección con el rostro en su forma original la imagen proyectada era delgada por tanto la cara no se amoldaba a la máscara en su totalidad por ello se buscó diferentes formas para amoldar mejor al rostro. A continuación en la Tabla 100 se muestran los tipos de moldes que se van a proyectar dándole diferentes factores.

**Tabla 100**

*Tipos de moldes con diferentes factores*

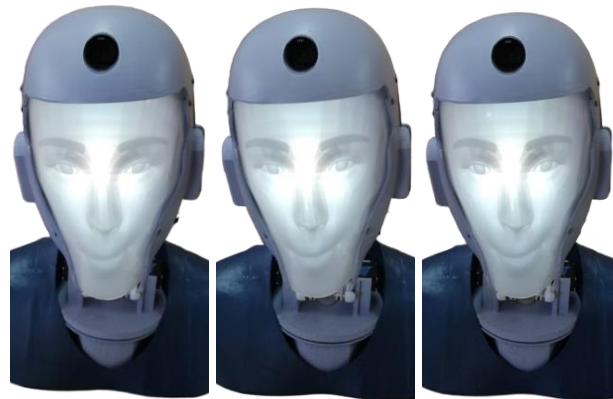
		Factor		
<b>Cuboide</b>	0.3	0.5	0.8	
<b>Cilíndrico</b>	0.3	0.5	0.8	
<b>Esférico</b>	0.3	0.5	0.8	



a)



b)



c)

**Figura 70.** Tipos de moldes para los rostros con diferentes factores a) Cuboide b) Cilíndrico  
c) Esférico

#### 4.5. Pruebas de usabilidad

La herramienta para realizar las pruebas de aceptación por parte del usuario es el método SUS (System Usability Scale) es una herramienta confiable que mide la usabilidad de un objeto, dispositivo o aplicación. Fue creado por John Brooke en 1986. Es simple de usar y los resultados que se obtienen son acertados por ello se utiliza para medir la usabilidad en Experiencia de Usuario (Devin, 2017).

La escala SUS consiste en un cuestionario de 10 preguntas que se califican de 1 (Total desacuerdo) a 5 (Total acuerdo). Los parámetros que mide principalmente el SUS son los siguientes: (Granollers, 2015)

- Efectividad del sistema
- Eficiencia
- Facilidad de uso

Las preguntas son sacadas del test original de la página Usability.gov y son las siguientes:

- Utilizaría el asistente de laboratorio frecuentemente.
- Encuentro al asistente de laboratorio innecesariamente complejo.
- Considero que el asistente de laboratorio es fácil de usar.
- Es necesario la asistencia de una persona para soporte técnico al usar el asistente de laboratorio.
- Considero que la integración de las funciones del asistente de laboratorio son las adecuadas.
- Considero que el asistente de laboratorio es muy inconsistente.
- Pienso que las personas aprenderían el uso del asistente de laboratorio rápidamente.
- Sentí incomodidad al usar el asistente de laboratorio.

- Estoy seguro al usar el asistente de laboratorio.
- Necesite un previo conocimiento del asistente de laboratorio para poder utilizarlo. (Devin, 2017)

Al terminar de realizar las preguntas de la encuesta que se encuentra en Anexos se procede a encontrar el tamaño de la muestra a estudiar. La población de estudio son las personas que se encuentran en el laboratorio de Mecatrónica tanto docentes como estudiantes.

Existen un total de 4 docentes y 16 estudiantes que trabajan diariamente en el laboratorio. Por tanto, la población N es de 20 personas.

N: 20 personas

Z: El nivel de confianza escogido de la Tabla 101 es del 95% y 5% de error por tanto el coeficiente de confianza es  $Z=1.96$

**Tabla 101**  
Nivel de confianza

Nivel de confianza Z (1- $\alpha$ )	90%	95%	95.50%	99%
Coficiente de confianza	1.64	1.96	2	2.58

e= margen de error se suele considerar un  $e=0,03$

p: estimación proporción considerar 50% (cumplan o no cumplan)

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)} \quad (43)$$

Al calcular la muestra tomando en cuenta un nivel de confianza de 95% se debe realizar la encuesta a 20 personas al igual que la población debido a que no es muy alta.

**Tabla 102**  
*Resultado SUS*

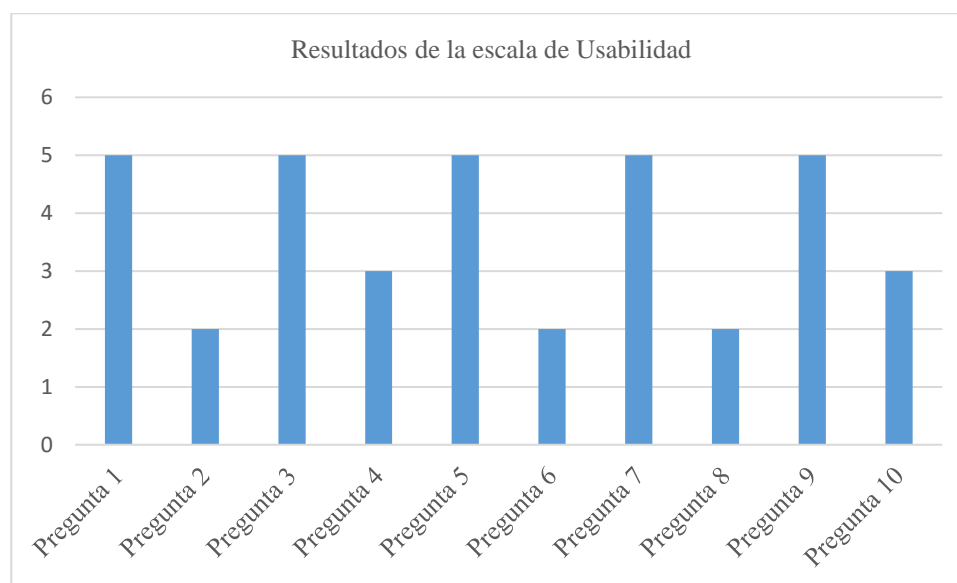
<b>Resultados de la encuesta SUS</b>		
<b>Pregunta 1</b>	5	4
<b>Pregunta 2</b>	2	3
<b>Pregunta 3</b>	5	4
<b>Pregunta 4</b>	3	2
<b>Pregunta 5</b>	5	4
<b>Pregunta 6</b>	2	3
<b>Pregunta 7</b>	5	4
<b>Pregunta 8</b>	2	3
<b>Pregunta 9</b>	5	4
<b>Pregunta 10</b>	3	2
	Total	33
		82,5

Se realizaron 22 encuestas las cuales presentan los resultados promedios en la Tabla 102 y también se puede analizar el gráfico de la Figura 71.

Como se observa en el gráfico de barras la pregunta 1, 3, 5,7 y 9 que califican al sistema su fácil uso, si la integración del sistema es la adecuada, seguridad al usar el sistema, nos explica que el usuario se siente cómodo al interactuar con el asistente de laboratorio, debido a la versatilidad de funciones que tiene el mismo, además utilizarlo es sencillo, y brinda la seguridad necesaria al usuario.

En el caso de las preguntas 2, 4, 6,8, y 10 donde las calificaciones del usuario son bajas como es el caso de la pregunta 2 donde su ponderación sobre 5 es 2 pues considera en desacuerdo que el asistente es complejo, en la pregunta 3 se mantiene neutral pues el usuario considera que si puede necesitar de una persona que le asesore en el funcionamiento del asistente.

Después de analizar las calificaciones por parte de los usuarios y promediarlos definimos el nivel de usabilidad del asistente que dio un total del 82.5 sobre 100 que indica que su aceptabilidad es excelente, sin embargo, al ser un prototipo debe ir mejorando en ciertos aspectos. En general los tres parámetros que mide el SUS que es la efectividad, eficiencia y facilidad de uso son altas por tanto el asistente cumple con los objetivos propuestos.



**Figura 71.** Resultados encuesta SUS

#### 4.6. Resumen

En el capítulo se describe la implementación y construcción del sistema y las pruebas realizadas además del análisis de resultados de las mismas. Para la implementación y construcción se dividió en la parte mecánica, la comunicación y programación. La parte mecánica parte desde la impresión en 3D del diseño, la construcción de piezas en la CNC y posteriormente el ensamblaje de todas las partes hasta tener el producto terminado. En la programación y comunicación se explica los nodos creados para cada función que realiza la cabeza como el control de los motores,

cinemática inversa, Visión artificial, Dialog Flow y la HMI cada uno con su respectivo pseudocódigo.

Para las pruebas se consideraron las pruebas mecánicas, pruebas de proyección y de Usabilidad SUS. Para las pruebas mecánicas se realizó del mecanismo del cuello donde se dieron valores a los ángulos de rotación Yaw, pitch y roll posteriormente con la Cinemática Inversa se calculó el ángulo de giro que tuvieron los actuadores. En las pruebas de proyección se encontró la escala ortográfica de cámara para ellos se hicieron varias iteraciones ajustando el factor de escala hasta que la imagen proyectada se veía bien. Después para mejorar la proyección del rostro se probó con diferentes tipos de moldes como fue el cuboide, cilíndrico y esférico siendo el último el más óptimo. Finalmente se realizaron las pruebas de aceptación del usuario con ayuda del método SUS (System Usability Scale) que midió la usabilidad del prototipo principalmente su efectividad, eficiencia y fácil uso.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1. Conclusiones

Se diseñó y construyó una cabeza robótica antropomórfica con proyección gestual. Partiendo del modelado del robot en CAD de dimensiones 600 mm de ancho, 350 de largo y 450 mm de altura se implementó un mecanismo de cuello de configuración paralela de tres grados de libertad, un sistema de proyección gestual y sensores para emular los sentidos de la vista y el oído.

El análisis de la cinemática inversa del mecanismo paralelo de 3 grados de libertad, se lo realizó mediante el método gráfico para obtener las siguientes ecuaciones (19) y (25) de movimiento de los ángulos de los actuadores tomando en cuenta que el ángulo de giro del motor 3 no se realiza ningún cálculo pues su valor de giro en el motor es igual a la rotación requerida sobre el eje Z.

El sistema de proyección gestual consta de 4 partes principales, la máscara de proyección de material acrílico color opal y realizada por el proceso de termo conformado, lente ojo de pez que cumple la función de adaptar de mejor forma la imagen a la máscara y acortar la distancia de proyección, el mini proyector por su característica compacta y Blender como software para el diseño del rostro y la creación de gestos.

Se desarrolló la animación de gestos en el software Blender para el rostro a partir de la creación de 20 unidades de acción que al integrarse entre cada una de ellas realizaron expresiones básicas como: sonrisa, tristeza, enojo, sorpresa además ciertos gestos para la acción del habla que en conjunto con el sistema de diálogo simulan el habla de una persona.



Para la visión artificial se incorporó una cámara, que permite la detección de rostros basado en el algoritmo de Viola Jones encontrando como punto de referencia la nariz. Con las coordenadas  $[x,y]$  del punto se realizó el seguimiento de personas.

Se implementó un sistema básico de diálogo con el usuario usando los servicios de Google como el TTS, STT, y "DialogFlow" además se incorporó un micrófono al sistema como entrada de voz, la integración de los servicios y el sensor permitió tener un lenguaje natural con el robot basándose en preguntas y respuestas sencillas.

La interfaz humano máquina (HMI) consta de los siguientes elementos: ventana inicio que es una presentación del robot, la ventana selección de modos permite elegir entre los modos de funcionamiento del robot como son: modo automático y modo manual que permiten el inicio y paro de los mismos, y la ventana información presenta el título, autores, tutor del proyecto.

Al realizar las pruebas de usabilidad de la cabeza antropomórfica se analizaron las respuestas de los usuarios encuestados dando como resultado el nivel de efectividad, eficiencia y facilidad de uso de la cabeza antropomórfica de 82.5 sobre 100 que indica que su interacción con el usuario es muy buena.

## **5.2. Recomendaciones**

La cabeza robótica antropomórfica simula dos de los cinco sentidos de un ser humano que son vista y oído. Se recomienda la implementación del sentido del tacto y la mejora del sentido del oído mediante un arreglo de micrófonos que puede ser distribuido en el tórax del robot.

Para el mecanismo paralelo de 3 grados de libertad se utilizó el método gráfico mediante el uso de vectores en 3D. Se recomienda buscar un método alternativo para el análisis de la cinemática

directa e inversa y con ello realizar el análisis dinámico del sistema para la obtención del área del trabajo del robot.

El lente ojo de pez cumple con la función de presentar la imagen de manera circular, pero tiene una desventaja en la resolución óptica. Por tanto, se recomienda utilizar herramientas computacionales como puede ser los filtros de opencv para permitir una mejora en la calidad de la imagen especialmente en las periferias.

La cabeza antropomórfica reproduce cuatro gestos básicos que son: alegría, enojo, tristeza y sorpresa. Se recomienda ampliar la cantidad de unidades de acción enfocándose más a detalle en los movimientos de los músculos del rostro humano con el fin de aumentar la naturalidad del gesto.

La cámara cumple con la función de permitir la visión en dos dimensiones. Se recomienda utilizar dos cámaras para la mejora del seguimiento permitiéndole a la cabeza realizar el movimiento en pitch.

El sistema básico de diálogo usando los servicios de google permite una comunicación con preguntas y respuestas cortas, la desventaja del sistema es que no es totalmente autónomo pues la información debe ser incluida previamente. Razón por la cual se recomienda implementar TensorFlow que es una biblioteca para machine learning que permite el aprendizaje automático.

La HMI permite la activación y desactivación de las funciones y modos de operación de la cabeza cuando la persona que lo maneja se encuentra en el mismo lugar que el robot debido a que se encuentra conectado al ordenador. Por lo cual se recomienda implementar un touch panel para añadirlo a la parte física del robot.

Las pruebas de usabilidad se realizaron únicamente a las personas que acuden al laboratorio de mecatrónica. Se recomienda hacer las pruebas SUS a personas de diferentes edades entre niños,

adultos y ancianos con el fin de validar que el nivel de aceptación del usuario sea mayor o igual a 82.5 sobre 100.

### 5.3. Trabajos Futuros

Según, (Gu & Su, 2006) la visión es una de las modalidades de interacción más importantes y el gaze control es un comportamiento esencial para obtener imágenes de alta resolución, mantener la línea de visión en el objetivo y mantener el contacto visual con la persona.

Razón por la cual se recomienda como trabajo futuro implementar un control de mirada (gaze control). La arquitectura propuesta tiene cuatro módulos que son: un módulo de evaluación parcial, módulo de preferencia, módulo control de mirada y módulo de memoria para ellos se debe reemplazar la cámara de dos dimensiones por una cámara RGB-D y el micrófono por un arreglo de cuatro, como se puede observar en la Figura 72.



**Figura 72.** Proyecto futuro acoplado a una arquitectura gaze control.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Abdollahi et al., H. (2017). A pilot study on using an intelligent life-like robot as a companion for elderly individuals with dementia and depression.
- Ballendat et al., T. (2010). Proxemic interaction: designing for a proximity and orientation-aware environment. 121-130.
- Breazeal, C. (2003). Toward sociable robots. *Elsevier*, 167-175.
- Breemen et al., A. v. (2005). iCat: an animated user-interface robot with personatiliy.
- Chaminade et al., T. (2002). Motor interference between Humans and Humanoid Robots: Effect of Biological and Artificial Motion. 321-326.
- Chan, L.-K., & Wu, M.-L. (2002). Quality function deployment: A literature review. *Elsevier*, 463-497.
- Delaunay, F. C. (2016). *A Retro-Projected Robotic Head for Social Human-Robot Interaction*.
- Delaunay, F., & Belpaeme, T. (2012). Refined Human-Robot Interaction through retro-projected robotic heads.
- Devin, F. (Febrero de 2017). *UXpañol*. Obtenido de <https://uxpanol.com/teoria/sistema-de-escalas-de-usabilidad-que-es-y-para-que-sirve/>
- Duffy et al., B. (2005). The Social Robot Architecture: A Framework for Explicit Social Interaction .
- Duffy, B. (2003). *Anthropomorphism and the social robot*. S/N: Elsevier Science.
- Duffy, B. R. (2003). Anthropomorphism and the social robot. 14.
- Espinosa Erazo, N., & Almeida Gallardo, R. (2018). *Rediseño y construcción de un robot social para interacción hombre máquina orientado a la educación de niños de 2-5 años*. Sangolquí.

- Fritsch et al., R. (2017). Optic-nerve-transmitted eyeshine, a new type of light emission from fish eyes.
- Garrell, A. (2010). *La Influencia del Efecto “Valle Inquietante” en el diseño de un robot social*. Barcelona.
- Granollers, T. (Julio de 2015). *System Usability Scale (SUS) en el s. XXI*. Obtenido de <http://mpiua.invid.udl.cat/system-usability-scale-sus-en-el-s-xxi/>
- Gu, L., & Su, J. (2006). Gaze control on humanoid robot head.
- Hashimoto et al., M. (2009). Gaze Guidance Using a Facial Expression Robot. 18.
- Ho et al., J.-H. (2006). Design of Android type Humanoid Robot Albert HUBO. *IEEE/RSJ*, 6.
- Ibañez, E. M. (2017). La autonomía en robótica y el uso de la fuerza. 15.
- Kadam et al., K. (2013). Integration of Blender 3D in Basic Computer Graphics Course.
- Karahalios, K. G., & Dobson, K. (2005). Chit Chat Club: Bridging Virtual and Physical Space for Social Interaction. 5.
- Kuratate et al., T. (2011). “Mask-bot”: a life-size robot head using talking head animation for human-robot communication. 6.
- Marks, P. (2014). Robot head disguises itself as your friends.
- Mollahosseini et al., A. (2014). ExpressionBot: An emotive lifelike robotic face for face-to-face communication.
- Mori et al., M. (2012). The Uncanny Valley. 98-100.
- Naimark, M. (1980). *Talking Head Projection*. Obtenido de <http://www.naimark.net/projects/head.html>

- Nishio, S., Ishiguro, H., & Hagita, N. (2007). Geminoid: Teleoperated Android of an Existing Person . 13.
- Ochoa Arias, C., & Trávez Acuña, F. (2018). *Diseño y construcción de una plataforma robótica para pruebas de técnicas sobre visión artificial que permita el aprendizaje y desarrollo del software en robots interactivos*. Sangolquí.
- Ruales Cortés, C. (2015). *Diseño y construcción de un rostro robótico de apariencia humana, con capacidad de ejecutar gestos y emociones, para la ESPE extensión Latacunga*. Latacunga.
- Salvador et al., M. (2015). An Emotion Recognition Comparative Study of Autistic and Typically-Developing Children using the Zeno Robot. *IEEE*, 6.
- Sandoval et al., J. (Enero de 2015). Diseño, fabricación y funcionamiento de un robot delta de bajo costo. 9.
- Savage, M. (Marzo de 2019). *Meet Tengai, the job interview robot who won't judge you*. Obtenido de <https://www.bbc.com/news/business-47442953>
- Simmons et al., R. (2003). GRACE: An Autonomous Robot for the AAI Robot Challenge. 19.
- Simmons et al., R. (2004). GRACE: An Autonomous Robot for the AAI Robot Challenge. 7.
- Valero, P. J. (2006). *Introducción a la robótica inteligente*.
- Wills et al., P. (2016). Socially Contingent Humanoid Robot Head Behaviour Results in Increased Charity Donations. 1-2.
- Yang et al., Y. (2015). Development and Experiment of Facial Robot SHFR-III.
- Zhang J., S. A. (2011). *Listening to Sad Music While Seeing a Happy Robot Face*. Springer, Berlin, Heidelberg: Lecture Notes in Computer Science, vol 7072.

**ANEXOS**