



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO.**

TEMA:

**“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL INTERACTIVO PARA
CAPTAR LA ATENCIÓN DE NIÑOS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO
AUTISTA”**

AUTORES:

**MENDOZA RODRÍGUEZ, VÍCTOR MANUEL
VEINTIMILLA MORALES, MAXWELL ALEXANDER**

DIRECTOR:

ING. TOBAR QUEVEDO, JOHANNA BELÉN

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MOVIL INTERACTIVO PARA CAPTAR LA ATENCIÓN DE LOS NIÑOS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA" realizado por los señores VICTOR MENDOZA, MAXWELL VEINTIMILLA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores VICTOR MENDOZA, MAXWELL VEINTIMILLA para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 14 de Marzo de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece leer 'Johanna Belén Tobar Quevedo'.

Johanna Belén Tobar Quevedo

CI: 171717124-1



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, VICTOR MANUEL MENDOZA RODRIGUEZ, con cédula de identidad N° 1722038328 y MAXWELL ALEXANDER VEINTIMILLA MORALES, con cédula de identidad N° 1720601978 declaramos que este trabajo de titulación, **“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MOVIL INTERACTIVO PARA CAPTAR LA ATENCIÓN DE LOS NIÑOS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Victor Manuel Mendoza Rodríguez
CI: 1722038328

Sangolquí, 14 de Marzo de 2018

Maxwell Alexander Veintimilla Morales
CI: 1720601978



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, VICTOR MANUEL MENDOZA RODRIGUEZ y MAXWELL ALEXANDER VEINTIMILLA MORALES, autorizamos a la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación, "DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MOVIL INTERACTIVO PARA CAPTAR LA ATENCIÓN DE LOS NIÑOS CON TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad

Sangolquí, 14 de Marzo de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul, bastante compleja y entrelazada, que parece decir 'Victor Manuel Mendoza Rodriguez'.

Victor Manuel Mendoza Rodriguez
Ci: 1722038328

Una firma manuscrita en tinta azul, más sencilla y fluida que la anterior, que parece decir 'Maxwell Alexander Veintimilla Morales'.

Maxwell Alexander Veintimilla Morales
Ci: 1720601978

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis padres quienes supieron guiarme, darme fuerzas para seguir adelante, enseñándome a encarar las adversidades sin desfallecer en el intento, por sus consejos que me sirvieron en toda la carrera universitaria.

A mi novia por su apoyo en esta etapa, su amor y comprensión incondicional dándome ánimos a continuar sin dar un pie atrás.

Atte. Víctor Manuel Mendoza Rodríguez

DEDICATORIA

A mis padres.

Por haberme dado su apoyo y motivación en cada momento, por sus consejos, sus valores y sobretodo su cariño, que me han permitido ser una persona de bien.

A mis hermanos.

Por estar siempre pendientes de todo el desarrollo del proyecto, apoyándome, motivándome y llenándome de buen ánimo para la finalización del mismo.

Atte. Maxwell Alexander Veintimilla Morales

AGRADECIMIENTOS

Gracias de todo corazón a mi tutora, Johanna Tobar. Gracias por su paciencia, motivación y aliento en todo este transcurso. Ha sido un privilegio poder contar con su guía.

Gracias a todos los ingenieros de la Universidad, por la confianza y amabilidad en toda mi vida universitaria.

Gracias a todas las personas que, de una manera u otra, han sido claves en la realización del proyecto de tesis, por su colaboración desinteresada de compartir sus conocimientos en las áreas que necesitábamos aplicar.

Gracias a todos mis compañeros y amigos de la Universidad, que en el transcurso de la vida universitaria contaba con su apoyo incondicional en las áreas que se requería para escalar de forma satisfactoria y culminar la Universidad.

Atte. Víctor Manuel Mendoza Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis ingenieros que me guiaron en cada uno de los semestres, llenándome de buenos valores como: responsabilidad, honestidad y ética profesional.

Gracias a mi universidad por permitirme ser parte de ella, por ser la testigo de mi desarrollo profesional en cada una de sus aulas.

Gracias a todos mis compañeros con los que luche sin descanso cada día para alcanzar la meta que hoy se hace realidad.

Gracias a todas las personas que participaron del proyecto, ya que sin ellas no se hubiera alcanzado el resultado deseado.

Atte. Maxwell Alexander Veintimilla Morales

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
1. CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES	1
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4. ALCANCE	4
1.4.1. Componentes mecánicos.....	4
1.4.1.1. Estructura del robot.....	5
1.4.1.1.1. <i>Características Técnicas</i>	5
1.4.1.2. Transporte.....	6
1.4.1.3. Estructura de la cabeza.....	6
1.4.1.4. Estructura del torso	7
1.4.1.5. Dimensiones.....	7
1.4.1.6. Evitar obstáculos	7
1.4.1.7. Sonido	8
1.4.1.8. Seguimiento Facial (Lucas-Kanade)	8
1.4.1.9. Selección de color	9
1.4.2. Componentes electrónicos/eléctricos.....	9
1.4.2.1. Circuitos de potencia.....	9
1.4.2.2. Acondicionamiento de señales.....	10
1.4.2.3. Selección de sensores.....	10
1.4.2.4. Placa de control	10
1.5. OBJETIVOS	10
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
1.5.2. OBJETIVO ESPECIFICOS	11
2. CAPÍTULO II.....	12
ESTADO DEL ARTE.....	12
2.1. Robótica interactiva.....	12
Interacción Humano-Robot (HRI)	13
Apariencia física del robot interactivo	14
Estructura Mecánica	15

Comportamiento del robot	18
2.1.1. Características funcionales.....	19
2.1.2. Clasificación de los robots	20
2.1.3. Aplicaciones de robots interactivos	21
2.1.3.1. Búsqueda y rescate.....	21
2.1.3.2. Robótica Asistencial y Educativa	22
2.1.3.3. Entretenimiento.....	22
2.2. Autismo en los niños.....	23
2.2.1. El Desafío de educar a los niños con autismo.....	24
2.3. La robótica en el aprendizaje de niños con autismo.....	25
2.4. Diagnóstico.....	26
2.4.1. Nivel Biológico.....	26
2.4.2. Nivel cognitivo	27
2.5. Inclusión.....	28
2.5.1. HRI para niños con TEA.....	29
3. CAPÍTULO III	31
DISEÑO DEL ROBOT INTERACTIVO	31
3.1 Análisis cinemático del robot interactivo móvil	31
3.2 Diseño conceptual.....	33
3.2.1 Arquitectura del prototipo del robot interactivo móvil.....	34
3.2.2 Normas empleadas	35
3.3 Diseño detallado mecánico del robot interactivo móvil	35
3.3.1 Diseño CAD.....	36
3.3.2 Cálculo de datos necesarios de las partes del robot interactivo..	37
3.3.3 Determinación de torque del manipulador	38
3.3.3.1 Caracterización de actuador.....	39
3.3.4 Determinación de torque del brazo.....	40
3.3.4.1 Caracterización de actuador.....	41
3.3.5 Determinación de torque de la cabeza	42
3.3.5.1 Caracterización de actuador.....	45
3.3.6 Determinación de torque del troco.....	46
3.3.6.1 Caracterización de actuador.....	47
3.3.7 Determinación de torque de la base	49
3.3.7.1 Caracterización de actuador.....	50
3.4 Diseño electrónico y de control	71
3.4.1 Controlador.....	72
3.4.2 Drivers	73
3.4.3 Sensores.....	74
3.4.4 Baterías.....	76
3.4.4.1 Selección de baterías	78
3.4.4.2 Convertidor DC-DC sección potencia	79
3.4.4.3 Convertidor DC-DC sección control	79
3.4.5 Diseño de control.....	80

Diagrama de flujo de la secuencia de trabajo del robot	80
4. CAPÍTULO IV	82
IMPLEMENTACIÓN	82
4.1 Implementación del proceso, equipo o máquina	82
4.2 Ensamblaje de las partes mecánicas.....	86
4.2.1 Ensamblaje del manipulador al brazo	86
4.2.2 Ensamblaje del brazo al tronco	86
4.2.3 Ensamblaje de la cabeza al tronco.....	87
4.2.4 Ensamblaje del tronco a la base	88
4.3 Implementación de los componentes electrónicos	89
4.3.1 Implementación del circuito electrónico	89
4.4 Programación del sistema de control	91
5. CAPÍTULO V	94
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	94
5.1 Pruebas de equipo o máquina	94
5.1.1 Protocolo de prueba para tiempo de trabajo del mecanismo.....	94
5.1.2 Resultados de prueba del mecanismo.....	94
5.2 Pruebas de componentes eléctricos y electrónicos.....	95
5.2.1 Protocolo de prueba para componentes electrónicos	95
5.2.2 Resultados de la prueba de componentes electrónicos	95
5.3 Pruebas del sistema de control	96
5.3.1 Protocolo de prueba de reconocimiento de rostro	96
5.3.2 Resultados de la prueba de seguimiento facial.....	97
5.4 Prueba del sistema mecatrónico.....	99
5.4.1 Protocolo del sistema conjunto interactuando con los niños.....	100
5.4.2 Resultados de pruebas del sistema conjunto	100
5.5 Análisis financiero.....	105
5.5.1 Costos directos	105
5.5.1.1 Costos de materiales directos	106
5.5.1.2 Costos de mano de obra directa	107
5.5.1.3 Costos total directo.....	107
5.5.2 Costos indirectos	107
5.5.3 Costos totales.....	108
6. CAPÍTULO VI.....	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
BIBLIOGRAFIA	111
ANEXOS	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Componentes electrónicos utilizados en “Robota”</i>	17
Tabla 2. <i>Tabla comparativa de robots interactivos aplicados al autismo</i>	18
Tabla 3. <i>Requerimientos del prototipo de exoesqueleto</i>	34
Tabla 4. <i>Datos de masa del robot interactivo</i>	37
Tabla 5. <i>Características de actuadores</i>	39
Tabla 6. <i>Características del actuador</i>	40
Tabla 7. <i>Características de actuadores</i>	42
Tabla 8. <i>Características de actuadores</i>	45
Tabla 9. <i>Características del actuador</i>	46
Tabla 10. <i>Características de actuadores</i>	48
Tabla 11. <i>Características del actuador</i>	49
Tabla 12. <i>Características de actuadores</i>	50
Tabla 13. <i>Características del actuador</i>	51
Tabla 14. <i>Factores de distribución de carga</i>	56
Tabla 15. <i>Factor geométrico para flexión</i>	57
Tabla 16. <i>Controladores</i>	72
Tabla 17. <i>Drivers para control de motores DC</i>	73
Tabla 18. <i>Driver para control de servo motor</i>	74
Tabla 19. <i>Sensores de proximidad comerciales</i>	75
Tabla 20. <i>Webcam</i>	75
Tabla 21. <i>Batería Zippy 7.4V a 5000 mAH</i>	78
Tabla 22. <i>Convertidor DC-DC</i>	79
Tabla 23. <i>Convertidor DC-DC sección control</i>	79
Tabla 24. <i>Resultados de la impresión 3D</i>	83
Tabla 25. <i>Protocolo de pruebas de tiempo de trabajo del mecanismo</i>	94
Tabla 26. <i>Tabla de resultados del tiempo de trabajo del mecanismo</i>	95
Tabla 27. <i>Protocolo de prueba de servo motores</i>	95
Tabla 28. <i>Resultados en las pruebas de los servo motores</i>	96
Tabla 29. <i>Protocolo de prueba de la detección facial</i>	96
Tabla 30. <i>Protocolo de prueba de la detección facial</i>	100

Tabla 31. <i>Tabulación de datos de la primera sesión</i>	101
Tabla 32. <i>Tabulación de la encuesta realizada a las terapeutas de la fundación Virgen de la Merced</i>	104
Tabla 33. <i>Costo de materiales directos</i>	106
Tabla 34. <i>Costo de mano de obra directa</i>	107
Tabla 35. <i>Costo total directo</i>	107
Tabla 36. <i>Costos indirectos</i>	108
Tabla 37. <i>Costo total del proyecto</i>	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Kaspar interactuando con niña autista.....	1
Figura 2. Estudiantes preparando a “Siro”	2
Figura 3. Menú principal de la aplicación PICTOAPRENDE.....	3
Figura 4. Esquema de Componentes Mecánicos	4
Figura 5. Robot híbrido	5
Figura 6. Vista Frontal del robot.....	6
Figura 7. Medidas tentativas del diseño.	7
Figura 8. Emic 2 text-to-speech Module	8
Figura 9. Método Lucas-Kanade.....	8
Figura 10. Esquema de componentes electrónicos/eléctricos	9
Figura 11. Prototipo de robot interactivo (KASPAR)	14
Figura 12. Robot interactivo “Tito”	15
Figura 13. Estructura Mecánica del robot interactivo “Keepon”	16
Figura 14. Robota, muñeca humanoide para la interacción Humano-Robot	16
Figura 15. Vista conceptual del sistema TAME (modificador de comportamiento)	19
Figura 16. Diseño CAD del robot interactivo móvil	37
Figura 17. DCL del manipulador	38
Figura 18. DCL del brazo.....	41
Figura 19. DCL de del movimiento vertical de la cabeza	43
Figura 20. DCL del movimiento horizontal de la cabeza.....	44
Figura 21. DCL del tronco.....	47
Figura 22. DCL de la base	49
Figura 23. Curvas para el cálculo de resistencia a la fatiga.....	60
Figura 24. Curvas para el cálculo de factor de vida	61
Figura 25. Resistencia a la fatiga superficial.....	62
Figura 26. Curvas para el cálculo de factor de vida	62
Figura 27. Vista Isométrica del piñon de 15 dientes	64
Figura 28. Vista Isométrica de la corona de 15 dientes	64
Figura 29. Bosquejo del eje	65

Figura 30. Diagrama de cuerpo libre Plano (x-y)	65
Figura 31. Diagrama de momentos del eje b – plano X-Y.	66
Figura 32. DCL eje b, plano X-Z.	66
Figura 33. Diagrama de momentos del eje b – plano X-Z.	67
Figura 34. Tabla para estimación de concentración de esfuerzos.....	68
Figura 35. Tabla para seleccionar parámetros	69
Figura 36. Momento en el punto crítico	69
Figura 37. Vista isométrica del eje.....	70
Figura 38. Sistema de control en lazo cerrado para el prototipo de robot interactivo móvil.....	71
Figura 39. Diagrama de flujo de la secuencia de trabajo del robot.....	81
Figura 40. Impresora 3D en creación tronco del robot.....	84
Figura 41. Acabado final de partes del robot	85
Figura 42. Pintado final de la estructura	85
Figura 43. Ensamble de manipulador brazo	86
Figura 44. Ensamble de brazo tronco	87
Figura 45. Ensamble cabeza tronco	87
Figura 46. Mecanismo para dar movimientos a la cabeza.....	88
Figura 47. a) Ensamble del tronco a la base b) Varilla que une la base con el tronco.....	89
Figura 48. Conexión de componentes electrónicos	90
Figura 49. Diagrama de flujo para la función detección de rostro.....	92
Figura 50. Diagrama de flujo de la función búsqueda.....	93
Figura 51. Radio mínimo de trabajo para la interacción con el niño.	97
Figura 52. Detección de rostro parte inferior.....	98
Figura 53. Detección de rostro parte superior.....	98
Figura 54. Detección de rostro Lado izquierdo	98
Figura 55. Detección de rostro perfil derecho	99
Figura 56. Detección de rostro perfil izquierdo	99
Figura 57. Resultado de la aceptación del robot por los niños	102
Figura 58. Resultado de la interacción entre el niño-robot	103
Figura 59. Resultado de la comodidad en la interacción niño robot	103

Figura 60. Resultados de la encuesta realizada a las terapeutas de la fundación
Virgen de la Merced..... 105

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar un prototipo de robot móvil interactivo para captar la atención de niños con trastorno del espectro autista. Los capítulos 1 y 2 hablan sobre los conceptos básicos de temas que conforman al proyecto y la teoría que interviene en el mismo: Contiene temas como la robótica en el aprendizaje de los niños con autismo, así como un diagnóstico biológico y cognitivo, para lograr una inclusión mediante la interacción niño-robot. El capítulo 3 se enfoca en el Diseño del robot, donde se involucra la parte mecánica que soporta los diferentes componentes electrónicos, el diseño de la parte electrónica y de control que conformará el prototipo. El capítulo 4 detalla la implementación del proceso equipo-máquina y sus componentes. Después de la implementación se realizaron pruebas funcionales del proceso interactivo entre niño-robot, donde se puede verificar que el robot cumple con los objetivos planteados. El análisis económico detalla el costo invertido en el cumplimiento de este proyecto. El documento finaliza con conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

PALABRAS CLAVES:

ROBOT INTERACTIVO.

AUTISMO.

ESTABILIZACIÓN DE VIDEO.

SEGUIMIENTO FACIAL.

ABSTRACT

The main goal of this work is to develop a prototype interactive mobile robot to capture the attention children with autism spectrum disorder. Chapters 1 and 2 talk about the basic concepts of themes that make up the project and the theory involved in it. It contains topics such as robotics in the learning of children with autism as well as a biological and cognitive diagnosis to turn an inclusion with the interaction between child-robot. Chapter 3 focuses on the design of the robot, which involves the mechanical part that supports the different electronic components, in turn enters into the design of the electronic part and control that will shape the prototype. Chapter 4 will detail the implementation of the machine equipment process and its components. After the implementation, functional tests were performed on the robot-child interaction process, where it can be verified that the robot meets the stated objectives. The economic analysis details the cost invested in fulfilling this project. The document concludes with conclusions and recommendations for future work.

KEYWORDS:

INTERACTIVE ROBOT.

AUTISM.

VIDEO STABILIZATION.

FACIAL TRACKING.

1. CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se indica la necesidad del desarrollo de un prototipo de robot móvil interactivo para captar la atención de niños con trastorno del espectro autista. De igual manera, se justifica el desarrollo e importancia del proyecto de titulación. Se define el objetivo general y los objetivos específicos. Por último, se presenta la metodología utilizada para la realización óptima del trabajo.

1.2. ANTECEDENTES

El trastorno del espectro autista es una condición de vida que requiere de atención psiquiátrica, neuropediátrica y sobre todo de apoyo familiar. Dicha condición daña la capacidad de cualquier persona para comunicarse y relacionarse con los demás, requiriendo tratamientos especializados. (Starmedia, 2017)

Para solventar los problemas, los científicos de Hertfordshire en Londres desarrollaron el proyecto “Kaspar” mostrado en la *Figura 1*. Se basa en un robot cubierto con placas de silicona que se asemejan a la piel humana, para que los niños con autismo se acostumbren a tocar a otras personas. El robot utiliza frases como: “hola mi nombre es Kaspar, juguemos juntos” y se ríe cuando le tocan los pies, alza y baja los brazos, entre otras funciones para llamar la atención de estos niños. (MUNDO, 2011)



Figura 1. Kaspar interactuando con niña autista

Fuente: (MUNDO, 2011)

En el país, la Universidad Politécnica Salesiana desarrolló el proyecto denominado “Siro”, mostrado en la *Figura 2*, por Jorge Galán y Diego Lima. El proyecto se construyó para apoyar a las terapias de niños autistas. Mediante tres modos de operación: el primer modo, funciona como interfaz que simula la interacción entre el terapeuta y el paciente con autismo. El segundo modo, consiste en una aplicación para el terapeuta, que contiene juegos para las sesiones de terapia. El tercer modo, consiste en una aplicación móvil para que los padres conozcan el avance de sus hijos. (PVI, 2016)



Figura 2. Estudiantes preparando a “Siro”

Fuente: (PVI, 2016)

La Universidad de las fuerzas Armadas-ESPE publicó un paper en la IEEE sobre una aplicación denominada “PCTOAPRENDE”. Es un software interactivo orientado a niños y jóvenes con trastorno del espectro autista, mediante el cual se mejora el proceso verbal en los mismos, y de cierta manera mejora la interacción con el medio. Cuenta con siete opciones mostrados en la *Figura 3*, que ayudan al aprendizaje de secuencias de uso cotidiano, frases comunes y básicas que expresan necesidades. Se enseña el manejo correcto de dígitos, además de sonidos que se asocian a los diferentes animales domésticos, y también la correcta pronunciación de vocales. Mediante un juego de lógica y memorización se enseña los números de emergencia, y primordialmente permite el envío de mensajes de texto y correo electrónico, expresando necesidades y posibles emergencias. (Johanna Tobar, 2015)



Figura 3. Menú principal de la aplicación PICTOAPRENDE

Fuente: (Johanna Tobar, 2015)

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La principal afección para los niños con trastorno del espectro autista, es la interacción con las personas de su entorno. Esta desafortunada condición trae consigo situaciones que perjudican, no solo a la parte psicológica por la falta de interés en interactuar con el alrededor, sino también a la pérdida de comunicación y comportamiento restringido y repetitivo, lo que hace que la sociedad los excluya laboral y socialmente. (CONADIS, 2016).

La ingeniería y la medicina concentran sus esfuerzos con el fin de encontrar una solución robusta, completa y eficiente, enfocada en las necesidades de los niños con este trastorno.

La interacción social representa una necesidad en los seres humanos; y a pesar de ejercer esta actividad diariamente, es importante tomar en cuenta cuales son los factores que despiertan dicho interés. Es por este motivo que se propone el presente proyecto, el cual pondrá en práctica actividades interactivas entre el robot y los niños con trastorno del espectro autista, permitiendo despertar el interés de relacionarse con las personas.

El desarrollo del proyecto está orientado en el proyecto KASPAR, basado en la simulación de personas y en la acción de repetir ciertas frases pregrabadas, permitiendo la interacción con el medio. Además se basa en el proyecto SIRO y

PICTOAPRENDE que le enseñan a los niños con trastorno del espectro autista a relacionarse mediante juegos.

El diseño y construcción del prototipo propuesto para el robot interactivo adquiere dichas cualidades, mejorándolo mediante al seguimiento facial y el aumento de frases pregrabadas. El robot se basará en el juego de las escondidas, realizando movimientos hasta captar el rostro del niño y pronunciando frases que despierten su interés de juego. Además aporta con el plan nacional del buen vivir, al mejorar la calidad de vida de la población.

El proyecto pretende aportar con el conocimiento tecnológico, mediante el desarrollo de un prototipo de robot interactivo para seguimiento basado en el juego de las escondidas, ofrecido a niños con un nivel de autismo leve y medio.

1.4. ALCANCE

1.4.1. Componentes mecánicos

En la *Figura 4*, se enlista los componentes mecánicos que intervienen en el proyecto.

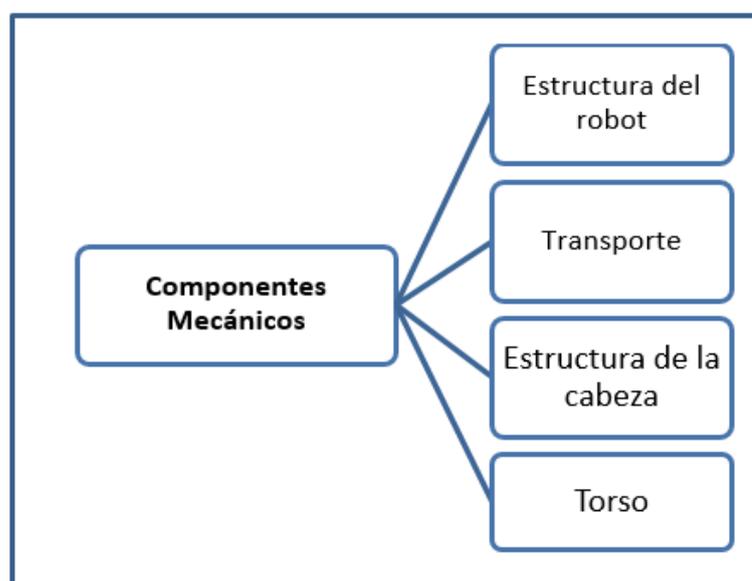


Figura 4. Esquema de Componentes Mecánicos

1.4.1.1. Estructura del robot

1.4.1.1.1. Características Técnicas

- Tipo de robot: robot híbrido

En la *Figura 5*, se puede apreciar los seis grados de libertad con los que cuenta el prototipo del robot interactivo.

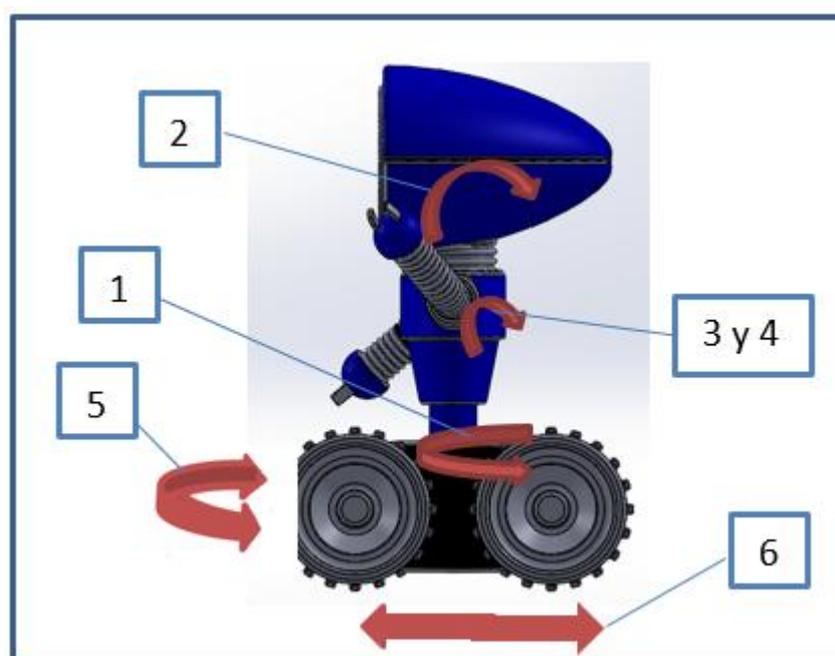


Figura 5. Robot híbrido

- 1 Primer GDL, torso giratorio a 300°.
- 2 Segundo GDL, el cuello gira 45° en forma vertical,
- 3 y 4 Tercer y cuarto GDL, giro 180° en forma vertical para cada brazo.
- 5 Quinto GDL, giro de 360° del robot sobre sus llantas hacia la derecha o hacia la izquierda.
- 6 Sexto GDL, las llantas permiten que el robot se transporte hacia adelante o hacia atrás.

1.4.1.2. Transporte

- Método de movimiento: Sobre llantas

La *Figura 6*, muestra el sistema de transporte con cuatro llantas formando parte de la base, disponiendo dos a cada lado para mayor estabilidad.

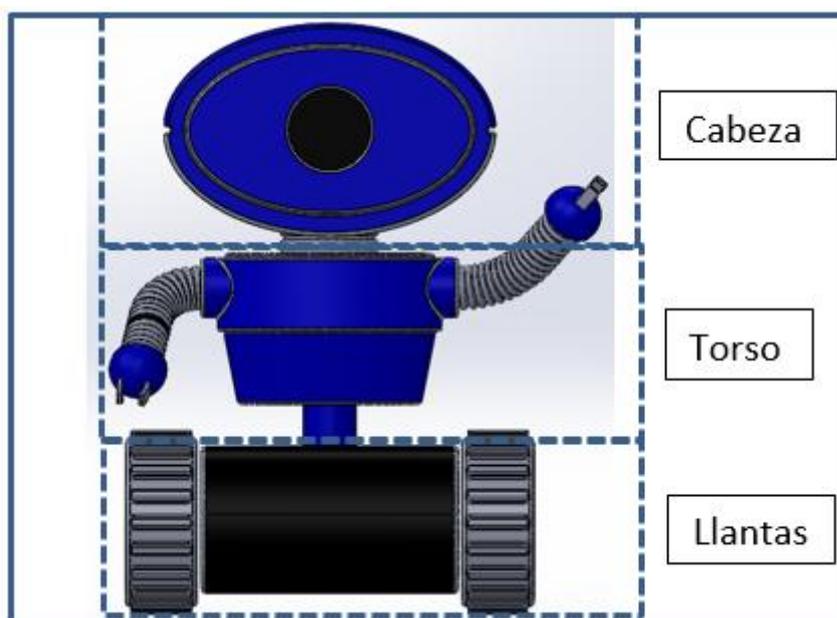


Figura 6. Vista Frontal del robot

1.4.1.3. Estructura de la cabeza

Para la estructura de la cabeza se utilizará, plástico PLA de impresión 3D, que otorga gran resistencia a golpes, además que es un material ligero y puede sujetarse con facilidad al servomotor mediante pernos. El material también tiene la capacidad de soportar el peso de la cámara y los componentes electrónicos que se requieran.

1.4.1.4. Estructura del torso

El material para la estructura será de aluminio ya que debe resistir el peso de la cabeza, además el torso será recubierto por PLA, para proteger a la tarjeta de control y los dispositivos electrónicos.

1.4.1.5. Dimensiones

Las dimensiones tentativas mostradas en la Figura 7 son:

- La altura total de 35 a 40 cm.
- La parte inferior un ancho y largo de 25 a 30 cm.
- la cabeza un diámetro de 5 a 6 cm con un largo de 10 cm.
- EL cuerpo diámetro de 15 a 18 cm.
- Los brazos un largo de 9 a 10 cm con un diámetro de 5 a 6 cm.

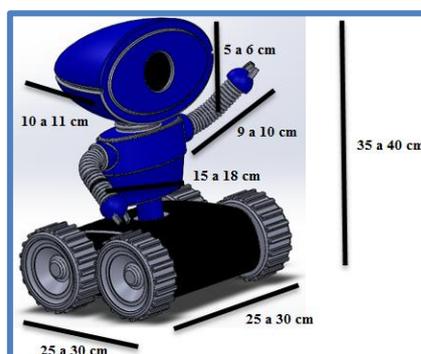


Figura 7. Medidas tentativas del diseño.

1.4.1.6. Evitar obstáculos

Se utilizará sensores de distancia para evitar choques contra obstáculos existentes en el medio, otra medida tentativa es el uso del método de navegación reactiva para lugares estrechos e intrincados, buscando que el robot sea autónomo mediante un conjunto de sensores permitiéndole razonar sobre su entorno, activando los actuadores hasta realizar la tarea encomendada.

1.4.1.7. Sonido

Se utilizará grabaciones de voz de una mujer debido a que en la mujer las cuerdas vocales son más reducidas que del hombre, ya que el sonido es aproximadamente una 8va superior que en voces masculinas lo que hace que el sonido sea más gratificante y agradable de escuchar.

Otra solución tentativa es el uso de una tarjeta Emic 2 text-to-speech Module mostrada en la Figura 8, que es un sintetizador de voz multi-idioma que convierte una corriente de texto digital en voz de sonido natural ya sea de niño, mujer u hombre.

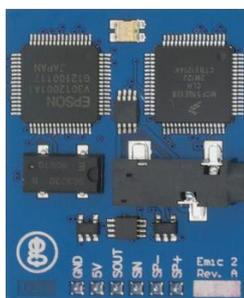


Figura 8. Emic 2 text-to-speech Module

Fuente: (RobotShop, 2017)

1.4.1.8. Seguimiento Facial (Lucas-Kanade)

Como medida tentativa se piensa utilizar el método Lucas-Kanade, que es un algoritmo que calcula el desplazamiento a partir de la variación del flujo óptico alrededor de una ventana, centrado en un pixel como se muestra en la Figura 9. (OpenCV, 2017)

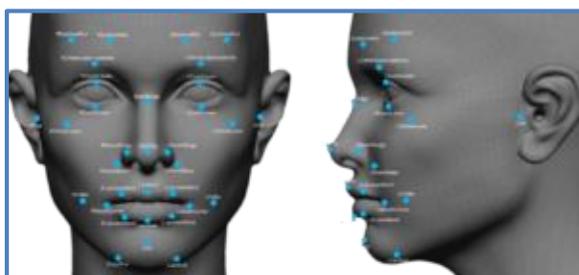


Figura 9. Método Lucas-Kanade

Fuente: (F. Abdat, 2010)

El proyecto se basará en el seguimiento facial del niño mediante el método Lucas-Kanade, ya que dicho método facilita trabajar en ambientes de alto contraste como lo será en el juego de las escondidas.

1.4.1.9. Selección de color

Se utilizará el color azul para la carcasa de la estructura debido que representa a los niños con trastorno del espectro autista, y a la vez significa serenidad. Conforme a las pruebas realizadas veremos a que color los niños despiertan mayor interés.

1.4.2. Componentes electrónicos/eléctricos

La Figura 10, enlista los componentes eléctricos/electrónicos que intervienen en el proyecto.

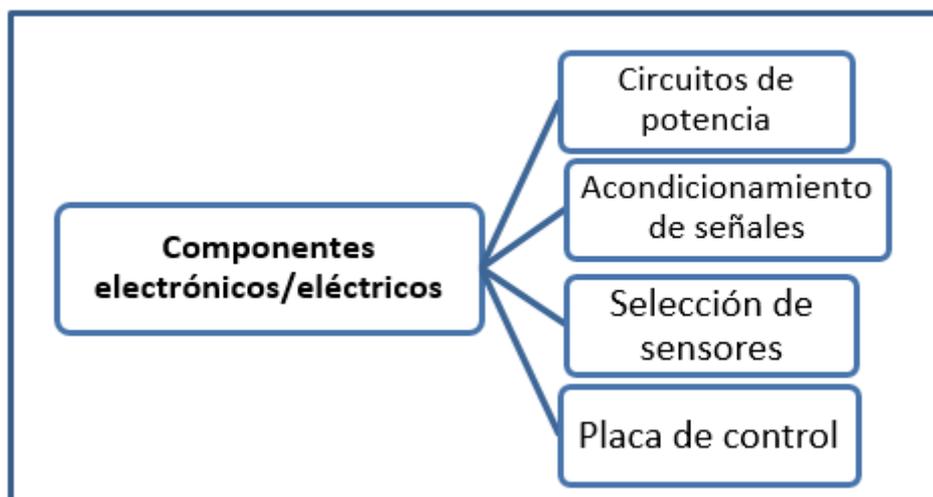


Figura 10. Esquema de componentes electrónicos/eléctricos

1.4.2.1. Circuitos de potencia

Se realizará circuitos de potencia para los actuadores (servos, motores a pasos, motores DC), que están dispuestos en el prototipo del robot. Para el diseño se tomará en cuenta características como velocidad y torque.

1.4.2.2. Acondicionamiento de señales

Constará con un circuito que elimine en gran porcentaje las interferencias exteriores como la luminancia, buscando que la imagen de la cámara sea estable, teniendo una luminosidad media para un correcto funcionamiento.

1.4.2.3. Selección de sensores

- Una cámara de profundidad será usada para la detección y seguimiento facial del niño.
- Como medida tentativa, sensores de proximidad indicarán si el niño se encuentra demasiado cerca.

1.4.2.4. Placa de control

Se realizará el diseño de una placa electrónica, que constará de interconexión entre los sensores y la comunicación con la tarjeta de control, que necesitará una velocidad sustentable para soportar el procesamiento de seguimiento facial, y una entrada de video para la cámara de profundidad, y después enviar mandos a los actuadores del prototipo del robot.

Se ha revisado los requerimientos y se necesita una velocidad de procesamiento aproximada de 1GHz, una memoria RAM de 1GB y capacidad de conectarse a una red inalámbrica para control remoto.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollo de un prototipo de robot móvil interactivo para captar la atención de niños con trastorno del espectro autista.

1.5.2. OBJETIVO ESPECIFICOS

- Realizar el diseño y construcción de la estructura mecánica de un prototipo de robot que permita captar la atención de niños con trastorno del espectro autista.
- Diseñar y ensamblar los circuitos eléctricos y electrónicos para la adquisición de datos de los sensores y el control del sistema propuesto.
- Verificar el funcionamiento y cumplimiento de parámetros interactivos del sistema.

2. CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se realiza una investigación de material bibliográfico sobre la robótica interactiva, enfocada en la implementación de robots como ayuda en el tratamiento a niños con autismo, mejorando en interacción social, comunicación y característica de comportamiento.

2.1. Robótica interactiva

El área colosal de la investigación en robótica ya no se limita a los laboratorios ubicados en universidades e instituciones de aprendizaje. Diversos tipos de robots están ganando terreno en nuestras vidas en una multitud de funciones, ya que los robots no están más restringidos a manipuladores pesados en una línea de fabricación. El rol creciente de los robots coincide con el único propósito de mejorar las vidas de las personas.

La población mundial se expande de forma exponencial cada año, lo que significa que aumenta de igual forma el número de personas con discapacidades. Como estas personas discapacitadas son parte de la sociedad en la que vivimos, es crucial que reciban la atención y la rehabilitación adecuada para que puedan vivir en lo posible una vida más cómoda y digna.

Los autores Syamimi Shamsuddin, Hanafiah Yussol y Salina Mohamed, en su trabajo titulado ***“Initial Response in HRI- a Case Study on Evaluation of Child with Autism Spectrum Disorders Interacting with a Humanoid Robot NAO”***, aseguran que el uso eficaz de la tecnología robótica para ayudar a los discapacitados tiene posibilidades prometedoras y efectivas ya que es motivador, preciso, objetivo y adaptable a las necesidades de las personas. Por lo tanto, la robótica como parte de las terapias desempeña un papel importante en las intervenciones de rehabilitaciones específicas para personas mayores y afectadas por trastornos del neurodesarrollo

como la parálisis cerebral (PC), y los trastornos del espectro autista (TEA). (Shamsuddin, Yussol, & Mohamed, 2012)

El presente trabajo de titulación, está enfocado a desarrollar un prototipo de robot interactivo, con el objetivo que capte la atención de niños con TEA mediante juegos y frases, mejorando así sus habilidades de comunicación y su comportamiento con otras personas; el prototipo será la base de futuras investigaciones para el desarrollo de robots interactivos, los cuales contarán con diferentes habilidades para ayudar en cada etapa en el tratamiento del autismo.

Interacción Humano-Robot (HRI)

La interacción humano-robot (HRI) (Human-Robotic interaction) es un campo nuevo y prometedor que ha estado ganando un creciente interés por parte de los investigadores en el campo de la robótica autónoma, así como en la interacción humano-computadora. Las aplicaciones de robot de servicio tal como, la entrega de alimentos en hospitales, cortar el césped o aspirar pisos, llevan a robots autónomos a entornos compartidos con personas. Sin embargo, las funciones de interacción humano-robot en estas tareas aún se encuentran en un nivel mínimo.

La interacción social humano-robot juega un papel importante en la difusión del uso del robot en la vida cotidiana de los seres humanos. En el curso de la interacción social efectiva, los robots podrán realizar muchas tareas en la sociedad humana, las cuales pueden proporcionar atención médica a personas mayores, ayudar a personas con discapacidades motrices o cognitivas, entretenimiento educativo, asistencia personal, dar indicaciones en puntos de información en lugares públicos, y mucho más. De los estudios realizados e implementados en el desarrollo de prototipos de robots interactivos para la ayuda en terapias del TEA, se ha realizado una caracterización bibliográfica de los robots interactivos, en el tratamiento del autismo en aspectos importantes como:

Apariencia física del robot interactivo

Tanto Kerstin Dautenhahn y F. Michaud, en sus publicaciones **“KASPAR- A Minimally Expressive Humanoid Robot for Human-Robot Interaction Research”** y **“Assistive Technologies and Children-Robot Interaction - TITO”** respectivamente, definen que la apariencia del robot debe tener una apariencia similar a la humana. KASPAR fue usado como esquema piloto en niños con autismo donde aprendieron a hacer preguntas mediante él. KASPAR fue operado por otro niño que dio la respuesta a través de expresiones faciales como se muestra en la Figura 11 (Dautenhahn, Nehaniv, Walters, & otros, 2009). Tito tiene dos brazos que pueden moverse hacia arriba y hacia abajo rápidamente, la cabeza que puede rotar (para indicar que “no”) y levantarla (para expresar sorpresa), una boca (para sonreír), dos ojos, una nariz y cabello (hechos de fibra óptica para iluminar) como se muestra en la Figura 12 (Michaud, Salter, Duquette, & Mercier, 2006). Tito fue diseñado para estudiar el comportamiento impredecible de los niños con autismo y como el robot móvil al ser predecible, atractivo y simple, facilita la interacción recíproca mediante la imitación. Los robots móviles muestran potencial al poder diseñarse de acuerdo a intereses particulares y a los déficits de los niños con autismo. Generan más interés y una variedad de situaciones de interacción en comparación con objetos estáticos, y ponen en juego habilidades de interacción social (contacto visual e imitación).



Figura 11. Prototipo de robot interactivo (KASPAR)

Fuente: (Dautenhahn, Nehaniv, Walters, & otros, 2009)



Figura 12. Robot interactivo “Tito”

Fuente: (Michaud, Salter, Duquette, & Mercier, 2006)

Estructura Mecánica

Los autores Hideki Kozima y Cocoro Nakagawa, en su publicación **“Interactive Robots as Facilitators of Children’s Social Development”**, para la realización del robot “Keepon”, utilizaron cuatro motores alimentando cuatro grados de libertad, que permiten que su cuerpo se incline de lado a lado y hacia abajo y se mueva o gire sobre su base (Figura 13). Los investigadores determinaron que estas cuatro acciones son suficientes para expresar la atención al orientarse hacia un objeto o una persona, así como la felicidad (balancearse hacia adelante y hacia atrás), excitación (balancearse hacia arriba y hacia abajo) y miedo (temblor). Los autores indican que los robots utilizados en investigaciones de la terapia del autismo tienen cierta capacidad de movimiento, que con frecuencia implica la manipulación de partes del cuerpo como brazos y cabeza, pero muchos se fijan en un soporte o mesa, difícilmente están equipados con la capacidad de caminar o rodar por su entorno. (Kozima & Nakagawa, 2006)

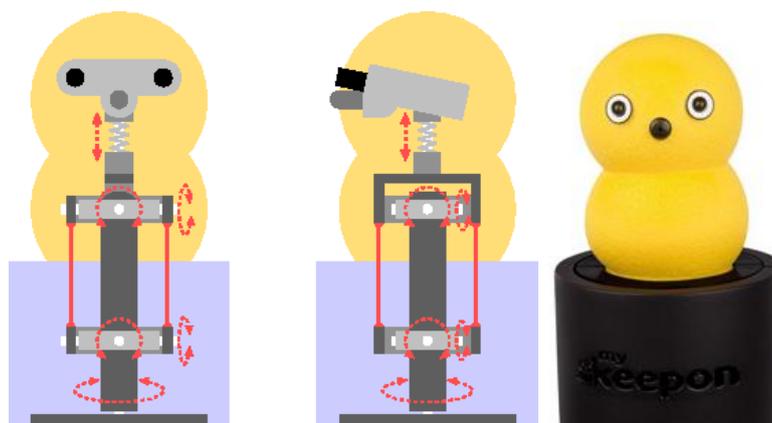


Figura 13. Estructura Mecánica del robot interactivo “Keepon”

Fuente: (Kozima & Nakagawa, 2006)

Los autores Aude Billard, Ben Robins, Jacqueline Nadely y Kerstin Dauten, en su publicación *“Building Robota, a Mini-Humanoid Robot for the Rehabilitation of Children with Autism”*, en el desarrollo del robot “Robota”, cuenta con 5 grados de libertad (GDL), 1 GDL por cada pierna, brazo y cabeza, como se muestra en la Figura 14. Los motores de CC con una relación de transmisión de 1:6 manejan los 5 GDL, proporcionando una par continuo máximo de aproximadamente 90 mNm. Los estudios con Robota tiene como objetivos: probar sistemáticamente la reacción de los niños con autismo de bajo rendimiento y evaluar hasta qué punto son capaces de distinguir entre las percepciones de sus propios actos y las percepciones que son el resultado de las acciones de los demás. (Billard, Nadely, & Dauten, 2006)



Figura 14. Robota, muñeca humanoide para la interacción Humano-Robot

Fuente: (Billard, Nadely, & Dauten, 2006)

Los componentes electrónicos de Robota Consisten en una placa de motor y una placa de sensor. La placa del motor se enruta a través de una interfaz en serie RS232 de una PC o un PocketPC. La placa del sensor se enruta a través de una interfaz de serie SPI (interfaz de periféricos seriales), se muestra el detalle de sus componentes en la *Tabla 1*.

Tabla 1

Componentes electrónicos utilizados en “Robota”

Height	45cm
Width	14cm
Weight	~1500g.
Degrees of Freedom:	Head rotation, raising and lowering the left/right arm or left/right leg, coordinated motion of the two eyes (sideway) and individual motion of each eye (blinking)
Actuators	DC Motors (Maxon A-max 26 mm) with clutches and position potentiometers
Microprocessors Motor Card	PIC - 16F870, 4MHz
Microprocessors SensorCard	PIC - 16F84, 16MHz
CPU	PocketPC Compaq
Sensors	Switches (x6), infra-red emitter/receptor (x2), inclinometer (x1), buzzer (x1)
Battery	7.2V, 6x1.2NiCd
Running Time:	~30 minutes
Power supply	12V, 4A.

Fuente: (Billard, Nadely, & Dauten, 2006)

A continuación se presenta la *Tabla 2*, en la cual se describe los resultados obtenidos en los robots mencionados anteriormente.

Tabla 2

Tabla comparativa de robots interactivos aplicados al autismo

Nombre del Robot	Descripción	Metodología	Resultados
KASPAR	Su apariencia humana tiene como objetivo que se genere confianza entre el robot y el niño con TEA. Sin embargo sus movimientos son limitados.	Da respuestas a preguntas específicas mediante expresiones faciales.	Alentar cada actividad hizo que el niño este en búsqueda de más recompensas en el 67% de los casos. No alentarlas provoco un movimiento aleatorio y no interactivo
TITO	Tiene una apariencia amigable con movimientos articulares similares a los humanos.	Facilitar la interacción reciproca mediante la imitación.	Reducción de juegos repetitivos con objetos de interés inanimados (su juguete favorito) y sin comportamiento repetitivo o estereotipado hacia el robot. Su atención se centra en el robot en lugar del objeto inanimado
KEEPON	Cuenta con 4 grados de libertad permitiéndole gran variedad de movimientos	Expresa emociones mediante movimientos corporales.	Los niños, incluso aquellos con dificultades en la comunicación interpersonal, se acercaron a Keepon con un sentido de curiosidad y seguridad
ROBOTA	Cuenta con 5 grados de libertad. Sin embargo sus movimientos son muy simples	Realiza movimientos predeterminados para evaluar la percepción del comportamiento del niño mediante el juego de la imitación.	2 de cada 10 niños (de 7 a 9 años), comprendieron inmediatamente que sus propios movimientos estaban en el origen de ROBOTS. Otros cinco reconocieron que los imitaron después de repetidas sesiones y dos persistieron en los intentos de mover directamente los brazos de ROBOTA con sus manos.

Comportamiento del robot

En la publicación de los autores Ronald Arkin y Lilia Moshkina, titulado **“Affect in Human-Robot Interaction”** mencionan que existen dos modelos de sistemas de arquitecturas robóticas: El marco TAME, que significa Rasgos, Actitudes, Sentimientos y Emociones y la arquitectura DIARC, que significa Cognición y Reflexión de Afecto Integrado Distribuido. Aunque estos dos sistemas difieren en una serie de aspectos importantes, ambos enfatizan la inclusión del afecto como parte

integral de una arquitectura robótica, y su objetivo es facilitar la interacción humano robot. (Arkin & Moshkina, 2013)

El marco TAME es una plataforma independiente y puede trabajar con gran variedad de arquitecturas de robot, describe además estímulos como parte de la entrada perceptiva, e información del estado interno del robot como el nivel de batería y las condiciones ambientales (niveles de luz y ruido), el sistema TAME produce intensidades de afecto apropiadas a la situación, que a su vez modifican los comportamientos de las tareas activas a través de ajuste de parámetros mostrados en la Figura 15.

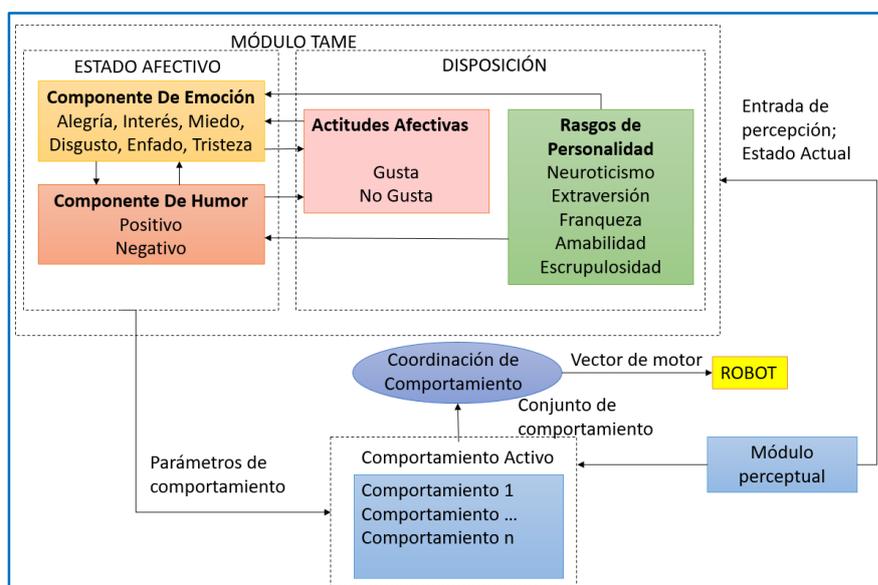


Figura 15. Vista conceptual del sistema TAME (modificador de comportamiento)

Fuente: (Arkin & Moshkina, 2013)

2.1.1. Características funcionales

Un marco general con respecto a los actores que pueden influir en la confianza es proporcionado por Kristin Oleson, Deborah Billings y sus colaboradores en su publicación ***“The Influence of a Robot’s Embodiment on Trust: A Longitudinal Study”*** mencionan que hay tres categorías principales, los antecedentes relacionados con robots, antecedentes relacionados con los seres humanos y los antecedentes relacionados con el miedo ambiente. Aunque los factores relacionados con el robot

(apariencia del robot, estructura mecánica, comportamiento del robot) tienen el mayor impacto en la confianza en HRI, sigue siendo importante investigar los factores relacionados con el ser humano y el medio ambiente, además de actitudes / nivel de confort con robots. El análisis desde una perspectiva centrada en el ser humano es necesario para comprender que se requiere para desarrollar un **robot socialmente aceptable**. Debe tenerse en cuenta que existe una distinción de confianza durante la interacción humano-humano y la interacción humano-robot, ya que solo una de las dos partes es capaz de sentir confianza en esta última. Esto podría dar lugar a resultados diferentes a los encontrados en la interacción humano-humano. (Oleson, Billings, & Otros, 2011)

Para que la interacción humano-robot sea exitosa, especialmente cuando los robots interactivos se utilizan como robots de cuidado (por ejemplo, cuidado de ancianos, niños con TEA), se requiere cierto nivel de confianza, ya que la confianza afecta directamente el resultado de una interacción entre humanos y un robot como lo mencionan Deborah Billings, Jessie Chen y Peter Hancock en su publicación **“Human-Robot Interaction: Developing Trust in Robots”**. Un nivel desproporcionado de confianza puede tener consecuencias negativas, como el mal uso o el desuso del robot. El mal uso ocurre cuando se confía demasiado a un robot y se espera que haga más de lo que es capaz de hacer. Desuso es el fenómeno en el que un robot no es lo suficientemente confiable y en consecuencia, no se utiliza. (Billings, Chan, & Hancock, 2012)

2.1.2. Clasificación de los robots

Según Cynthia Breazeal en su publicación **“Social Interactions in HRI: The Robot View”** se puede clasificar en el campo del HRI en cuatro paradigmas de interacción, cada uno se distingue del otro basado en el modelo mental que tiene un robot cuando interactúa con él. (Breazeal, 2003) .Estos son:

2.1.2.1. Robot como herramienta

El humano ve al robot como una herramienta que es usada para realizar una tarea. La cantidad de autonomía del robot(carga cognitiva aplicada al operador humano,) varía desde la teleoperación completa hasta un sistema altamente autosuficiente que solo necesita supervisión en el nivel de tarea.

2.1.2.2. Robot como extensión de ciborg

El robot es físicamente fusionado con el humano en la medida que la persona lo acepte como una parte integral de su cuerpo. Por ejemplo, la persona vería la extirpación de su pierna robótica como una amputación que la deja parcialmente completa.

2.1.2.3. Robot como avatar

La persona se proyecta asimismo mediante el robot a fin de comunicarse con otro desde lejos, es la mejor alternativa para estar allí. El robot provee una sensación de presencia física para la comunicación de la persona mediante él.

2.1.2.4. Robot como compañero sociable

El ultimo paradigma habla de la fantasía clásica de la ciencia ficción de un ser artificial. Interactuar con él es como interactuar con otra creatura socialmente responsable que coopera con nosotros como un compañero.

2.1.3. Aplicaciones de robots interactivos

2.1.3.1. Búsqueda y rescate

El área de investigación de los robots interactivos de más alto perfil en los Estados Unidos es un fuerte ejemplo de trabajo con un impacto social importante, así lo indica J. Casper y R. R. Murphy en su publicación ***“Human-robot interactions***

during the robotassisted urban search and rescue response at the World Trade Center". Esta área es de búsqueda y rescate urbano USAR (urban, search and rescue), y es ejemplificada con el uso de robots en los esfuerzos de rescate y recuperación después del colapso de los edificios del World Trade Center. Liderado por un gobierno pionero y sus esfuerzos académicos. USAR se ha convertido en una de las áreas más importante de HRI. (Casper & Murphy, 2003)

2.1.3.2. Robótica Asistencial y Educativa

La robótica asistida es quizá una de las áreas de mayor perfil de los robots interactivos en el mundo. Este dominio suele situar al robot en parecerse a un compañero o tener el rol de mentor con el humano aunque la intención del robot está diseñada para proporcionar servicio al humano. Para algunas personas con desafíos físicos y mentales, los robots pueden proporcionar una oportunidad para la interacción y la terapia. Tal trabajo se está explorando con niños autistas como lo mencionan B. Robins, P. Dickerson, P. Stribling y K. Dautenhahn en su publicación ***"Robot-mediated joint attention in children with autism: A case study in robot-human interaction"***. Muchos de estos niños responden débilmente o no responden bien a las señales sociales, pero responden bien a los dispositivos mecánicos. Los robots proporcionan un posible papel terapéutico para mejorar las interacciones sociales. (Robins, Dickerson, Stribling, & Dautenhahn, 2004)

2.1.3.3. Entretenimiento

La robótica enfocada al entretenimiento a menudo se puede encontrar en películas antiguas y parques temáticos; sin embargo, la exposición AICHI 2005 demostró varios robots diseñados para entretener, incluido el uso de robots como actores y compañeros de baile (AICHI, 2005). Otras investigaciones relacionadas con el HRI en el uso de robots para el entretenimiento incluyen narradores robóticos (Montemayor, Alborizi, Hendeler, Pollack, & Porteous, 2000) plantas robóticas que brindan a los usuarios información como correo electrónico entrante (Jacobs, 2003) y mascotas robóticas. (Fong & Nourbakhsh, 2003)

2.2. Autismo en los niños

El trastorno del espectro autista (TEA) es una colección de discapacidades que comparten rasgos similares. Estas discapacidades giran en torno a la “triada de impedimentos” que son: el déficit en interacción social, comunicación y características de comportamiento. El desorden de comportamiento está marcado por actividad e intereses restringidos, repetitivos y estereotipados. En 1943, Leo Kanner M.D. según su publicación **“Autistic disturbances of affective contact”**, fue el primero en identificar a un grupo de niños que poseen características de repulsión extrema y discapacidad en la formación de las relaciones sociales habituales con las personas. Él refirió esta condición como “autismo infantil temprano”. El TEA se manifiesta durante los primeros tres años de la vida de un niño. Se deriva de un trastorno del neurodesarrollo que da como resultado la función cerebral afectada; las habilidades de una persona en la comunicación y habilidades de interacción social se ven seriamente afectadas también. Un niño con TEA a menudo tiene dificultades para relacionarse con sus compañeros ya que carece de reciprocidad social o emocional. Cada individuo con TEA es único ya que no hay dos personas con TEA que posean las mismas características autistas. Por un extremo del autismo, los niños pueden tener un aparente déficit en lo social y en la comunicación y ser mentalmente discapacitados. Por el otro extremo del autismo, con la ayuda de terapias, un niño puede tener la capacidad de hacer matemáticas o escribir, pero aun así, no poder mantener contacto visual o participar en una conversación. El rango completo se denomina Trastornos de desarrollo generalizados (TDG). (Kanner, 1943)

La prevalencia del TEA en los países del mundo, es comprensible la necesidad de una intervención efectiva para este tipo trastornos. Esta es la razón por la cual para los niños pequeños con TEA, cuanto antes comiencen a obtener ayuda, más oportunidades serán accesibles para ellos.

Actualmente no hay cura para el autismo, aunque los tratamientos conductuales pueden mejorar la calidad de vida y la independencia. La intervención temprana es crítica para un resultado positivo a largo plazo, muchas personas

necesitan altos niveles de apoyo durante toda su vida. Dichos tratamientos incluyen el análisis del comportamiento aplicado en el que se fomenta comportamientos positivos y se desalientan comportamientos negativos para mejorar las habilidades sociales y comunicativas. Otros enfoques se centran en la utilización de los socios no humanos para facilitar la interacción social humano-humano.

2.2.1. El Desafío de educar a los niños con autismo

Los principales desafíos, según Matasio Mwendo en su publicación ***“Inclusive Education for Children with Autism; Challenges facing Teachers at City Primary School, Nairobi Province, Kenya”***, enfocados en su educación, son: la capacitación de los docentes, las actitudes negativas de los compañeros, la falta de suficientes recursos educativos, la gran expectativa de los padres y el tiempo asignado a los alumnos por clase. (Mwendo, 2011)

- Los niños con autismo también experimentan problemas de cambios de humor, berrinches y comportamientos rituales que interfieren con el proceso de aprendizaje de la enseñanza y hay momentos en que resulta imposible enseñar en tales circunstancias. Algunos niños con autismo tienen un lapso de atención corto, lo que puede arrastrar a toda la clase.
- La falta de directrices de políticas claras sobre la implementación de la educación inclusiva es vista como un desafío, ya que la mayoría de los maestros no tienen la suficiente capacitación para implementar la educación inclusiva.
- Las actitudes negativas de los compañeros (aprendices regulares), que desprecian a sus compañeros autistas al ser los primeros en notar sus discapacidades.
- Los padres en la mayoría de casos no son flexibles a los cambios y niegan la condición de sus hijos, por lo tanto, no aceptan las dificultades de

aprendizaje de sus hijos. Algunos padres suelen tener una actitud negativa sobre la educación inclusiva que les ofrezca a sus hijos a permanecer en una unidad especial para el autismo.

2.3. La robótica en el aprendizaje de niños con autismo

Brogaard Bertel y Christiansen, sugieren en su publicación ***“Robot technologies, autism and designs for learning”***, que el diseño participativo puede contribuir a la robótica social y la investigación HRI, ya que abre las formas en que el tiempo, el espacio y la estructura se vuelven predefinidos. Además sugieren que es importante incluir a los usuarios reales y co-diseñadores de robot, robot-aprendizaje y diseño robodidáctico ya que aparecen a través de las prácticas educativas cotidianas. En un entorno real, las relaciones que pueden surgir son mucho más contextualmente múltiples y están interrelacionadas de manera compleja con aspectos tales como conocimiento, relaciones, valores educativos, intereses heterogéneos de estudiantes y docentes, precondiciones para la enseñanza y el aprendizaje, etc. Por lo tanto, se distribuye a través del “entorno educativo” y la “situación educativa” de los estudiantes con trastorno del espectro autista que se espera que aprendan con tecnologías de robots. Además, los mismos autores apuntan a la necesidad de incluir no solo la perspectiva, sino también la actividad participación de los profesionales destinados a desarrollar, comprometer y legitimar compromisos con tecnologías de robot en las actividades educativas. A esto, se agregaría la importancia de incluir las perspectivas y la participación activa de los estudiantes, sus intereses, compromisos, aspiraciones, etc. (Bertel & Christiansen, 2015)

Se enfatiza la importancia de tener un conocimiento de los diferentes enfoques en tecnologías de robots como tecnologías educativas en niños con autismo: un enfoque es desarrollar robots sociales para la capacitación en educación y otra para desarrollar capacidades educativas para comprometerse con tecnologías de robots que se centran en la alfabetización tecnológica y aprendizaje innovador y creativo en educación.

2.4. Diagnóstico

El diagnóstico del autismo y los trastornos relacionados con el espectro autista en los niños pequeños según C. Lord y E. Schopler en su publicación **“Stability of assessment results of autistic and non-autistic language-impaired children from preschool years to early school age”**, menciona que a menudo es relativamente sencillo, pero a veces puede ser un desafío. Las complejidades en el diagnóstico y la evaluación se relacionan con el rango de expresión del síndrome en estas condiciones a lo largo de varias dimensiones tales como las habilidades del lenguaje y la discapacidad mental asociada, el diagnóstico diferencial, particularmente en niños menores a los 3 años, las preocupaciones relativas al etiquetado y la terminología diagnóstica dentro de los sistemas escolares además la falta de experiencia en evaluación y diagnóstico entre algunos profesionales de la educación. (Lord & Schopler, 1989).

2.4.1. Nivel Biológico

Varios estudios que comparan niños con autismo y niños con otros trastornos del desarrollo han concluido que el perfil prototípico del desarrollo de los niños con autismo es una de las habilidades motoras que son relativamente más avanzadas que las habilidades sociales como lo detalla Martos Perez y M. Sevilla en su publicación **“Psychological assessment of adolescents and adults with autism”**. La coordinación temprana mano-ojo predijo significativamente las habilidades vocacionales posteriores y el funcionamiento independiente, mientras que las primeras habilidades motrices finas predijeron habilidades posteriores de ocio. (Perez & Sevilla, 1993)

2.4.1.1. Tono muscular y estabilidad postural

Aunque un estudio de V. Jones y M. Prior en su publicación **“Motor imitation abilities and neurological signs in autistic children”**, no indican diferencias entre niños mayores con autismo y niños típicos de edad mental, los niños con autismo se

califican según la retroalimentación propioceptiva sobre la retroalimentación visual para modular las acciones motrices dirigidas a un objetivo, incluyendo alcanzar y colocar objetos en condiciones que requirieran adaptación al desplazamiento de un campo visual mediante prismas. Con este procedimiento se podría determinar un déficit perceptivo que da como resultado un control visual deficiente y un procesamiento secuencial visual. Aunque los mecanismos vestibulares pueden estar generalmente intactos y las respuestas posturales adecuadas en algunas condiciones, los mecanismos posturales pueden estar más comprometidos en los niños con autismo cuando se requiere la integración de las funciones visual-propioceptivas, vestibulares y habilidades motrices. (Jones & Prior, 1985).

2.4.1.2. Prevalencia de respuestas sensoriales atípicas y estereotipias motoras

Los exámenes de comportamiento estandarizados de J. Ermer y W. Dunn en su publicación ***“The sensory profile: A discriminant analysis of children with and without disabilities”*** demostraron que la gran mayoría de los niños con trastornos del espectro autista presentaban conductas sensitivas motrices atípicas en algún momento durante los primeros pasos del niño o los años de preescolar, incluyendo sensibilidades elevadas o menor capacidad de respuesta a través de las modalidades sensoriales y disturbios de motilidad tales como estereotipias. Los comportamientos sensoriales y motores inusuales incluidos, no limitaron la respuesta a los sonidos. (Ermer & Dunn, 1998).

2.4.2. Nivel cognitivo

Los primeros estudios M. Prior y S. Ozonof sobre el desarrollo del autismo se centraron en las capacidades básicas de percepción y habilidades sensoriales en su publicación ***“Psychological Factors in Autism”***. Aunque los niños con trastornos del espectro autista parecen poder percibir estímulos sensoriales, sus respuestas a tales estímulos pueden ser anormales. Por ejemplo, la prueba auditiva de tallo cerebral puede probar que la vía auditiva periférica está intacta, aunque la respuesta del comportamiento del niño a los estímulos auditivos es anormal. En bebés y niños muy

pequeños, el uso de escalas de desarrollo infantil es algo limitado, ya que estas pruebas tienen, en general, un valor relativamente menos predictivo para la inteligencia subsiguiente. De hecho, la naturaleza de la “inteligencia” en este periodo puede ser cualitativamente diferente que en años posteriores. (Prior & Ozonoff, 1998)

2.5. Inclusión

Debido a que todos los programas tienen un objetivo primordial de promover el funcionamiento independiente a largo plazo de los niños en la comunidad, todos reconocen la inclusión de los niños con trastornos del espectro autista en clases con los niños típicos como un resultado deseado a largo plazo. Las principales diferencias afirman Strain y F. Kohler en su publicación ***“Inclusion of children with autism in early intervention settings: An examination of rationale, myths and procedures”***, se centran si el programa adopta una posición de “preparación”, la cual supone que se requieran ciertas habilidades que son necesarias para niños con trastornos del espectro autista se beneficien de la inclusión, o en una posición en la que las habilidades sociales tempranas se desarrollan más fácilmente cuando los niños se incluyen con niños típicos desde el inicio de la intervención. (Strain & Kohler, 2001)

- El modelo de intervención de desarrollo y el proyecto de autismo joven tienden a incluir niños exitosos con autismo con pares típicos cerca del final de su periodo de intervención temprana. (Greenspan & Wieder, 1997)
- El modelo de respuestas pivotal adopta la posición de que la inclusión se logra más fácilmente cuando los niños están en precolar porque este es el periodo en que las demandas académicas son más bajas. (Koegel, 1999)
- El juego se considera como parte principal en las actividades de enseñanza, también es intrínseca a los modelos que usan principalmente enseñanza incidental u otros procedimientos de instrucción naturalistas (es decir, programas de apoyo individualizado), e incluso los programas tienden a jugar creativamente o interactuar con los compañeros. (Rogers & Lewis, 1989)

2.5.1. HRI para niños con TEA

El primer esfuerzo del uso de robots para la terapia del autismo fue realizado en 1976 por la pediatra Sylvia Weir y el psicoterapeuta Ricky Emanuel con un robot LOGO de la tortuga móvil para su publicación ***“Using LOGO to catalyse communication in an autistic child”***, en la Universidad de Edimburgo. No se identificaron otros avances significativos en un contexto similar hasta fines de la década de 1990. A medida que la tasa de prevalencia del autismo continúa aumentando, más laboratorios de investigación también han comenzado a explorar las posibilidades de emplear robots para ser parte de las terapias para niños con TEA. Se sabe que estos niños se sienten atraídos por objetos tecnológicos, es decir, computadoras, artefactos y robots. Por otro lado, el robot en sí es mucho más simple en apariencia que los objetos de la vida real, su comportamiento puede personalizarse para adaptarse a diferentes escenarios, y tiene la capacidad de ofrecer una interacción más simple con los niños (Emanuel & Weir, 1976). Estos dos factores complementarios hacen que los robots sean el medio ideal para ser utilizados en la terapia basada en robots para las personas con TEA, este método continúa siendo adoptado para fortalecer las habilidades sociales, las habilidades de comunicación, promover el comportamiento exploratorio y el diagnóstico temprano entre los niños con autismo. La arquitectura de interacción humano-robot (HRI) tiene un gran potencial para enseñar a los niños con TEA como detectar y comprender las emociones y los comportamientos sociales. De hecho, los robots pueden provocar respuestas interactivas y sociales que no ocurren naturalmente en niños con TEA. (Scassellati, 2005)

Asociados con su déficit en habilidades sociales y de comunicación, los niños con TEA a menudo se ven afectados por la depresión y la ansiedad cuando interactúan con otros compañeros, debido a la imprevisibilidad y complejidad de los comportamientos humanos. Por otro lado, los juguetes comunes no pueden provocar respuestas o participar en escenarios de juego con los niños con TEA. Por lo tanto, la autonomía controlable de los robots ofrece lo mejor de ambos mundos y resulta

con los robots como compañeros sociales propicios para estos niños con discapacidad. (Adams & Robinson, 2011).

3. CAPÍTULO III

DISEÑO DEL ROBOT INTERACTIVO

El presente capítulo tendrá como objetivo, realizar un análisis cinemático seguido de la identificación del diseño mecánico CAD del prototipo de robot interactivo, acorde a las especificaciones e información recopilada en el transcurso del desarrollo de la tesis.

A partir de esta información conceptual con sus requisitos y arquitectura, el diseño mecánico detallado con la selección de actuadores y materiales para la construcción, así como el diseño electrónico y elementos de control.

3.1 Análisis cinemático del robot interactivo móvil

Se plantea realizar un análisis cinemático del robot interactivo móvil, debido a que las articulaciones del robot no estarán sometidas a velocidades elevadas ni van a realizar levantamientos de objetos. Solo realizarán con propósito práctico.

Al plantear un análisis cinemático las velocidades no deben ser mayores a 100 rpm, además no se debe realizar trabajos de levantamientos de cargas, ya que esto le lleva a someterse a esfuerzos.

El robot consta de la realización de 9 movimientos de sus partes con el fin de captar la atención de los niños con trastorno del espectro autista, además que sea agradable y que sus movimientos se asemejen a los de un humano.

Se plantea el cálculo de torques necesarios, para la selección de los actuadores que cumplan con las características óptimas, siendo capaces de realizar las acciones descritas.

Si en un punto de un cuerpo se le aplica una fuerza cualquiera que fuere, y la propiedad de esta fuerza se la mide como una magnitud física se la llama momento de fuerza o comúnmente descrita como torque. Entonces el momento de fuerza o torque, no es más que hacer girar un cuerpo respecto a un punto, aplicando una o varias fuerzas.

Matemáticamente el momento de fuerza o torque es igual al producto de la fuerza respecto a la distancia perpendicular, desde el punto donde se la aplica, hasta el eje o punto de giro:

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

El torque es directamente proporcional a: la distancia, la fuerza y el ángulo en que se aplica dicha fuerza, como torque máximo tendremos cuando el ángulo es 90° , y no tendremos torque o torque nulo cuando el ángulo es 0° .

$$\tau = F * d * \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

Para la convención de signos se utiliza la norma general regularizada internacionalmente que describe, que si el torque se genera en sentido anti horario es positivo y negativo si está en sentido horario.

En ocasiones no solo tenemos un solo torque actuando, sino pueden estar actuando varios al mismo tiempo, y si se va analizar la acción que estos momentos de fuerzas realizan sobre un mismo punto de giro, se plantea la teoría de torque neto. Que es la suma de todos estos momentos de fuerza.

$$\tau_{neto} = \sum \tau \quad (3)$$

$$\tau_{neto} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n$$

En el momento de fuerza existe un análogo a la segunda ley de Newton (" la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza que se le aplica e

inversamente proporcional a la masa del cuerpo”), que describe: un momento de fuerza ocasiona una aceleración angular respecto de un eje de giro directamente proporcional y a su vez es inversamente proporcional a la inercia I .

Con fines explicativos se trabaja con las partículas que giran en los extremos ocasionadas por fuerzas tangenciales, tiene una aceleración tangencial descrita por:

$$\sum F_t = m * a_t \quad (4)$$

Multiplicando la distancia entre la partícula y el centro de giro tenemos:

$$\begin{aligned} \sum \tau &= \sum F_t * r & (5) \\ \sum \tau &= m * a_t * r = m(r\alpha)r = mr^2\alpha \end{aligned}$$

Se sabe que $mr^2 = I$, haciendo el cambio de variable, se tiene que:

$$\sum \tau = I\alpha \quad (6)$$

El momento de inercia juega el mismo papel que la masa variando desde un movimiento traslacional a un movimiento rotacional.

3.2 Diseño conceptual

Se plantea la realización del diseño conceptual del prototipo del robot móvil para seguimiento de niños con trastorno del espectro autista, el cual surge de un planteamiento inicial mostrado en el perfil de la problemática, a partir de información recopilada con personas profesionales en el tema, se cambió el diseño acorde a las necesidades planteadas. Basados en este detalle, se realiza el desarrollo de la arquitectura general del prototipo del robot interactivo y la descripción de la normatividad a implementar, presentando en la Tabla 3.

Tabla 3*Requerimientos del prototipo de exoesqueleto*

Requerimientos	
Diseño mecánico	Material ligero
	Resistente a la rotura
	Resistente a la corrosión
Diseño electrónico	Sistema electrónico programable
	Seguridad de conexiones
Ergonomía	De fácil activación
	El niño debe sentirse cómodo interactuando.

3.2.1 Arquitectura del prototipo del robot interactivo móvil

Se busca crear un producto que tenga una arquitectura modular tipo ranura, para la parte externa necesitamos una estructura que soporte los elementos internos.

En la primera etapa se requiere el seguimiento facial para empezar a interactuar con los niños, por lo cual se utilizará una webcam accesible en el mercado.

Para la siguiente etapa requerimos empezar la reproducción de frases pregrabadas para despertar su atención conjuntamente con movimiento de sus partes ya sea cabeza, brazos, manipuladores y torso.

En la última etapa el robot intentara jugar a las escondidas con el niño incitándole a esconderse y él lo buscara.

En caso de que el niño pierda el interés de jugar, el robot tratará de incitarlo a jugar nuevamente reproduciendo frases, haciendo movimientos de sus partes y buscándolo. Para conseguir todas estas etapas el robot debe estar dotado de las siguientes características, que se describen a continuación:

- Los movimientos del robot deben ser fiables, realizados bajo transmisión directa de los motores a utilizar para aprovechar el torque en su totalidad.

- La estructura del prototipo del robot debe ser un diseño rígido, diseñado para acoplar los sensores, actuadores, sistema de control, placa y otros elementos que conforman todo el sistema robótico.
- Debido que el robot debe ser transportado para realizar las pruebas de funcionamiento, es importante que el peso del prototipo y su estructura, sean en conjunto livianos y manipulables.
- En el prototipo del robot móvil, es sumamente importante la seguridad de los niños, por lo que el robot no tendrá partes punzantes o con filos que los lastimen.
- El prototipo del robot móvil está diseñado a medida que sus partes, encajen perfectamente a través de guías que hacen que se protejan entre ellas evitando descentraciones de los motores.

3.2.2 Normas empleadas

La norma a seguir sobre las especificaciones técnicas, para el diseño y construcción de robots destinados al cuidado personal, está basada en la Norma ISO-13482, bajo el título “Robot y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots no industriales. Robots de asistencia personal no médicos (ISO-13482:2014)”. (AENOR, 2016)

3.3 Diseño detallado mecánico del robot interactivo móvil

Para el diseño del prototipo del robot interactivo móvil para niños con trastorno del espectro autista, se inicia con el diseño CAD y haciendo uso de esta gran herramienta dibujamos toda la estructura del robot.

Una vez teniendo la estructura y conociendo que el robot tendrá movimientos independientes, se procede a dividir la estructura en partes como los puntos de movimiento siendo brazos, cabeza, torso y la base.

Debido a que necesitaremos actuadores para que le den movimiento a la estructura y a partir del software en que diseñamos el robot, simulamos la masa aproximada de cada pieza y en general del robot, para proceder a los cálculos de torques necesarios para realizar su movimiento y a su vez la selección de los actuadores. A continuación en el diseño CAD se presenta los resultados de masa obtenidos en la simulación.

3.3.1 Diseño CAD

Con la ayuda conjunta de nuestra tutora y los terapeutas de la fundación, se llegó a diseñar una estructura tal que sea amigable y agradable a la vista, con una forma futurista.

La estructura del robot interactivo móvil se la diseño, de tal forma que sea desmontable en su totalidad para que sea fácil el cambio de partes y accesorios que llevará el robot en caso de ser necesario. Esto satisface a una arquitectura modular.

Para la unión de partes de la estructura se lo realizará mediante pernos y tuercas comerciales accesibles en el mercado ecuatoriano.

A continuación se muestra en la Figura 16, el diseño CAD final del prototipo de robot interactivo móvil para seguimiento de niños con trastorno del espectro autista.

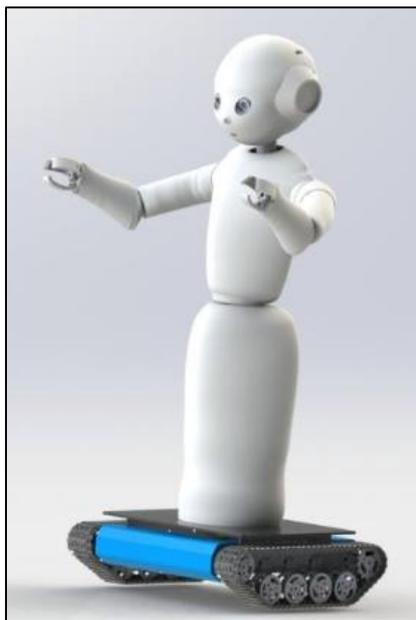


Figura 16. Diseño CAD del robot interactivo móvil

3.3.2 Cálculo de datos necesarios de las partes del robot interactivo

Para el cálculo de los datos de masa, distancias y momentos de inercia que son necesarios para el siguiente parámetro, se procede a tomar las masas aproximadas y momentos de inercia de la simulación realizada en el diseño CAD, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos de masa del robot interactivo

Partes del robot interactivo		
Partes	masa (Kg)	Inercia ($kg * m^2$)
Manipulador	0.014	0.000518
Cabeza	0.36	0.001078
Brazo	0.107	0.001099
Tronco (incluido manip-cab-bra)	1.0462	0.028753
Base	1.6198	0.172947

3.3.3 Determinación de torque del manipulador

Para la determinación de torques, se utiliza la ecuación 1 obtenida del análisis estático del sistema del robot interactivo móvil, conjuntamente con los datos dados en la Tabla 4.

$$m_{manip} = 0.014 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$k_{resorte} = 1 \text{ N/m}$$

$$x = 0.015 \text{ m}$$

$$d = 0.01 \text{ m}$$

Nota: Como la mano posee 3 dedos esta masa se dividirá para 3, ya que se realizara el análisis para un dedo para mayor comprensión.

En la Figura 17, se muestra el diagrama de cuerpo libre

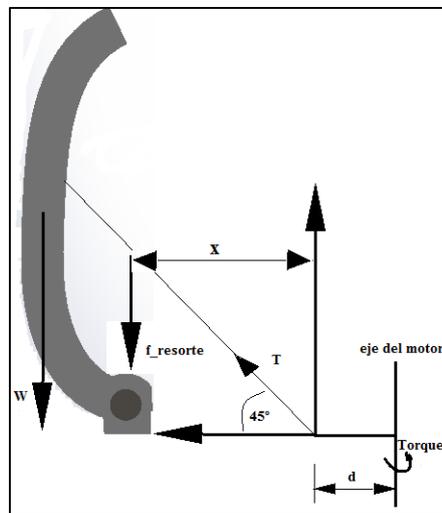


Figura 17. DCL del manipulador

$$\sum y = 0$$

$$T_y = \frac{w + f_{resorte}}{\sin(45)} = \frac{m_{manip} * g + k_{resorte} * x}{\sin(45)}$$

$$T_y = \frac{0.014 * 9.81 + 100 * 0.015}{\sin(45)}$$

$$T_y = 2.316 \text{ N}$$

$$\tau_{manip} = 3 * F_y * d = 3 * 0.83 * 0.01$$

$$\tau_{manip} = 0.069 Nm \left| \frac{0.1019 kg.m}{1 N.m} \right| \left| \frac{100cm}{1m} \right|$$

$$\tau_{manip} = 0.71 kg.cm$$

3.3.3.1 Caracterización de actuador

Se describe en la Tabla 5, las características que se consideran para una selección del actuador para el manipulador. Se realiza una comparación de características como dimensión, peso, torque, alimentación y precio, que son de gran importancia para la selección.

Tabla 5

Características de actuadores

Actuadores						
	Motor DC		Micro Servo Motor		Motor Paso a Paso	
Dimensiones	Largo de motor	59 mm	Largo	22.5mm	largo de motor	48mm
	Diámetro de motor	27mm	Ancho	12mm	Ancho y Alto	42.3mm
	Largo caja reductora	-	Alto	35.5mm	largo de caja reductora	-
	Diámetro caja reductora	-	Diámetro de eje	-	Diámetro de eje	5mm
	Largo de eje de motor	8.8 mm	Largo de eje	-	Largo de eje	25mm
Peso	95 gr		13.4 gr		350 gr	
Velocidad	5V – 6.4 rpm		4.8 V - 60 rpm		4V 200(1,8º/paso)	
			6 V - 75 rpm			
Torque	5v – 1 kg-cm		4.8 V – 1.8 kg-cm		4V 3.2 kg-cm	
			6 V – 2.2 kg-cm			
Engranajes	Acero		Aluminio		Acero	
Material de carcasa	Acero		Aluminio		Acero	
Precio (\$)	4.45		8		20	

Fuente: (Alibaba.com, 2010) (TowerPro, TowerPro, 2010), (BricoGeek, 2016)

De acuerdo a la información de la Tabla 5, y realizando una comparativa entre las diferentes características de los motores, y basándonos al torque calculado en el análisis, se elige el micro servo MG90S. En la Tabla 6, se muestran las características de este actuador.

Tabla 6

Características del actuador

Tower Pro MG90S	
Descripción Súper ligero. El motor puede rotar 180 grados, 90 en cada dirección. Engranaje metálico aseguran una larga vida de operación. Puede usar cualquier servo-código, tarjeta de control o librería para controlarlos.	
Dimensiones (mm):	22.5x12x35.5
Peso (gr):	13.4
Velocidad (4.8V rpm):	60
Torque(4.8V kg cm):	1.8
Velocidad (6.0V rpm):	75
Torque(6.0V kg cm):	2.2
Engranajes:	Metal único
Carcasa:	Plástico

Fuente: (TowerPro, TowerPro, 2010)

Este micro servo cumple con las características necesarias. Alimentado a 6V tendremos un torque de 2.2 kg-cm, que es un torque suficiente para mover el manipulador del robot.

Con este micro servo tenemos un factor de seguridad de 3, siendo un valor que nos asegura que el desempeño del micro servo será excelente.

3.3.4 Determinación de torque del brazo

Para la determinación de torque del brazo se procede a utilizar la ecuación 3, obtenida del análisis estático del sistema del robot interactivo móvil, conjuntamente con los datos de masa mostrados en la Tabla 4, y del actuador seleccionado.

$$m_{brazo} = 0.107 \text{ kg}$$

$$m_{manip} = 0.014 \text{ kg}$$

$$m_{motor_manip} = 0.013 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$d_1 = 0.0516 \text{ m}$$

$$d_2 = 0.108 \text{ m}$$

$$d_3 = 0.155 \text{ m}$$

En la Figura 18, se muestra el diagrama de cuerpo libre del brazo

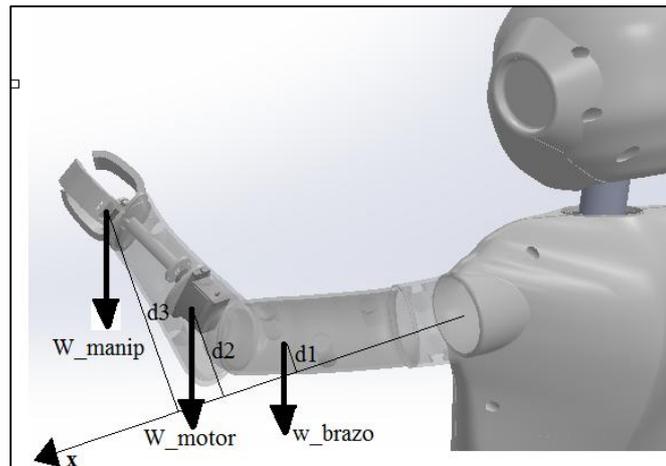


Figura 18. DCL del brazo

$$f_1 = w_1 = m_{brazo} * g = 0.107 * 9.81 = 1.05N$$

$$f_2 = w_2 = m_{motor_manip} * g = 0.0134 * 9.81 = 0.131N$$

$$f_3 = w_3 = m_{manip} * g = 0.014 * 9.81 = 0.137N$$

$$\tau_{brazo} = f_1 * d_1 + f_2 * d_2 + f_3 * d_3$$

$$\tau_{brazo} = 1.05 * 0.0516 + 0.131 * 0.108 + 0.137 * 0.155$$

$$\tau_{brazo} = 0.087 \text{ Nm} \left| \frac{0.1019 \text{ kg.m}}{1 \text{ N.m}} \right| \left| \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right|$$

$$\tau_{brazo} = 0.89 \text{ kg.cm}$$

3.3.4.1 Caracterización de actuador

Se describe en la Tabla 7, las características que se consideran para la selección del actuador del brazo. Se realiza una comparación de características como dimensión, peso, torque, alimentación y precio, que son de gran importancia para la selección.

Tabla 7*Características de actuadores*

Actuadores						
	Motor DC		Micro Servo Motor		Motor Paso a Paso	
Dimensiones	Largo de motor	59 mm	Largo	22.5mm	largo de motor	48mm
	Diámetro de motor	27mm	Ancho	12mm	Ancho y Alto	42.3mm
	Largo caja reductora	-	Alto	35.5mm	largo de caja reductora	-
	Diámetro caja reductora	-	Diámetro de eje	-	Diámetro de eje	5mm
	Largo de eje de motor	8.8 mm	Largo de eje	-	Largo de eje	25mm
Peso	95 gr		13.4 gr		350 gr	
Velocidad	5V – 6.3 rpm		4.8 V - 60 rpm		4V 200(1,8°/paso)	
			6 V - 75 rpm			
Torque	5v – 1 kg-cm		4.8 V – 1.8 kg-cm		4V 3.2 kg-cm	
			6 V – 2.2 kg-cm			
Engranajes	Acero		Aluminio		Acero	
Material de carcasa	Acero		Aluminio		Acero	
Precio (\$)	6.45		8		20	

Fuente: (Alibaba.com, 2010), (TowerPro, TowerPro, 2010), (BricoGeek, 2016)

De acuerdo a la información de la Tabla 7, y realizando una comparativa entre las diferentes características de los motores y basándonos al torque calculado en el análisis, se elige el micro **servo MG90S**. Sus características fueron ya mencionadas en la Tabla 6.

Con este micro servo tenemos un factor de seguridad de 2.47 que se adapta satisfactoriamente a nuestra necesidad y con seguridad no tendremos inconvenientes en su desempeño.

3.3.5 Determinación de torque de la cabeza

Para la determinación de torques, se utiliza las ecuaciones 1 y 6 obtenidas del análisis estático del sistema del robot móvil tanto para el movimiento vertical como horizontal respectivamente, conjuntamente con los datos descritos en la Tabla 4.

Para realizar los movimientos de la cabeza se lo realiza con dos motores, uno para cada movimiento.

- Cálculo de torque para el movimiento vertical

En la Figura 19, se muestra el diagrama de cuerpo libre

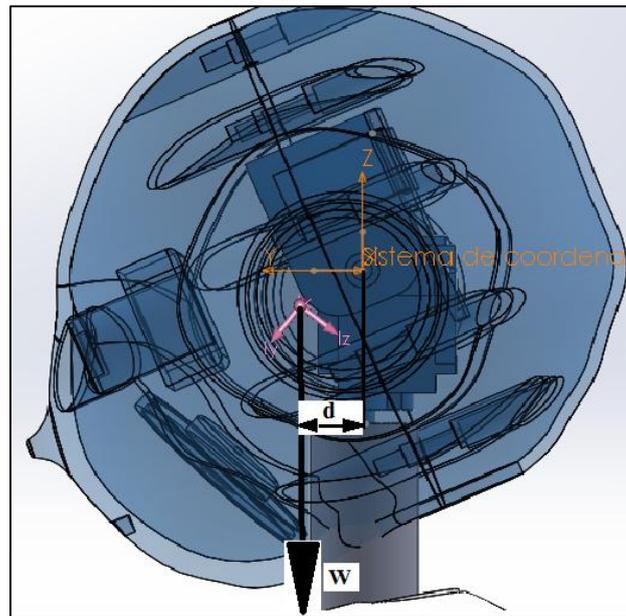


Figura 19. DCL de del movimiento vertical de la cabeza

$$m_{cab} = 0.36 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\tau_{cabeza_v} = f_{cab} * d_{cab} = w_{cab} * d_{cab}$$

$$\tau_{cabeza_v} = 0.36 * 9.81 * .0019$$

$$\tau_{cabeza_v} = 0.065 \text{ Nm} \left| \frac{0.1019 \text{ kg.m}}{1 \text{ N.m}} \right| \left| \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right|$$

$$\tau_{cabeza_v} = \mathbf{0.67 \text{ kg.cm}}$$

Nota: Debido a que se desprecia la fricción y el peso del cable en la simulación, lo que genera restricciones de movimiento, este toque se multiplicara por dos por motivos de seguridad.

$$\tau_{cabeza_v} = \mathbf{1.34 \text{ kg.cm}}$$

- Calculo de torque para movimiento horizontal

En la Figura 20, se muestra el diagrama de cuerpo libre

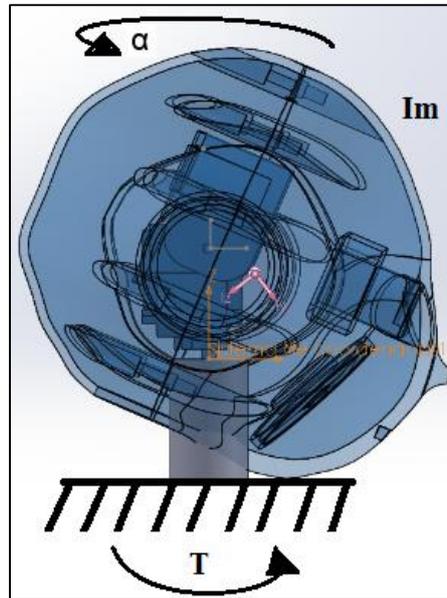


Figura 20. DCL del movimiento horizontal de la cabeza

$$I_{cab} = 0.0010784606 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\theta_f = 7.85 \text{ rad/s}$$

$$\tau_{cabeza_h} = I_{cab} * \alpha_{cab} = I_{cab} * \frac{\theta_f - \theta_i}{t}$$

$$\tau_{cabeza_h} = 0.0010784606 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 * \frac{(7.85 - 0) \text{ rad/s}}{1 \text{ s}}$$

$$\tau_{cabeza_h} = 0.0084 \text{ Nm} \left| \frac{0.1019 \text{ kg} \cdot \text{m}}{1 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \left| \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right|$$

$$\tau_{cabeza_h} = \mathbf{0.086 \text{ kg} \cdot \text{cm}}$$

Nota: Debido a que se desprecia la fricción y el peso del cable en la simulación, lo que genera restricciones de movimiento, este toque se multiplicara por dos por motivos de seguridad.

$$\tau_{cabeza_h} = \mathbf{0.172 \text{ kg} \cdot \text{cm}}$$

3.3.5.1 Caracterización de actuador

Se describe en la Tabla 8, las características que se consideran para una selección del actuador para los movimientos tanto vertical como horizontal de la cabeza. Por seguridad tomamos el torque mayor en estos dos movimientos y seleccionamos el mismo motor para los dos casos. Se realiza una comparación de características como dimensión, peso, torque, alimentación y precio que son de gran importancia para la selección.

Tabla 8

Características de actuadores

Actuadores						
	Motor DC		Micro Servo Motor		Motor Paso a Paso	
Dimensiones	Largo de motor	59 mm	Largo	22.6mm	largo de motor	48mm
	Diámetro de motor	27mm	Ancho	12mm	Ancho y Alto	42.3mm
	Largo caja reductora	-	Alto	35.5mm	largo de caja reductora	-
	Diámetro caja reductora	-	Diámetro de eje	-	Diámetro de eje	5mm
	Largo de eje de motor	8.8 mm	Largo de eje	-	Largo de eje	25mm
Peso	95 gr		13.8 gr		350 gr	
Velocidad	12V – 6.4 rpm		5 V - 60 rpm		4V 200(1,8º/paso)	
			6 V - 75 rpm			
Torque	12v – 3.1 kg-cm		5 V – 3.1 kg-cm		4V 3.2 kg-cm	
			6 V – 3.5 kg-cm			
Engranajes	Acero		Aluminio		Acero	
Material de carcasa	Acero		Aluminio		Acero	
Precio (\$)	4.45		10		20	

Fuente: (SuperRobotica, 2016), (TowerPro, 2010), (BricoGeek, 2016)

De acuerdo a la información de la Tabla 8, y realizando una comparativa entre las diferentes características de los motores y basándonos al torque calculado en el

análisis, se elige el micro **servo MG92B**. En la Tabla 9, se muestran las características de este actuador.

Tabla 9

Características del actuador

Tower Pro MG92B	
Descripción Súper ligero. El motor puede rotar 180 grados, 90 en cada dirección. Engranaje metálico aseguran una larga vida de operación. Puede usar cualquier servo-código, tarjeta de control o librería para controlarlos.	
Dimensiones (mm):	22.5x12x35.5
Peso (gr):	13.8
Velocidad (4.8V rpm):	60
Torque(4.8V kg cm):	1.8
Velocidad (6.0V rpm):	75
Torque(6.0V kg cm):	2.2
Engranajes:	Metal único
Carcasa:	Plástico

Fuente: (TowerPro, 2010)

Este micro servo cumple con las características necesarias. Alimentado a 6V tendremos un torque de 3.6 kg-cm, que es un torque suficiente para poder mover la cabeza en cualquiera de las direcciones que necesitamos o los dos moviéndose en conjunto. Con este micro servo obtendremos un factor de seguridad de 2.68, que es un valor apropiado y así, no tendremos problemas de falta de fuerza para el movimiento.

3.3.6 Determinación de torque del troco

Para la determinación de torque, se utiliza la ecuación 6 obtenida del análisis estático del sistema del robot móvil, conjuntamente con los datos simulados para la obtención de inercia mostrada en la Tabla 4.

Para realizar los movimientos del tronco analizamos el movimiento a través del diagrama de cuerpo libre.

En la Figura 21 se muestra el diagrama de cuerpo libre

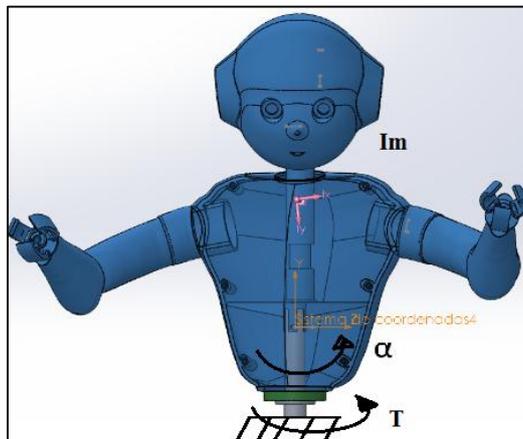


Figura 21. DCL del tronco

$$I_{tronco} = 0.0288 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\theta_f = 7.85 \text{ rad/s}$$

$$\tau_{tronco} = I_{tronco} \cdot \alpha_{tronco} = I_{tronco} \cdot \frac{\theta_f - \alpha_i}{t}$$

$$\tau_{tronco} = 0.0288 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{(7.85 - 0) \text{ rad/s}}{1 \text{ s}}$$

$$\tau_{tronco} = 0.226 \text{ Nm} \left| \frac{0.1019 \text{ kg} \cdot \text{m}}{1 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \left| \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right|$$

$$\tau_{cabeza_h} = 2.3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

3.3.6.1 Caracterización de actuador

Se describe en la Tabla 10, las características que se consideran para una selección del actuador para el movimiento rotacional del tronco. Se realiza una comparación de características como dimensión, peso, torque, alimentación y precio que son de gran importancia para la selección.

Tabla 10*Características de actuadores*

Actuadores						
	Motor DC		Micro Servo Motor		Motor Paso a Paso	
Dimensiones	Largo de motor	59 mm	Largo	41 mm	largo de motor	48mm
	Diámetro de motor	27mm	Ancho	20 mm	Ancho y Alto	42.3mm
	Largo caja reductora	-	Alto	36 mm	largo de caja reductora	-
	Diámetro caja reductora	-	Diámetro de eje	-	Diámetro de eje	5mm
	Largo de eje de motor	8.8 mm	Largo de eje	-	Largo de eje	25mm
Peso	95 gr		37.2 gr		350 gr	
Velocidad	12V – 6.3 rpm		4.8 V - 26 rpm		4V 200(1,8°/paso)	
			6 V – 31.5 rpm			
Torque	12v – 3 kg-cm		4.8 V – 3.2 kg-cm		4V 3.2 kg-cm	
			6 V – 4.1 kg-cm			
Engranajes	Acero		Aluminio		Acero	
Material de carcasa	Acero		Plástico		Acero	
Precio (\$)	9		30		20	

Fuente: (SuperRobotica, 2016), (FUTABA, 2011), (BricoGeek, 2016)

De acuerdo a la información de la Tabla 10, y realizando una comparativa entre las diferentes características de los motores y basándonos al torque calculado en el análisis, se elige el servo FUTABA S30303. En la Tabla 11, se muestran las características de este actuador.

Tabla 11*Características del actuador*

FUTABA S3003	
Descripción Súper ligero. El motor puede rotar 180 grados, 90 en cada dirección. Engranaje metálico aseguran una larga vida de operación. Puede usar cualquier servo-código, tarjeta de control o librería para controlarlos.	
Dimensiones (mm):	41x20x36
Peso (gr):	37.2
Velocidad (4.8V rpm):	26
Torque(4.8V kg cm):	3.2
Velocidad (6.0V rpm):	31.5
Torque(6.0V kg cm):	4.1
Engranajes:	Metal único
Carcasa:	Plástico

Fuente: (FUTABA, 2011)

Este servo cumple con las características necesarias. Alimentado a 6V tendremos un torque de 4.1 kg-cm, que es un torque suficiente para mover el tronco teniendo un factor de seguridad de 1.78, que es un valor muy aceptable para el diseño.

3.3.7 Determinación de torque de la base

Para la determinación de torque, se utiliza la ecuación 1 obtenida del análisis estático del sistema del robot móvil, conjuntamente con los datos descritos en la Tabla 4.

Para realizar los movimientos de la base analizamos el movimiento a través del diagrama de cuerpo libre. En la Figura 17, se muestra el diagrama de cuerpo libre

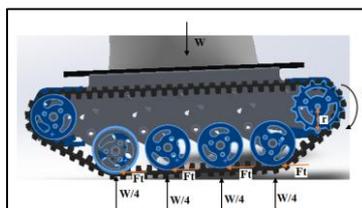


Figura 22. DCL de la base

$$m_{robot} = 2.666 \text{ kg}$$

$$g = 9.81m/s^2$$

$$u_{cinetico\ caucho-concreto} * = 0.8$$

$$\tau_{base} = f_t * r = u_{cinetico\ caucho-concreto} * N * r = u_{cinetico\ caucho-concreto} * \frac{W}{4} * r$$

$$\tau_{base} = u_{cinetico\ caucho-concreto} * \frac{m * g}{4} * r$$

$$\tau_{base} = 0.8 * \frac{2.666 * 9.81}{4} * 0.019$$

$$\tau_{base} = 0.1 Nm \left| \frac{0.1019kg.m}{1 N.m} \right| \left| \frac{100cm}{1m} \right|$$

$$\tau_{base} = \mathbf{1\ kg.cm}$$

3.3.7.1 Caracterización de actuador

Se describe en la Tabla 12, las características que se consideran para una selección del actuador para el movimiento rotacional de la base. Se realiza una comparación de características como dimensión, peso, torque, alimentación, precio que son de gran importancia para la selección.

Tabla 12

Características de actuadores

Actuadores						
	Motor DC		Micro Servo Motor		Motor Paso a Paso	
Dimensiones	Largo de motor	59 mm	Largo	22.5 mm	largo de motor	48mm
	Diámetro de motor	27mm	Ancho	12 mm	Ancho y Alto	42.3mm
	Largo caja reductora	-	Alto	35.5 mm	largo de caja reductora	-
	Diámetro caja reductora	-	Diámetro de eje	-	Diámetro de eje	5mm
	Largo de eje de motor	8.8 mm	Largo de eje	-	Largo de eje	25mm
Peso	95 gr		13.4 gr		350 gr	
Velocidad	12V – 6.3 rpm		4.8 V - 60 rpm		4V 200(1,8º/paso)	
			6 V – 75 rpm			
Torque	12v – 3 kg-cm		4.8 V – 1.8 kg-cm		4V 3.2 kg-cm	
			6 V – 2.2 kg-cm			
Engranajes	Acero		Aluminio		Acero	
Material de carcasa	Acero		Plástico		Acero	
Precio (\$)	9		8		20	

Fuente: (MOTOR, 2015), (TowerPro, 2010), (BricoGeek, 2016)

De acuerdo a la información de la Tabla 12, y realizando una comparativa entre las diferentes características de los motores y basándonos al torque calculado en el análisis, se elige el motor DC ET-SGM27B-126.3. En la Tabla 13, se muestran las características de este actuador.

Tabla 13

Características del actuador

ET-SGM27B-126.3	
Descripción Súper ligero. El motor puede rotar en cualquier dirección. Engranaje metálico aseguran una larga vida de operación. Puede usar cualquier servo-código, tarjeta de control o librería para controlarlos.	
Dimensiones (mm):	59x27
Peso (gr):	95
Velocidad (12V rpm):	6.3
Torque(12V kg cm):	3
Engranajes:	Metal único
Carcasa:	Metal

Fuente: (MOTOR, 2015)

Este servo cumple con las características necesarias. Alimentado a 12V tendremos un torque de 3 kg-cm, que es un torque suficiente para poder mover todo el robot. Gracias a que el peso se distribuye en las cuatro ruedas de la base de cada lado el torque necesario para su movimiento es bajo, teniendo un factor de seguridad de 3, que es un valor muy aceptable para un desempeño óptimo.

3.3.8 Diseño de engranes y eje para transmisión de movimiento del tronco

Debido a que el peso del tronco estará ubicado sobre el eje del actuador a través de una transmisión directa, se determinó que esto ocasionaría un daño al mismo, producido por movimientos bruscos. Para evitar este inconveniente se transmitió el torque a través de un eje y un sistema de engranes, evitando esfuerzos axiales sobre el eje del actuador.

3.3.8.1 Diseño de engranes

Cálculo de los parámetros de engranes

Módulo $m=2$

Número de dientes del piñón $\rightarrow z_p = 15$

Número de dientes de corona $\rightarrow z_c = 15$

Ángulo de presión $\alpha = 25^\circ$

Relación de transmisión $\eta = 1$

Para la determinación del paso diametral

$$p_d = \frac{25,4}{2} \quad (7)$$

$$p_d = \frac{25,4}{2} = 12.7$$

Para la determinación de paso circular

$$p_c = \frac{\pi}{p_d} \quad (8)$$

$$p_c = \frac{\pi}{12.7} = 0,25 \text{ in} \approx 6.27 \text{ mm}$$

Para la determinación del paso base.

$$p_b = p_c \cos \phi \quad (9)$$

$$p_b = 0.25 \cos(25) = 0,226 \text{ in} \approx 5.76 \text{ mm}$$

Para la determinación del diámetro de paso del piñón.

$$d_p = \frac{z_p}{p_d} \quad (10)$$

$$d_p = \frac{15}{12.7} = 1,181 \text{ in} \approx 30 \text{ mm}$$

Para la determinación del diámetro de paso de la corona.

$$d_c = \frac{z_c}{p_d} \quad (11)$$

$$d_c = \frac{15}{12.7} = 1.181 \text{ in} \approx 30 \text{ mm}$$

Para la determinación de la distancia nominal entre centros.

$$C = \frac{(d_p + d_c)}{2} \quad (12)$$

$$C = \frac{(1.181 + 1.181)}{2} = 1,181 \text{ in} \approx 30 \text{ mm}$$

Para el cálculo del factor adendum y dedendum

$$a = \frac{1}{p_d} \quad b = \frac{1,25}{p_d} \quad (13)$$

$$a = \frac{1}{12.7} = 0,078 \text{ in} \approx 2 \text{ mm} \quad b = \frac{1,25}{12.7} = 0,098 \text{ in} \approx 2.5 \text{ mm}$$

Para el cálculo de la profundidad total.

$$h_t = a + b \quad (14)$$

$$h_t = 0.078 + 0.098 = 0,176 \text{ in} \approx 4.5 \text{ mm}$$

Para el cálculo de la holgura.

$$c = b - a \quad (15)$$

$$c = 0.098 - 0.078 = 0,02 \text{ in} \approx 0,5 \text{ mm}$$

Para el cálculo del diámetro exterior de piñón y corona.

$$D_{op} = D_{oc} \quad (16)$$

$$D_{op} = D_{oc} = 1,181 + 2(0,078) = 1.337 \text{ in} \approx 34 \text{ mm}$$

Análisis de carga en el tren de engranes

Datos de velocidad del servomotor.

$$w_{piñón} = w_{servomotor} = 31.5 \text{ rpm}$$

$$w_{corona} = w_{piñón} = 31.5 \text{ rpm}$$

Datos de torque del servomotor.

$$T_{piñón} = T_{servomotor} = 4.1 \text{ [kg * cm]} = 3.35 \text{ [lb * in]}$$

$$T_{corona} = T_{piñón} = 3.35 \text{ [lb * in]}$$

Para el cálculo de carga transmitida (tangencial).

$$W_t = \frac{T_p}{\frac{d_p}{2}} \quad (17)$$

$$W_t = \frac{3.35}{\left(\frac{1,181}{2}\right)} = 5.673 \text{ lb}$$

Para el cálculo de la componente radial.

$$W_r = W_t * \text{tag}\phi \quad (18)$$

$$W_r = 5.673 * \text{tag}(25) = 2.645 \text{ lb}$$

La carga total.

$$W = \frac{W_t}{\cos\phi} \quad (19)$$

$$W = \frac{5.673}{\cos(25)} = 6.259 \text{ lb}$$

Las cargas repetidas.

$$W_{t_{media}} = W_{t_{alternante}} = \frac{W_t}{2} = \frac{5.673}{2} = 2.837 \text{ lb} \quad (20)$$

Determinación de ancho de cara y esfuerzos de flexión (índice de calidad 6)

$$\sigma_b = \frac{W_t p_d K_a K_m}{F J} K_s K_B K_I \quad (21)$$

$W_t \rightarrow$ carga transmitida

$p_d \rightarrow$ paso diametral

$F \rightarrow$ ancho de cara

$J \rightarrow$ factor geométrico actualizado

$K_v \rightarrow$ factor dinámico

$K_m \rightarrow$ factor de distribución de carga

$K_s \rightarrow$ factor de tamaño

$K_B \rightarrow$ factor de espesor de aro

$K_I \rightarrow$ factor de engrane loco

Para el cálculo del ancho de cara

$$\frac{8}{p_d} < F < \frac{16}{p_d} \quad (22)$$

$$F = \frac{12}{12.7} = 0,945 \text{ in} \approx 24 \text{ mm}$$

Cálculo del factor de carga y fuentes uniformes $K_a = 1$.

El cálculo del factor de distribución de carga se lo puede realizar basados en la *Tabla 14*, con relación al ancho de cara calculado, como el ancho de cara es menor a 50mm el factor de distribución es de $K_m = 1,6$.

Tabla 14

Factores de distribución de carga

Ancho de cara in (mm)	K_m
<2 (50)	1.6
6 (150)	1.7
9 (250)	1.8
≥20 (500)	2.0

Fuente: (Norton, 2011)

Cálculo del factor de velocidad con base al índice de calidad 6.

$$V_t = \frac{d_p}{2} w_p \quad (23)$$

$$V_t = \frac{1,181}{2(12)} (31.5)(2\pi) = 9.739 \frac{ft}{min}$$

$$B = \frac{(12 - Q_v)^{\frac{2}{3}}}{4} \quad (24)$$

$$B = \frac{(12 - 6)^{\frac{2}{3}}}{4} = 0,83$$

$$A = 50 + 56(1 - B) \quad (25)$$

$$A = 50 + 56(1 - 0,83) = 59,52$$

$$K_v = \left(\frac{A}{A + \sqrt{V_t}} \right)^B = \left(\frac{59,52}{59,52 + \sqrt{9.739}} \right)^{0,83} = 0,903 \quad (26)$$

Para el cálculo del factor de tamaño.

$$K_s = 1$$

Para el cálculo del factor de aro.

$$K_B = 1$$

Para el cálculo del factor de engrane loco.

$$K_I = 1$$

Cálculo del factor geométrico de flexión J para 25° y 15 dientes del piñón engranado a 15 dientes de la corona, según la *Tabla 15*, el factor geométrico es de $J_{\text{piñón}} = 0.33$.

Tabla 15

Factor geométrico para flexión

Dientes en el engrane	Dientes en el piñón																
	12		14		17		21		26		35		55		135		
	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P	G	
12	U	U															
14	U	U	0.33	0.33													
17	U	U	0.33	0.36	0.36	0.36											
21	U	U	0.33	0.39	0.36	0.39	0.39	0.39									
26	U	U	0.33	0.41	0.37	0.42	0.40	0.42	0.43	0.43							
35	U	U	0.34	0.44	0.37	0.45	0.40	0.45	0.43	0.46	0.46						
55	U	U	0.34	0.47	0.38	0.48	0.41	0.49	0.44	0.49	0.47	0.50	0.51	0.51			
135	U	U	0.35	0.51	0.38	0.52	0.42	0.53	0.45	0.53	0.48	0.54	0.53	0.56	0.57	0.57	

Fuente: (Norton, 2011)

Para el cálculo del esfuerzo de flexión en los dientes del piñón.

$$\sigma_{b_{\text{piñón}}} = \frac{W_t p_d K_a K_m}{F J K_v} K_s K_B K_I \quad (27)$$

$$\sigma_{b_{\text{piñón}}} = \frac{5.673 * 12.7}{0.945 * 0.33} * \frac{1 * 1.6}{0.903} (1)(1)(1) = 409.35 \text{ psi}$$

Para el cálculo del esfuerzo de flexión en los dientes de la corona, el factor geométrico de flexión J toma el mismo valor que el del piñón $J_{\text{piñón}} = 0,33$ en la *Tabla 15*. Por lo que:

$$\sigma_{b_{corona}} = \sigma_{b_{piñón}} = 409.35 \text{ psi}$$

Determinación esfuerzos superficiales

$$\sigma_c = C_p \sqrt{\frac{W_t}{FId} * \frac{C_a C_m}{C_v} C_s C_f} \quad (28)$$

$W_t \rightarrow$ carga transmitida

$d \rightarrow$ diámetro de paso más pequeño

$F \rightarrow$ ancho de cara

$I \rightarrow$ factor geométrico superficial

$C_p \rightarrow$ coeficiente elástico

$K_m = C_m \rightarrow$ factor de distribución de carga

$K_a = C_a \rightarrow$ factor de cargas y fuentes uniformes

$K_v = C_v \rightarrow$ factor dinámico

$K_s = C_s \rightarrow$ factor de tamaño

Para el cálculo del factor geométrico superficial

$$I = \frac{\cos\phi}{\left(\frac{1}{\rho_p} \pm \frac{1}{\rho_c}\right) d_p} \quad (29)$$

$$\rho_p = \sqrt{\left(r_p + \frac{1+x_p}{p_d}\right)^2 - (r_p \cos\phi)^2} - \frac{\pi}{p_d} \cos\phi \quad (30)$$

$$\rho_c = C \sin\phi \mp \rho_p \quad (31)$$

$p_d \rightarrow$ paso diametral

$r_p \rightarrow$ radio de paso del piñón

$C \rightarrow$ distancia entre centros

$$\rho_p = \sqrt{\left(0,591 + \frac{1+0}{12.7}\right)^2 - (0,591 \cos 25)^2} - \frac{\pi}{12.7} \cos 25 = 0,178 \text{ in} \approx 4.519 \text{ mm}$$

$$\rho_c = 1.181 \sin 25 - 0,178 = 0,321 \text{ in} \approx 8.156 \text{ mm}$$

$$I = \frac{\cos 25}{\left(\frac{1}{0,178} + \frac{1}{0,321}\right) 1,181} = 0,087 \approx 2.232 \text{ mm}$$

Para el cálculo del coeficiente elástico.

Material acero 1020.

Módulo de elasticidad $200 \text{ GPa} \approx 30 \text{ Mpsi}$.

Coeficiente de poisson = 0,29.

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_g^2}{E_g} \right]}} \quad (32)$$

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \left[\frac{1 - 0,29^2}{30 \times 10^6} + \frac{1 - 0,29^2}{30 \times 10^6} \right]}} = 2283,21 \sqrt{\text{psi}}$$

Para el cálculo del esfuerzo superficial piñón corona utilizado la ecuación 28.

$$\sigma_c = C_p \sqrt{\frac{W_t}{F I d} * \frac{C_a C_m}{C_v} C_s C_f}$$

$$\sigma_c = 2283,21 \sqrt{\frac{2.837}{0.945 * 0.087 * 1.181} * \frac{(1) * (1,6)}{0,903} (1)(1)} = 16428.245 \text{ psi}$$

Resistencias de la AGMA de fatiga a la flexión en materiales para engranes

$$S_{fb} = \frac{K_L}{K_T K_R} S'_{fb} \quad (33)$$

S'_{fb} : Resistencia a la fatiga por flexión publicada por la AGMA

S_{fb} : Resistencia corregida

K_L : Factor de vida

K_T : Factor de temperatura

K_R : Factor de temperatura

Resistencias a la fatiga superficial de la AGMA para materiales de engranes

$$S_{fc} = \frac{C_L C_H}{C_T C_R} S'_{fc} \quad (34)$$

S'_{fc} : Resistencia a la fatiga superficial publicada

S_{fc} : Resistencia corregida

C_L : Factor de vida

$K_T = C_T$: Factor de temperatura

$K_R = C_R$: Factor de temperatura

C_H : Factor de razón de dureza para resistencia al picado

Cálculo de los factores de seguridad para los esfuerzos de flexión y superficiales en el tren de dos engranes

La resistencia sin corregir a la fatiga por flexión. En la *Figura 23*, se muestra la curva para el cálculo de resistencia a la fatiga

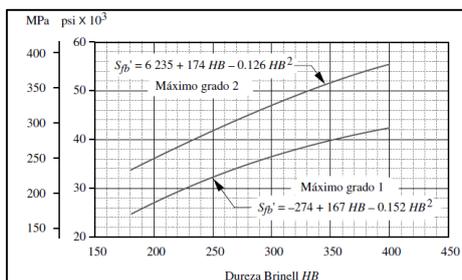


Figura 23. Curvas para el cálculo de resistencia a la fatiga

Fuente: (Norton, 2011)

Se utiliza un acero 1020 con grado 2, con dureza 111HB, y haciendo uso de las curvas que se describen en la *Figura 23* se obtiene.

$$S'_{fb} = 6235 + 174HB - 0,126HB^2 \quad (35)$$

$$S'_{fb} = 6235 + 174(111) - 0,126(111)^2 = 23996,55 \text{ psi}$$

Cálculo del factor de vida requerida para 5 años.

$$N = 31.5 \text{rpm} \left(\frac{60 \text{min}}{h} \right) \left(\frac{240h}{\text{turno} - \text{año}} \right) (5 \text{ años})(1 \text{ turno}) = 2.27 \times 10^6 \text{ ciclos}$$

Se ha calculado que los ciclos a los que estará sometido, que es de 2.27×10^6 ciclos. En la *Figura 24*, se muestra la curva para el cálculo de factor de vida.

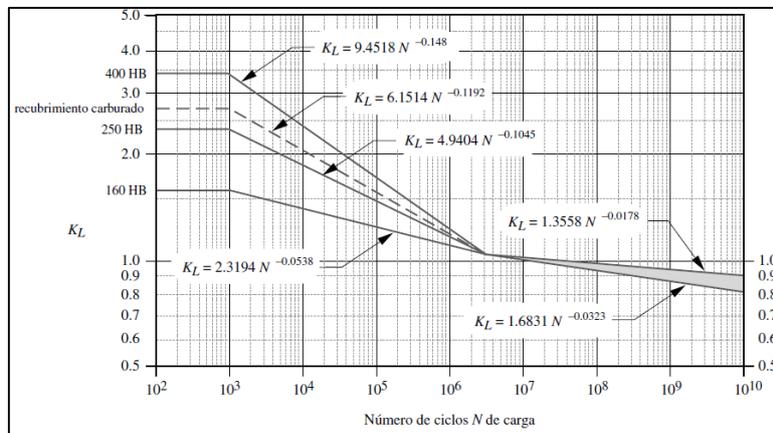


Figura 24. Curvas para el cálculo de factor de vida

Fuente: (Norton, 2011)

$$K_L = 2,3194N^{-0,0538} \quad (36)$$

$$K_L = 2,3194 * (2.27 \times 10^6)^{-0,0538} = 1.055$$

Cálculo del factor de temperatura.

$$K_T = 1$$

Factor de confiabilidad al 99%.

$$K_R = 1$$

La resistencia de fatiga por flexión corregida se calcula con la ecuación 33.

$$S_{fb} = \frac{1,055}{(1)(1)} (23996,55) = 25316.36 \text{ psi}$$

Resistencia a la fatiga superficial sin corregir

En la *Figura 25*, se muestra el gráfico para el cálculo de resistencia a la fatiga superficial.

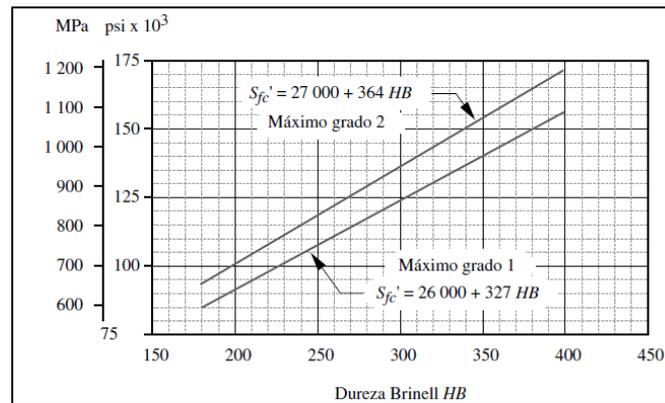


Figura 25. Resistencia a la fatiga superficial

Fuente: (Norton, 2011)

$$S'_{fc} = 27000 + 364HB \quad (37)$$

$$S'_{fc} = 27000 + 364(111) = 67404 \text{ psi}$$

Cálculo del factor de vida requerida para 5 años. En la *Figura 26*, se muestra el gráfico para el cálculo de factor de vida.

$$N = 2.27 \times 10^6 \text{ ciclos}$$

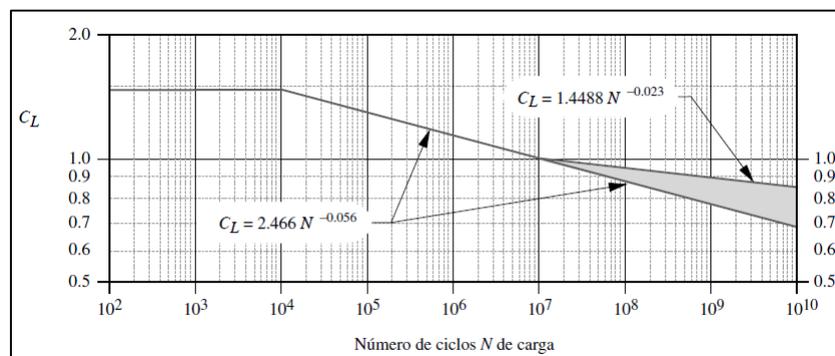


Figura 26. Curvas para el cálculo de factor de vida

Fuente: (Norton, 2011)

$$C_L = 2,466N^{-0,056} \quad (38)$$

$$C_L = 2,466(2.27 \times 10^6)^{-0,056} = 1,087$$

Para el cálculo del factor de temperatura.

$$C_T = 1$$

Factor de confiabilidad al 99%.

$$C_R = 1$$

Como en este caso las durezas de los engranes y el piñón son las del mismo material.

$$C_H = 1$$

La resistencia de fatiga superficial corregida haciendo uso de la ecuación 34.

$$S_{fc} = \frac{1,087(1)}{(1)(1)} (67404) = 73268.148 \text{ psi}$$

El factor de seguridad contra fallas por flexión

$$N_{b_{\text{piñón}}} = \frac{S_{fb}}{\sigma_{b_p}} \quad (39)$$

$$N_{b_{\text{piñón}}} = \frac{25316.36}{409.35} = 6.183$$

Obteniendo un factor de seguridad de 6.183, lo que nos dice que el ancho de cara va a satisfacer exitosamente al uso que se le va a dar, con un tiempo de vida para 5 años a 8 horas diarias siendo el caso más crítico de utilización del robot.

El factor de seguridad contra fallas superficiales

$$N_{c_{\text{piñón-corona}}} = \left(\frac{S_{fc}}{\sigma_{b_{\text{piñón-corona}}}} \right)^2 \quad (40)$$

$$N_{c_{\text{piñón-corona}}} = \left(\frac{70774,20}{69533,17} \right)^2 = 1,1$$

En la *Figura 27*, se muestra la vista isométrica del piñón de 15 dientes.

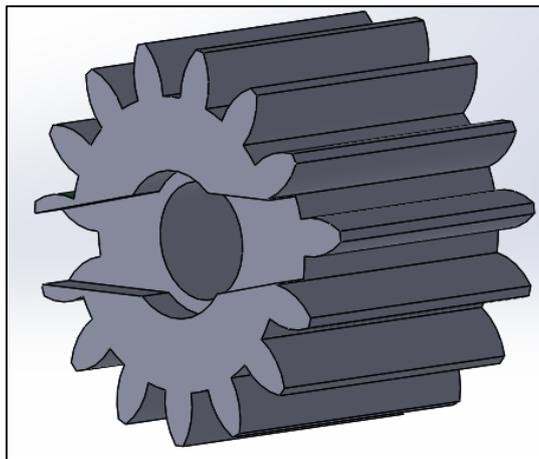


Figura 27. Vista Isométrica del piñón de 15 dientes

En la *Figura 28*, se muestra la vista isométrica de la corona de 15 dientes.

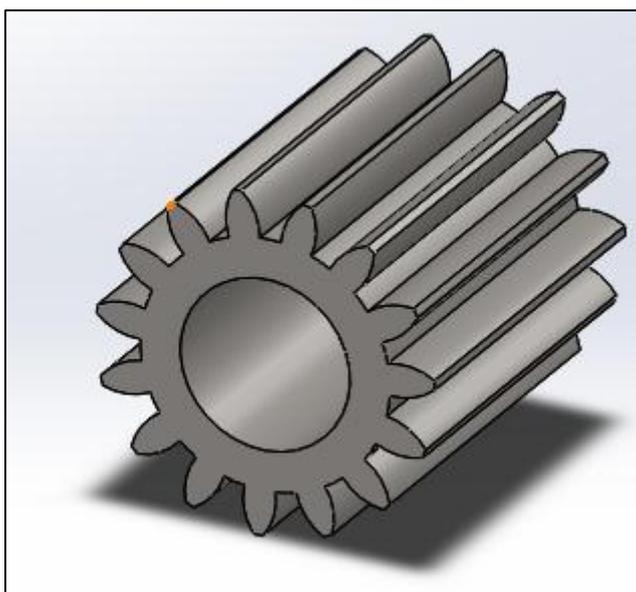


Figura 28. Vista Isométrica de la corona de 15 dientes

3.3.8.2 Diseño del eje

Se muestra un bosquejo en la *Figura 29*, del eje a diseñar con las medidas tentativas.

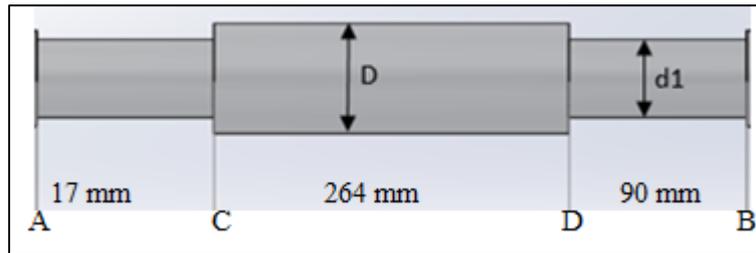


Figura 29. Bosquejo del eje

Según la ecuación:

$$W^t = \frac{60000 H}{\pi d n} \quad (41)$$

$$W_1^t = \frac{60000 * 6.6 W}{\pi(30 \text{ mm})(31.5 \text{ rpm})} = 133.38 \text{ N}$$

$$W_2^t = W_1^t = 133.38 \text{ N}$$

Para determinar las fuerzas radiales en los engranes se determina las componentes de la fuerza tomando en cuenta el ángulo de presión de 25° .

$$W_1^r = W_2^r = W_1^t \tan(25^\circ) = 133.38 * \tan(25^\circ) = 62.19 \text{ N}$$

En la Figura 30, se muestra el DCL para el plano x-y:

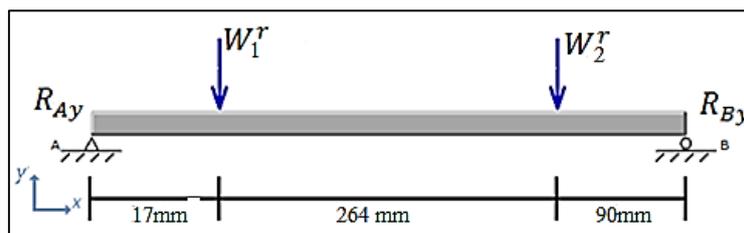


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre Plano (x-y)

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} - W_1^r - W_2^r + R_{By} = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} = 124.38 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-W_1^r (17) - W_2^r (281) + R_{By}(371) = 0$$

$$-62.19(17) - 62.19(281) + R_{By}(371) = 0$$

$$R_{By} = 49.95 \text{ N} \quad \text{y} \quad R_{Ay} = 74.423 \text{ N}$$

$$M_{Cz} = R_{Ay}(17) = 74.423 * (0.017) \text{ Nm}$$

$$M_{Cz} = 1.265 \text{ Nm}$$

$$M_{Dz} = R_{By}(0.09) = 49.95 * (0.09)$$

$$M_{Dz} = 4.496 \text{ Nm}$$

Para corroborar los datos obtenidos, se empleó la utilización de un software, que simula los diagramas de momentos y fuerzas, tal como se muestra en la *Figura 31*, obteniendo los siguientes resultados.

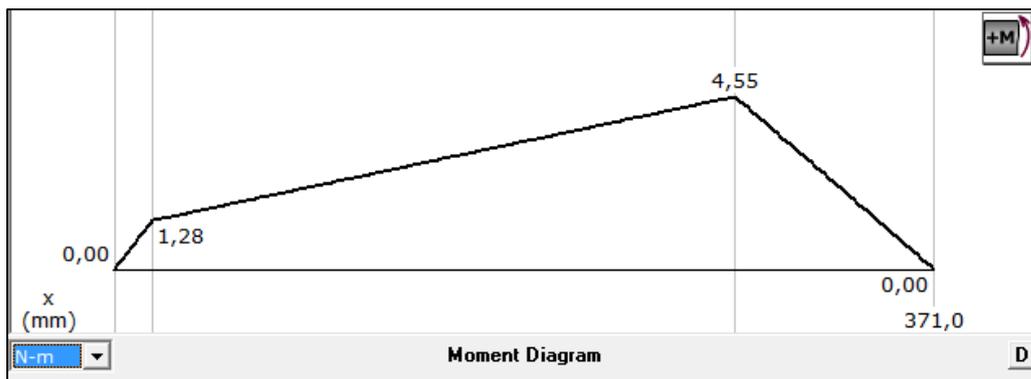


Figura 31. Diagrama de momentos del eje b – plano X-Y.

En la *Figura 32*, se muestra el DCL Para el plano x-z:

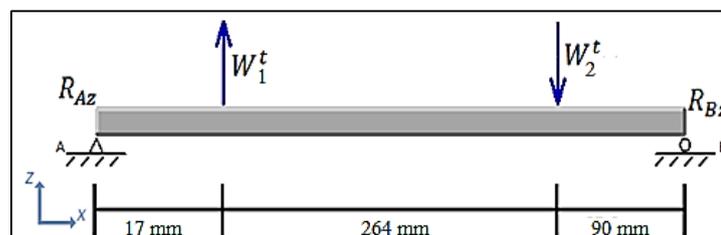


Figura 32. DCL eje b, plano X-Z.

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{Az} + W_1^t - W_2^t + R_{Bz} = 0$$

$$R_{Az} + R_{Bz} = 0 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$W_1^t(17) - W_2^t(281) + R_{Bz}(371) = 0$$

$$133.38(17) - 133.38(281) + R_{Bz}(371) = 0$$

$$\mathbf{R_{Bz} = 94.91 \text{ N} \quad R_{Az} = -94.91 \text{ N}}$$

$$M_{Cy} = R_{Az}(17) = (-94.91)(0.017) \text{ Nm}$$

$$\mathbf{M_{Cy} = -1.613 \text{ Nm}}$$

$$M_{Dy} = R_{Bz}(90) = [(94.91)(0.09)] \text{ Nm}$$

$$\mathbf{M_{Dy} = 8.542 \text{ Nm}}$$

Para corroborar los datos obtenidos se empleó la utilización de un software, que simula los diagramas de momentos y fuerzas, tal como se muestra en la *Figura 33*, obteniendo los siguientes resultados.

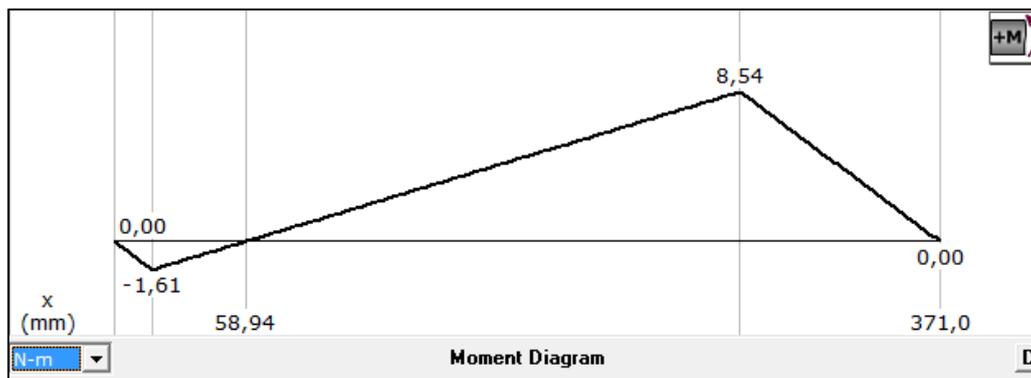


Figura 33. Diagrama de momentos del eje b – plano X-Z.

Por lo tanto se obtienen los momentos resultantes:

$$M_C = \sqrt{(M_{Cy})^2 + (M_{Cz})^2} = \sqrt{(1.613)^2 + (1.26)^2}$$

$$\mathbf{M_C = 2,047 \text{ Nm}}$$

$$M_D = \sqrt{(M_{Dy})^2 + (M_{Dz})^2} = \sqrt{(8.542)^2 + (4.496)^2}$$

$$M_D = 9.653 \text{ Nm}$$

Por lo que el punto D es el más crítico, a partir de este se calculara el diámetro.

El torque que generan los engranes es igual al torque que genera el motor.

$$T = 4.1 \text{ kg cm} * \frac{0.0980665}{1 \text{ kgcm}} = 0.402 \text{ N.m}$$

De la Figura 34, si $\frac{r}{d} = 0,1$, entonces $K_t = 1,7$ y $K_{ts} = 1,5$. Para ser conservador:

$$K_t = K_f \text{ y } k_{ts} = K_{fs}$$

Tabla 7-1		Flexión	Torsión	Axial
Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo K_f . Advertencia: Estos factores sólo son estimaciones que pueden usarse cuando las dimensiones reales aún no se determinan. No utilice estos valores cuando ya se cuente con las dimensiones reales.	Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
	Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
	Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.2	3.0	—
	Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
	Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Los valores faltantes en la tabla no pueden obtenerse con facilidad.

Figura 34. Tabla para estimación de concentración de esfuerzos

Fuente: (Nisbet, 8va edición)

Como el eje se lo va a realizar con ABS la resistencia máxima a la tensión es 68.9 MPa.

$$S'_e = 0,5S_{ut} = 0,5 * 68.9 \text{ MPa} = 34.45 \text{ MPa} \quad (42)$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (43)$$

En la Figura 35, se muestra valores de los factores y se selecciona el parámetro de construcción “hecho en caliente”, entonces: $a = 57.7$ y $b = -0,718$.

Parameters for Marin Surface Modification Factor, Eq. (6-19)	Factor a		Exponent b
	Surface Finish	S_{ut} , kpsi	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

Figura 35. Tabla para seleccionar parámetros

Fuente: (Nisbet, 8va edición)

$$k_a = aS_{ut}^b = 57.7(68.9 * 10^6)^{-0.718} = 0.0016 \quad (44)$$

$$k_b = 0,9 \text{ por ser primera iteración}$$

$$k_c = 1 \text{ por presentarse esfuerzos combinados}$$

$$k_d = k_e = k_f = 1 \text{ ya que no existe información}$$

$$S_e = 0.0016 * 0,9 * 34.45 \text{ MPa} = 0.051 \text{ Pa}$$

En la Figura 36, se muestra el momento del punto crítico.

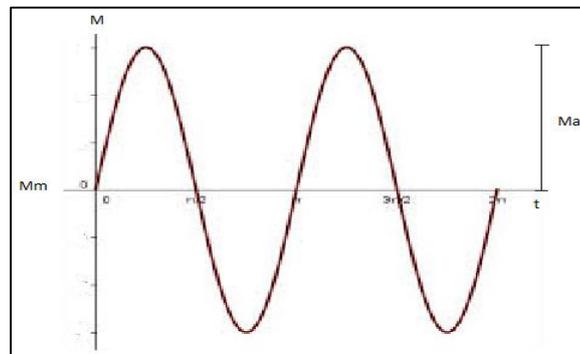


Figura 36. Momento en el punto crítico

Fuente: (Nisbet, 8va edición)

$$M_a = M_D = 9.653 \text{ Nm} \quad \text{y} \quad M_m = 0$$

$$T_a = 0 \quad \text{y} \quad T_m = 0.653 \text{ Nm}$$

Decidimos usar el criterio de ED-Goodman, ya que éste criterio es conservador y económico.

Por lo tanto ED-Goodman en función de A y B, teniendo en cuenta que $n \geq 1,5$:

$$d_1 = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{1/3} \quad (45)$$

$$d_1 = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{A}{S_e} + \frac{B}{S_{ut}} \right\} \right)^{1/3}$$

$$A = \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2} = \sqrt{4(1,7 * 9.653)^2 + 3(1,5 * (0))^2} = 32.82 \text{ Nm}$$

$$B = \sqrt{4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2} = \sqrt{4(1,7(0))^2 + 3(1,5 * (0.402))^2} = 1.044 \text{ Nm}$$

$$d_1 = \left(\frac{16(1,5)}{\pi} \left\{ \frac{32.82}{0.051} + \frac{1.044}{68.9 * 10^6} \right\} \right)^{1/3} = 17 \text{ mm}$$

Una relación típica es: $\frac{D}{d_1} = 1,2$.

$$D = 1,2 * 17 = 20.4 \text{ mm}$$

Por lo que el diámetro mayor será de 20 mm y el diámetro menor es 17 mm en material ABS.

En la Figura 37, se muestra la vista isométrica del eje.

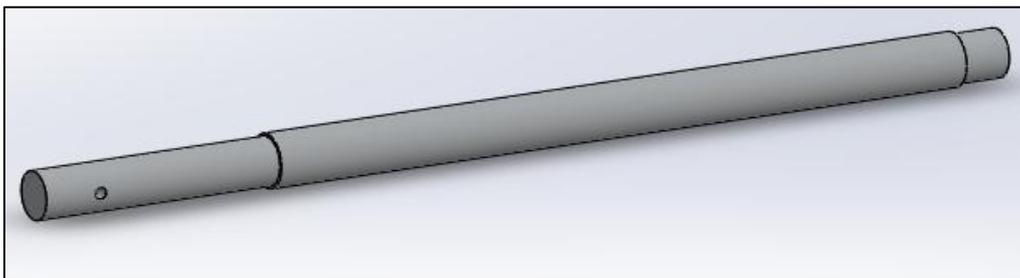


Figura 37. Vista isométrica del eje

3.4 Diseño electrónico y de control

A continuación, se propone un sistema de control en lazo cerrado, para control de los actuadores propuestos del prototipo de robot interactivo móvil mostrada en la *Figura 38*, controlada por la webcam a través de seguimiento facial. En la entrada se tiene la inicialización automática de todo el sistema en conjunto.

Para la selección de la tarjeta de control, se realiza un análisis minucioso de la velocidad de procesamiento para hacer seguimiento facial, que es el aspecto más importante del proyecto, y también que pueda reproducir pistas de audio. Además que soporte el manejo de Drivers por comunicación i2c y salidas PWM. Para la retroalimentación que soporte la utilización de una cámara web, conjuntamente con un sensor de proximidad.

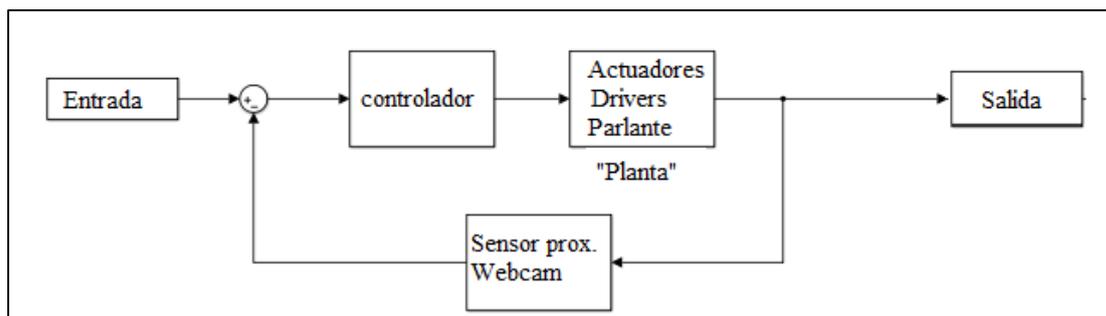


Figura 38. Sistema de control en lazo cerrado para el prototipo de robot interactivo móvil

Para el sistema de lazo cerrado de nuestro sistema de robot interactivo móvil tenemos:

- Controlador.
- Drivers (puente H) actuadores (servomotores y motores DC).
- Sensores (sensor de proximidad y Webcam).
- Parlante (reproducción de frases pregrabadas).

3.4.1 Controlador

En la actualidad gracias a la tecnología se puede adquirir diferentes tipos de controladores, que sirven según al área donde esté orientada su uso.

En la siguiente *Tabla 16*, vemos las características de algunos controladores que se ajustan a nuestro requerimiento.

Tabla 16

Controladores.

Nombre	Arduino Mega	Raspberry Pi 3	BeagleBone
Precio	\$ 30	\$ 65	\$ 105
Procesador	Atmega 2560	Quad Core	ARM Cortex-A8
Velocidad de reloj	16 Mhz	1.2 GHz	700 Mhz
RAM	8 Kb	1 Gb	256Mb
Voltaje de entrada	7-12V	5V	5V
Pin Digital	54	17	66
Pin Análogo	16	N/A	12
PWM	15	1	8
I2C	1	1	2

Fuente: (Arduino, 2017), (Raspberry, 2017), (Beaglebone, 2017)

Se selecciona un **Raspberry pi 3** porque su velocidad de procesamiento se ajusta para realizar seguimiento facial, que es la parte primordial del proyecto y por poseer la cantidad de pines suficientes para realizar el control de los actuadores, así como poseer pines para comunicación i2c. Otra de las ventajas es que su precio y accesibilidad en el mercado es muy cómodo, en comparación a otros controladores.

3.4.2 Drivers

Motores DC

Para el uso de motores DC, es necesario un driver puente H, que controle la salida y el regreso del embolo o vástago (PWM). En la siguiente **Tabla 17**, se muestra los drivers existentes que se ajustan al requerimiento.

Tabla 17

Drivers para control de motores DC

Nombre	L298N	L293D	Módulo de relés
Voltaje de alimentación	5	5	5
Voltaje de salida	46	7	30
Corriente máx.	3	2	10
Temperatura máx.	150	150	-
Motores	2	2	2
Precio	8	1	7

Fuente: (ELECTRONILAB, 2016), (StMicroelectronics, 2000), (T.Bem, 2017)

Para la selección del driver, se toma en cuenta el voltaje de salida y el amperaje necesario para controlar los motores DC, tenemos 2 actuadores de 12 V a 1.1 A, por lo que se elige el **L298N** que cumple con las condiciones dadas de voltaje de salida y corriente máxima.

Servomotores

Para el uso de los microservos y el servo motor para movimiento de las extremidades del robot, se necesita un driver que se comunice mediante i2c, capaz de controlar una cierta cantidad de servos, eliminando el ruido generado por la manipulación de muchos servos. En la Tabla 18, se describe los driver existentes que se ajustan a nuestro requerimiento.

Tabla 18*Driver para control de servo motor*

Nombre	Pololu 207	PCA 9685	USC-32
Voltaje de alimentación	5-16V	5	5
Voltaje de salida	5V	5	5
Comunicación	Serial	i2c	UART
Motores	8	16	32
Precio \$	16	14.85	33.99

Fuente: (Popolu, 2017), (Adafruit, 2017), (Llamas, 2017)

Para la selección del driver que controle los servos tomamos en cuenta que se comunique por i2c y que tenga la cantidad de puertos suficientes para controlar los servos, en este caso 7 servos, por lo que se eligió el **PCA 9685** que se ajusta a nuestro requerimiento tanto en cantidad de pines como en el método de comunicación. Además es de bajo costo y con disponibilidad en el mercado ecuatoriano.

3.4.3 Sensores

Para la adquisición de datos se utilizará dos sensores: el primer sensor medirá la distancia entre el robot y los obstáculos presentes en su entorno, evitando que se choque. El otro sensor es una webcam que adquiere datos para realizar el seguimiento facial.

Sensor de distancia

En la selección de sensores, se plantea usar un sensor de proximidad para la fase de búsqueda y evitar choques con objetos presentes en el área donde se realiza su utilización. Con la utilización de este sensor podemos usar el robot en cualquier sitio.

En la siguiente *Tabla 19*, se muestran los tipos de sensores existentes en el mercado.

Tabla 19*Sensores de proximidad comerciales*

Nombre	HC-SR04	GP2Y0A21	GP2Y0A02
Voltaje alimentación	5	5	5
Detección de distancia	2-450cm	10-80cm	20-150cm
Angulo de inducción	15°	15°	15°
Precisión	2mm	5mm	5mm

Fuente: (ELECTRONILAB, 2015), (NAYLAMP, 2014)

Se selecciona el sensor ultrasónico **HC-SR04** ya que tiene un rango amplio de distancia para detectar objetos con un margen de error aceptable, este sensor tiene una buena precisión y es compatible con raspberry a través de una librería, lo que hace muy fácil su utilización.

Webcam

Se pretende utilizar una webcam como sensor para realizar el seguimiento facial, por lo que esta debe tener una buena resolución de imagen, y que se adapte a cualquier tipo de iluminación sin afectar su desempeño.

En la siguiente *Tabla 20*, se muestran los tipos de webcam existentes en el mercado.

Tabla 20*Webcam*

Nombre	Genius 321	Genius 2020	Logitech
Enfoque	Manual	Manual	Manual
Balance	Manual	Manual	Manual
Voltaje de alimentación	5 V	5 V	5V
Resolución	640x480	1280x720	1024x768
Megapixeles	8 MP	2MP HD	5MP HD

Fuente: (Genius, 2016), (Genius, 2017), (Logitech, 2017)

Se selecciona la webcam **genius 2020**, ya que tiene una buena resolución a pesar de que no es la cámara adecuada para realizar seguimiento facial. Las cámaras que realizan este trabajo tienen un precio muy elevado, ya que necesitan una excelente resolución y un autoenfoco. Debido a que no tenemos los medios para adquirir una cámara con esas características, buscamos una cámara que se aproxime lo mejor posible, es por esa razón que seleccionamos la cámara **genius 2020**, que es una cámara con excelentes características, a un precio accesible en el mercado.

3.4.4 Baterías

Se requiere, una batería de 5V para la alimentación de los servomotores, debido a que este voltaje es ideal; sin embargo, es necesario calcular el rango de trabajo de corriente y el tiempo que va a durar la batería.

Tenemos la siguiente ecuación:

$$T = \frac{HP * 716}{RPM} \quad (46)$$

Donde:

T → es el torque del servomotor, el cual es de 0.041 kg.m.

HP → es la potencia.

RPM → es la velocidad en revoluciones por minuto.

$$0.041 \text{kg} \cdot \text{m} = \frac{HP * 716}{31.5}$$

$$HP = \frac{0.041 * 31.5}{716}$$

$$HP = 0.0018$$

Transformando a Watts $P = 1.345 \text{ [W]}$

Para el cálculo de la corriente con la fórmula de Potencia.

$$P = I \cdot V \quad (47)$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{1.345}{5}$$

$$I = 0.269[A]$$

Nota: Como vamos a trabajar con 7 servos y 2 motores DC, estos pueden activarse a la vez. Esta corriente la analizamos en el estado más crítico por lo que lo multiplicamos por 9, y nos da un consumo de:

$$I = 2.421[A]$$

Se desea que la batería trabaje un tiempo de 40 minutos:

$$C = IT \quad (48)$$

$$C = 2.421A * 0.666 H$$

$$C = 1.614[AH]$$

Ciclo de vida se desea extraer el 80% de la batería como seguridad para que el tiempo de vida útil de la batería sea aceptable.

$$Cv = \frac{1.614}{0.8} = 2.017[AH]$$

Ciclo de descarga

$$C = \frac{2.017AH}{0.5} = 4.035[AH]$$

Con lo que se concluye q se necesita una batería aproximadamente de 5 [AH] para hacer funcionar los servomotores por 40 minutos con una corriente promedio de 2.421 [A].

3.4.4.1 Selección de baterías

Con el valor calculado de una batería de 5[AH] y el voltaje de 5V, para el funcionamiento de los servomotores se elige una batería que cumpla con estos requisitos, los cual se muestra en la **Tabla 21**.

Como medida de seguridad se utilizara dos baterías para la alimentación del robot, una alimentará la potencia y la otra el control. En el caso de potencia se refiere a todos los motores, la parte de control se alimentara el raspberry.

Debido a que tenemos que alimentar dos motores DC de 12V por facilidad, se utilizara baterías de 12 voltios a 5.5AH y se procederá a utilizar convertidores DC-DC para alimentar los otros dispositivos.

Tabla 21

Batería Zippy 7.4V a 5000 mAH

Nombre	Floureon
Capacidad	5500mAH
Voltaje	3 celdas / 11.9 V
Descarga	35C Constante
Peso	423.6 g

Fuente: (Amazon, 2017)

Como se utilizara baterías de 12V a 5.5AH, es necesario realizar un reductor de voltaje DC-DC para poder alimentar, tanto la parte de potencia como de control. En la parte de potencia para alimentación de los servos se realizará una reducción a 5V y de igual forma para la parte de control para alimentar el raspberry.

3.4.4.2 Convertidor DC-DC sección potencia

En el diseño mecánico, se selecciona a los servomotores con las características de 6V en su carga máxima, pero por motivos de seguridad trabajaremos al voltaje ideal de 5V, como en ocasiones se activarán varios motores a la vez es necesario que el convertidor DC-DC soporte 9A en el caso más crítico de consumo de corriente. Como las baterías adquiridas son de 11.1V 5.5MAH; se utiliza un step-Down dc-dc converter, el cual podemos regular el voltaje de salida a 5V para su utilización, como se ve en la Tabla 22.

Tabla 22

Convertidor DC-DC

Nombre	DC-DC Converter
Corriente de salida	12A
Rango de Vin	4.5 - 30 V
Protección contra sobretensiones de salida	SI
ton	<100ns

Fuente: (ebay, 1995)

3.4.4.3 Convertidor DC-DC sección control

La conversión de voltaje para la alimentación de la placa de control (raspberry), se sabe que trabaja a 5V y su consumo de corriente es bajo, por lo que se utiliza un Hobbywing (interruptor de modo final BEC), el cual tiene un voltaje de salida fijo a 5V o 6V, cuyas características se detallan en la Tabla 23.

Tabla 23

Convertidor DC-DC sección control

Nombre	Hobbywing interruptor de modo final BEC
Corriente de salida	3A.
Rango de Vin	5.5 - 26 V
Protección contra sobretensiones de salida	SI
ton	<100ns

Fuente: (ebay, 2000)

3.4.5 Diseño de control

Diagrama de flujo de la secuencia de trabajo del robot

En la siguiente Figura 39, se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la secuencia o proceso que va a realizar el robot interactivo móvil para seguimiento de niños con trastorno del espectro autista.

Frases

a = "Hola mi nombre es Eva"

b = "Quieres divertirte junto a mi"

c = "Tengo un juego que te podría gustar"

d = "Se trata del juego de las escondidas"

e = "Debes empezar mirándome a los ojos"

f = "Y si lo dejas de hacer yo te seguiré"

g = "Empecemos a jugar"

h = "3,2,1. Ahora"

i = "Que emocionante, te veo, te veo"

j = "Eres genial sigamos jugando"

k = "Donde estas no te puedo encontrar"

l = "Te escondiste excelente, mírame otra vez"

m = "Eres un buen jugador"

n = "Te encontré eres un jugador genial"

o = "Ahora somos amigos. Adiós, jugaremos en otra ocasión"

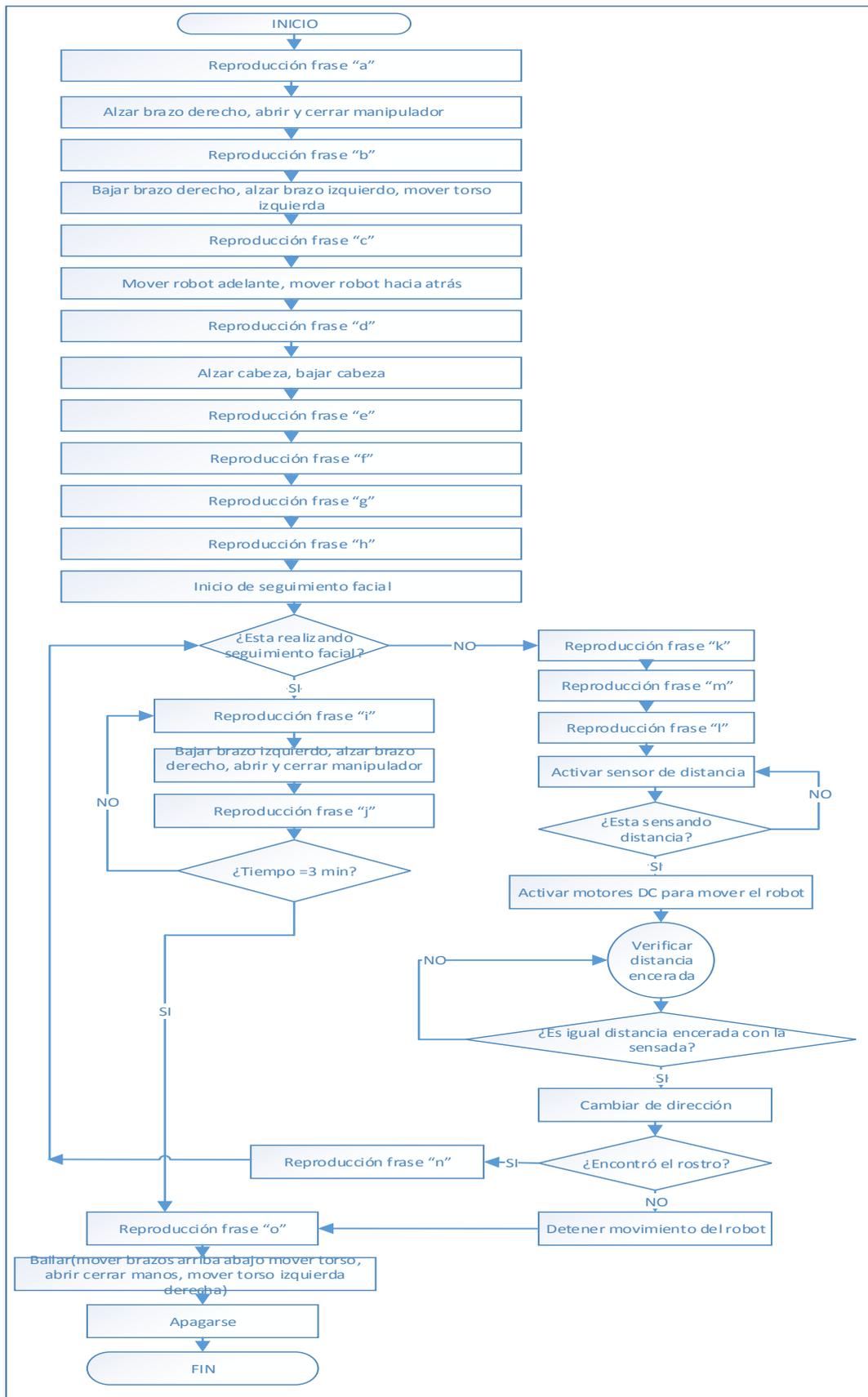


Figura 39. Diagrama de flujo de la secuencia de trabajo del robot

4. CAPÍTULO IV

IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo, se muestra la implementación del robot interactivo móvil para seguimiento de niños con trastorno del espectro autista. La implementación de la estructura se la realiza a partir de modelos en impresión 3D realizados mediante el diseño CAD, y finalmente se realiza la instalación de los componentes electrónicos como drivers, actuadores, sensores, controlador, alimentación y accesorios.

4.1 Implementación del proceso, equipo o máquina

Para la realización de las partes en impresión 3D se requiere de impresoras cartesianas que llevan desde un diseño CAD a una réplica real a través de inyección de ABS, acumulando material sobre una plataforma capa por capa.

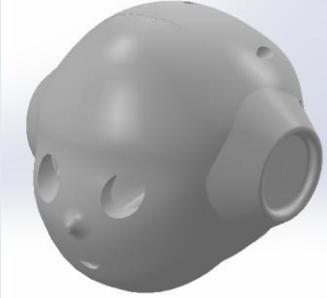
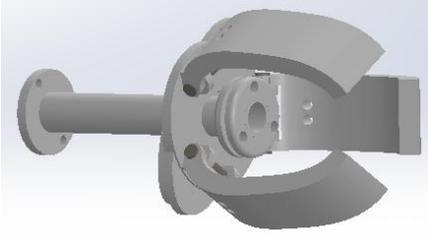
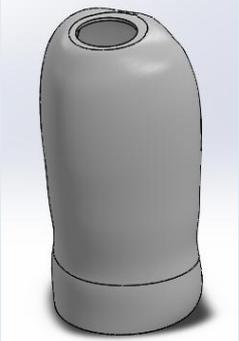
Las impresoras 3D inyectan polímero secuencialmente para crear el objeto haciéndolos resistentes. Se funde el filamento en la boquilla de extracción, y deposita el plástico por capas, realizando un prototipado rápido, utilizados en diferentes áreas como una herramienta primordial para recrear formas complejas.

En la Tabla 24, se muestra los resultados de las impresiones 3D versus el diseño realizado en software.

En el cual se pudo comprobar el acabado que en la impresión 3D logro realizar las formas diseñadas en el simulador CAD, siendo el método más barato comparado con otros métodos, como: inyección de plástico, mecanizado o CNC.

Estos otros métodos serían muy costosos por debido a que el diseño tiene formas complejas de realizar.

Tabla 24*Resultados de la impresión 3D*

Diseño CAD	Impresiones 3D
	
	
	
	
	

El principal inconveniente de la impresión 3D, es su acabado superficial áspero, ya que la inyección del polímero lo realiza por capas. Para corregir este inconveniente se procede a lijar la superficie hasta dejarla lisa.

En la Figura 40, se muestra la impresión del tronco del robot.



Figura 40. Impresora 3D en creación tronco del robot

Para la etapa de pulimiento se realizó con lijamiento húmedo, que quiere decir, un proceso de desbaste mediante un papel de lija previamente mojado en agua, esto permite que se retiren capas muy finas de plástico, continuamente se remoja la lija mientras se avanza con el pulimiento aplicando una presión suave en movimientos circulares por la superficie.

La clave de conseguir un acabado excelente es usar unalija con granos lo más finos posibles, y usar granos más gruesos en las zonas donde existe mayor imperfección y retomar el papel de lija más fino para eliminar los arañazos ocasionados por la lija gruesa y uniones de capas de impresión 3D.

El paso previo para darle el acabado final, se lo realiza aplicando una capa de abrillantador para carros que ayudara a proteger los daños ocasionados por el tiempo y a la vez remover suciedades de forma fácil. En la Figura 41, se muestra el acabado final de partes del robot.



Figura 41. Acabado final de partes del robot

Finalmente se le dio una capa de pintura extra con los colores acordados con nuestra tutora y los terapeutas de la fundación. Siendo esta pintura tipo esmalte brillante que es perfecta para que no se diluya con el agua, dándole un acabado muy agradable. Se utilizó una pistola a compresión casera para pintar, y con la ayuda de cinta adhesiva de papel para separar los colores utilizados, teniendo como resultado final lo que se muestra en la Figura 42.



Figura 42. Pintado final de la estructura

4.2 Ensamblaje de las partes mecánicas

En este parámetro se presenta el ensamblaje del prototipo de robot utilizando pernos y tuercas accesibles en el mercado.

4.2.1 Ensamblaje del manipulador al brazo

En la Figura 43, se muestra el ensamble mecánico del manipulador al brazo, el cual está formado por el motor que hace girar el manipulador que se encuentra fijo en la muñeca, el cual se incrusta en el brazo por la unión de este al eje del motor.

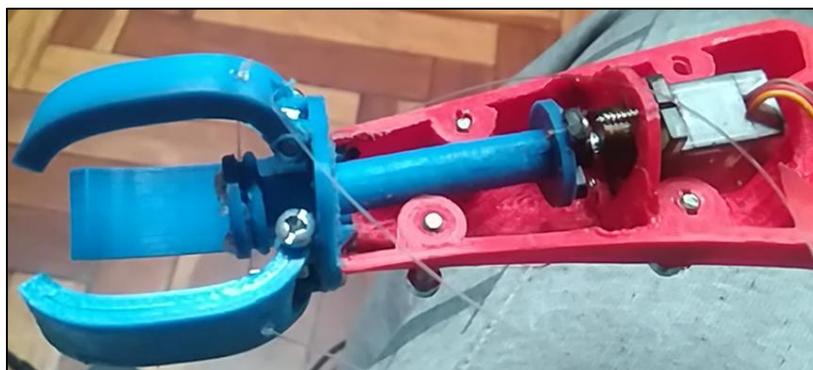


Figura 43. Ensamble de manipulador brazo

Para la unión de los dedos al eje del manipulador, se realizó mediante pernos. En medio de la unión del dedo y el perno se ubica un resorte a torsión para que los dedos estén abiertos. Para realizar el cierre del dedo se implementó amarrar el extremo final del eje del manipulador a cada dedo con hilo nailon, de esta forma cuando el eje gira, tensiona el nailon y los cierra. Y para el regreso a su posición actúan los resortes a torsión.

4.2.2 Ensamblaje del brazo al tronco

En la Figura 44, se muestra el ensamble mecánico del brazo al tronco utilizando la misma adaptación del manipulador al brazo. Se tiene el motor fijo en el hombro del tronco, y el brazo se incrusta en el eje del motor ajustado por un perno al eje del mismo.

En la unión del brazo y el tronco se diseñó de tal forma que se tiene una ceja que sirve de guía para ayudar en la sujeción, y que permita que el eje del motor no fleje debido al peso y manipulación del mismo. La guía hace que el brazo coincida con un juego mínimo.



Figura 44. Ensamble de brazo tronco

4.2.3 Ensamblaje de la cabeza al tronco

En la Figura 45, se muestra el ensamble mecánico de la cabeza al tronco utilizando una varilla de aluminio que se incrusta en el tronco y sujeta al mecanismo donde reposan los motores para darle el movimiento a la cabeza, esta varilla se ajusta al eje del motor que mueve la cabeza en sentido horizontal.



Figura 45. Ensamble cabeza tronco

El mecanismo que se utilizó para la adaptación de los dos micros servos es comúnmente utilizado en los robots que tienen dos grados de libertad en la cabeza, tal como se muestra en la Figura 46.

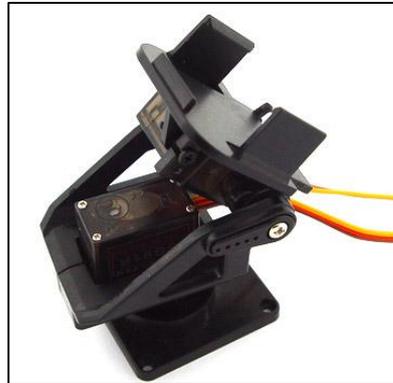


Figura 46. Mecanismo para dar movimientos a la cabeza

Este mecanismo está sujeto a la parte trasera de la cabeza haciéndola que rote sobre su propio eje.

La varilla hueca que sujeta al mecanismo, y da el movimiento a la cabeza se introduce en otra varilla fija del tronco con un diámetro mayor para que entre con un poco de holgura. Para que no exista descentraciones al giro de la cabeza se le realizó un taladrado de un lado al otro en la unión de los ejes y se le paso un perno para que solo tenga un sentido de ubicación.

4.2.4 Ensamblaje del tronco a la base

En la Figura 47, se muestra el ensamble mecánico del tronco a la base, utilizando la misma adaptación de la cabeza al tronco, por la ayuda de una varilla hueca y para ajustarle se le taladro un orificio de lado a lado, ubicándole un perno y posicionándole siempre en el mismo sentido.

Para cuando se genere el movimiento y la varilla no soporte todo el peso del tronco adaptado los brazos y cabeza, se diseñó una guía en la unión de los mismos para que esta ayude, a que no sufra deformaciones ocasionadas por el peso y el movimiento de rotación.



Figura 47. a) Ensamble del tronco a la base b) Varilla que une la base con el tronco

La transmisión de movimiento se realizó por un piñón y engrane con una relación 1:1, con la finalidad que el eje del motor no soporte todo el peso de la estructura del robot como se mencionó en el capítulo de diseño.

4.3 Implementación de los componentes electrónicos

La implementación de los componentes electrónicos se fundamenta en la conexión de todos los componentes a la tarjeta de control.

4.3.1 Implementación del circuito electrónico

En la Figura 48, se muestra la conexión que se realizó de los componentes electrónicos necesarios utilizados para la creación del robot interactivo móvil.

El esquema representativo muestra la conexión directa de todos los componentes gracias a la diversidad de pines de la placa de control, se aprovechó al máximo sus entradas como salidas.

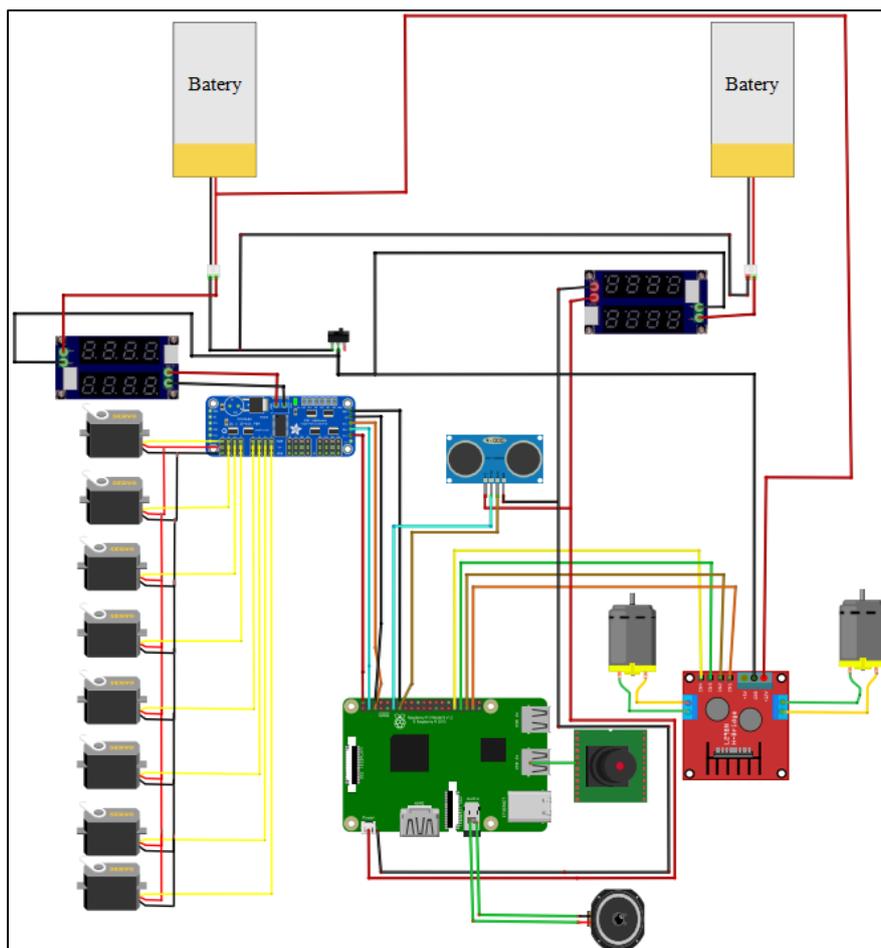


Figura 48. Conexión de componentes electrónicos

Como se mencionó en la instancia anterior, está la implementación del driver que controla los servomotores mediante la comunicación i2c y la placa de control. Los pines del driver PCA-9685 alimentado a 5V GND, OE, SCL, SDA, VCC, se conectan con los pines del raspberry 6, 14, 5, 3, 2 respectivamente. Sus pines de salida se conectan a los servos desde el canal 0 hasta el 6.

En la segunda instancia está la conexión del driver L293N alimentada a 12V para controlar los motores DC con la placa de control, los pines del driver ENA, IN1, IN2, IN3, IN4, INB, se conectan con los pines del raspberry 38, 37, 35, 33, 31, 36 respectivamente. Sus salidas se conectan a los motores DC.

En la tercera instancia la conexión de los pines del sensor ultrasónico (hc-sr04) alimentado a 5V. Los puertos Trig y Echo, se conectan con los pines del raspberry 11,13 respectivamente.

Como cuarta y última instancia está la conexión de la webcam a cualquier USB de entrada, y el parlante conectado al plug de salida de audio único que tiene el raspberry.

4.4 Programación del sistema de control

La programación se realizó en código libre Python, dentro del sistema operativo propio del raspberry. Haciendo uso de programación múltiple se creó varias ventanas para programar de una forma ordenada y muy entendible.

Para lograr la finalidad del proyecto en el área de programación se trabajó con la librería openCV, que es una librería libre de visión por computador, conjuntamente con detección facial con la ayuda del haarcascade, que en su inicio reconoce caras planas, lo cual se le realizó un entrenamiento para que reconozca varios ángulos y partes del rostro debido a que los niños, tienden a agachar la cabeza o mirar en cualquier dirección perdiendo el interés de la actividad de forma rápida. El entrenamiento se realiza a partir de imágenes negativas y positivas: Por negativas nos referimos a imágenes que no tienen relación con los ángulos del rostro, y por positivas a imágenes donde se visualice los diferentes ángulos del rostro.

Entre mayor cantidad de imágenes mucho mejor será. Con este entrenamiento se logró una mejor sensibilidad en la realización de la búsqueda. En la Figura 49, se muestra el diagrama de flujo, indicando la secuencia de la función detectar rostro.

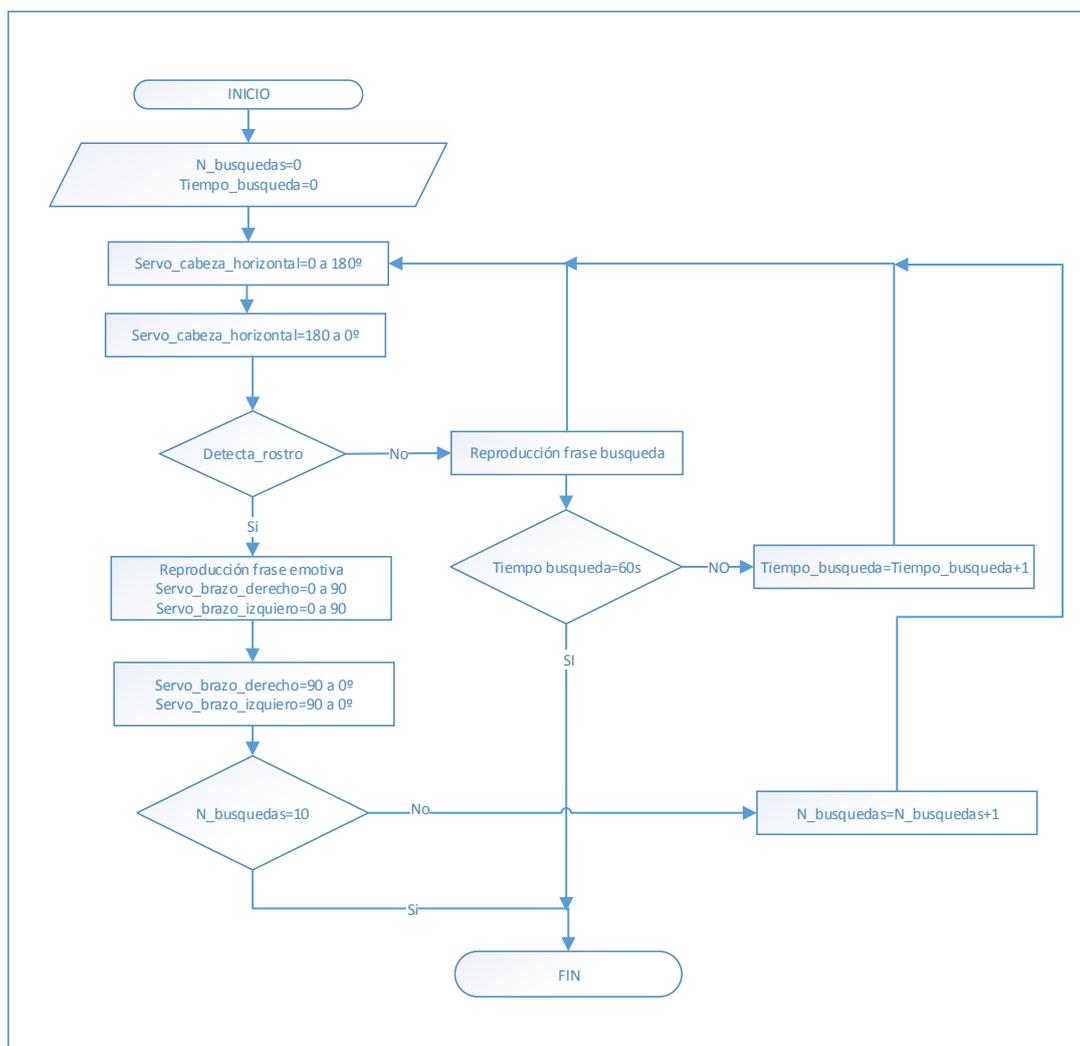


Figura 49. Diagrama de flujo para la función detección de rostro

Para ejecutar órdenes en paralelo se realizó programación por hilos que nos ayudará a ejecutar varias órdenes en un mismo tiempo, ayudando así a que la interacción del robot sea más natural. En la función detectar rostro se inicializa en paralelo, otra función que la llamamos búsqueda, que se fundamenta en que el robot se mueva por el sitio y con la ayuda del sensor ultrasónico detecte objetos de su entorno y no se choque, esta distancia adquirida será mucho menor a la distancia de enfoque de búsqueda de la cámara para que no confunda al niño como un objeto. En la Figura 50, se muestra el diagrama de flujo que indica la secuencia de la función búsqueda que se ejecuta en paralelo con la función detectar rostro.

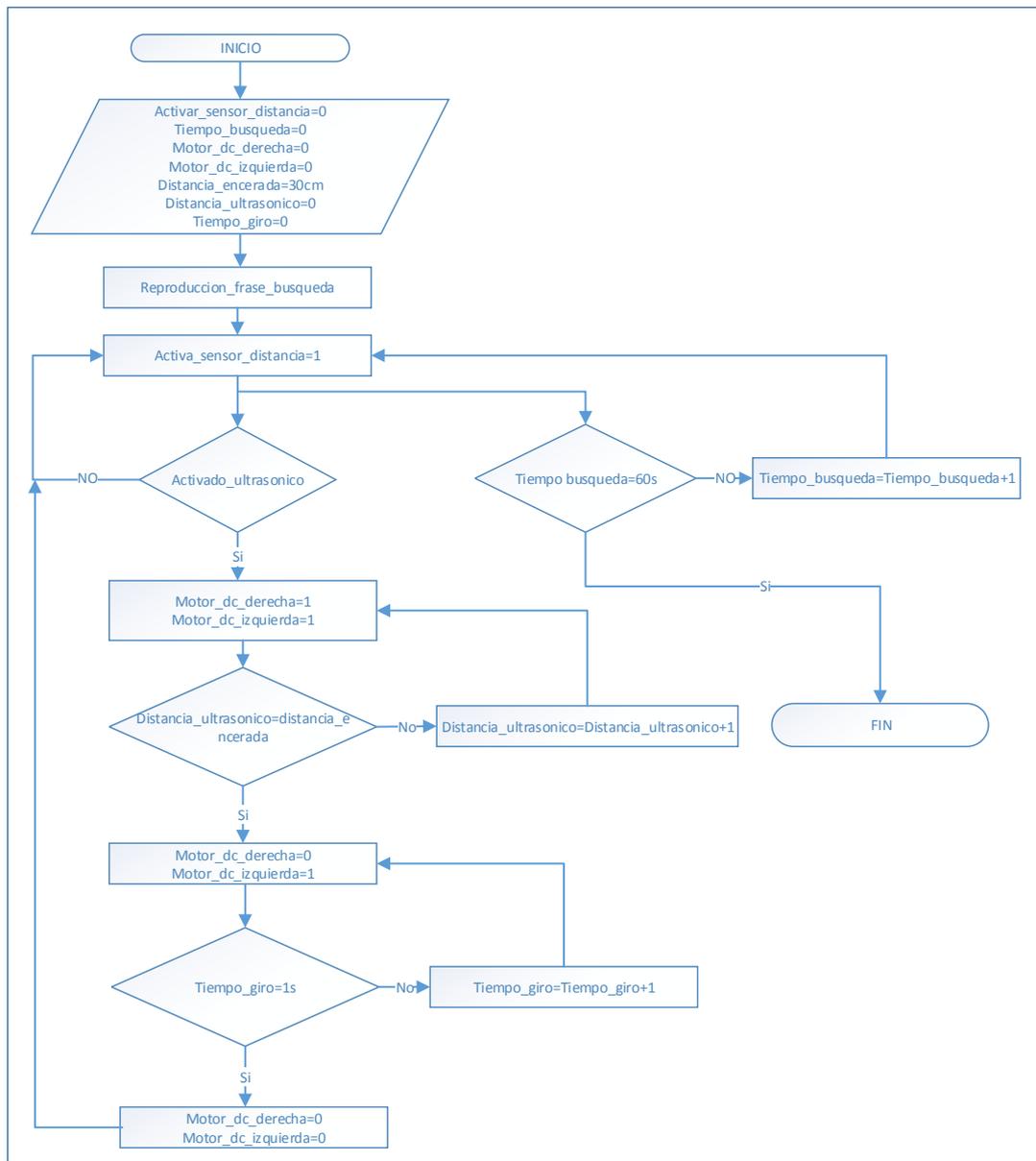


Figura 50. Diagrama de flujo de la función búsqueda

En la Figura 39, mostrado en el capítulo anterior se visualiza el diagrama de flujo del funcionamiento completo del robot, que realiza en las terapias cuando interactúa con el niño.

5. CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo las pruebas y resultados se procede a dividirlos en dos secciones: del sistema mecatrónico en general, y el grado de interés que mostraron los niños al interactuar en las distintas sesiones con el robot.

5.1 Pruebas de equipo o máquina

5.1.1 Protocolo de prueba para tiempo de trabajo del mecanismo

Se verifica que el tiempo de trabajo del mecanismo que cumpla acorde a lo calculado de forma correcta. En la Tabla 25, se detalla el protocolo de prueba.

Tabla 25

Protocolo de pruebas de tiempo de trabajo del mecanismo

PROTOCOLO DE PRUEBA DE TIEMPO DE TRABAJO DEL MECANISMO	
Responsables	Victor Mendoza Maxwell Veintimilla
Procedimiento	1)Encender el prototipo
Útiles	Cronómetro
Protocolo	Energizar el sistema e iniciar la secuencia repetidamente
Verificación	Verificar que cumpla todas las secuencia en cada interacción

5.1.2 Resultados de prueba del mecanismo

Tomando en cuenta el protocolo de prueba planteado, se activa el robot para que realice la secuencia de funcionamiento completa, en cada iteración que se realice durante su tiempo de trabajo. Este tiempo se lo tomo a través de un cronómetro para verificar que cumple con el tiempo planteado de funcionamiento de 40 minutos diarios, tomados en varios días, teniendo un resultado satisfactorio de desempeño como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26

Tabla de resultados del tiempo de trabajo del mecanismo

Día	tiempo de trabajo (min)	Iteraciones de trabajo	Secuencias en cada iteración
1	40	7	Completa
2	45	8	Completa
3	42	7	Completa

5.2 Pruebas de componentes eléctricos y electrónicos

5.2.1 Protocolo de prueba para componentes electrónicos

Las pruebas se enfocan al funcionamiento de los servomotores, que realizan los movimientos a través de sus ángulos de trabajo establecidos. El procedimiento de prueba se detalla en la Tabla 27.

Tabla 27

Protocolo de prueba de servo motores

PROTOCOLO DE PRUEBA DE SERVO MOTORES	
Responsables	Victor Mendoza Maxwell Veintimilla
Procedimiento	Activar los servomotores.
Útiles	Puerto serial.
Protocolo	Mover los motores hasta las posiciones máximas y mínimas establecidas.
Verificación	Verificar que llegue a los ángulos establecidos con la ayuda del puerto serial.

5.2.2 Resultados de la prueba de componentes electrónicos

Se comprueba que los servomotores funcionen correctamente. En la Tabla 28, se enlistan los resultados obtenidos en la pruebas.

Tabla 28

Resultados en las pruebas de los servo motores

Servo motores	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor medio	Ángulo mínimo	Ángulo máximo	Ángulo medio
Cabeza horizontal	200 bits	600 bits	400 bits	0°	180°	90°
Cabeza vertical	300 bits	400 bits	-	45°	135°	-
Brazo derecho	200 bits	400 bits	-	0°	90°	-
Manipulador derecho	200 bits	600 bits	-	0°	180°	-
Brazo izquierdo	200 bits	400 bits	-	0°	90°	-
Manipulador izquierdo	200 bits	600 bits	-	0°	180°	-
Tronco	300 bits	500 bits	400 bits	45°	90°	135°

5.3 Pruebas del sistema de control

Las pruebas del sistema de control están enfocadas a la verificación de la detección del rostro en varios ángulos, que se generan cuando el sujeto de prueba cambia de posición.

5.3.1 Protocolo de prueba de reconocimiento de rostro

Se lleva a cabo analizando las diferentes posiciones del rostro, o a la vez parte del rostro que puede captar la cámara, gracias a la programación realizada. Se corrobora que la programación pueda captar un rostro o parte de él de forma fiable, siguiendo el procedimiento de la Tabla 29.

Tabla 29

Protocolo de prueba de la detección facial

PROTOCOLO DE PRUEBA DE DETECCIÓN FACIAL	
Responsables	Victor Mendoza Maxwell Veintimilla
Procedimiento	Iniciar la función de detección facial. Ubicar el rostro en varias posiciones al taparse parte del rostro. Esperar la detección del rostro.
Útiles	Terminal serial de la webcam.
Protocolo	Durante las pruebas hacer los cambios de movimientos de forma rápida.
Verificación	Verificar la sensibilidad de detección del rostro a movimientos bruscos. Verificar detección de partes del rostro.

En la realización de las pruebas se notó que en momento que se realiza la interacción de búsqueda facial, el niño debe estar a una distancia mínima de un metro de radio, ya que los niños tienen un comportamiento impredecible y pueden ocasionar acciones que afecten al robot en su funcionamiento. En la Figura 51, se muestra la distancia prudente de interacción entre el niño y robot.

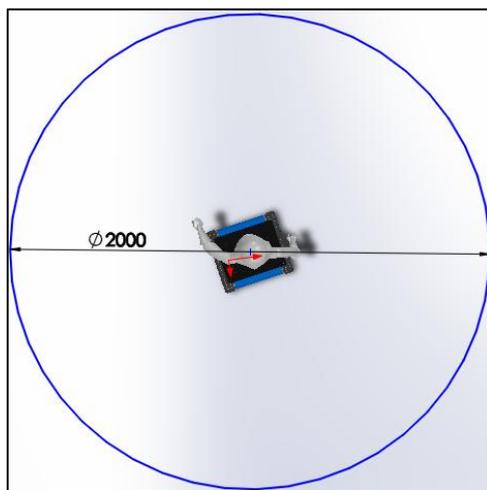


Figura 51. Radio mínimo de trabajo para la interacción con el niño.

5.3.2 Resultados de la prueba de seguimiento facial

Para la validación de la detección facial se verifica la efectividad del entrenamiento realizado al haarcascade y su sensibilidad para la captación de rostro en un rango trabajo, de 1 hasta 3 metros, como se muestra en la Figura 52 (detección del rostro de la parte inferior), Figura 53 (detección de rostro de la parte superior), Figura 54 (detección del rostro del lado izquierdo), Figura 55 (detección de perfil derecho del rostro), y Figura 56 detección del perfil izquierdo del rostro.

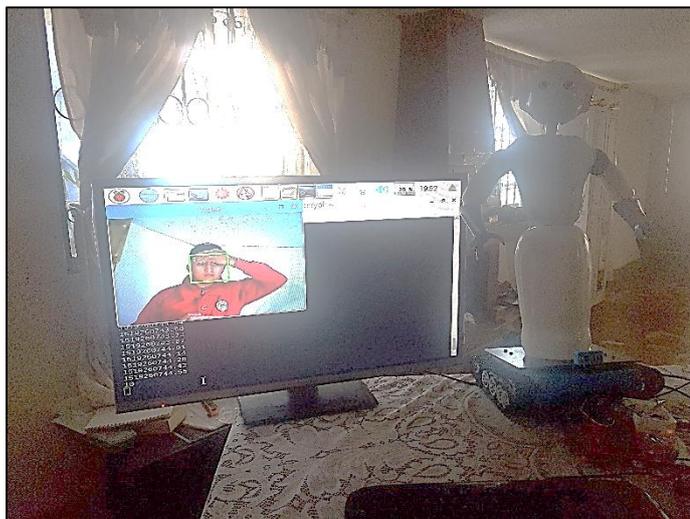


Figura 52. Detección de rostro parte inferior

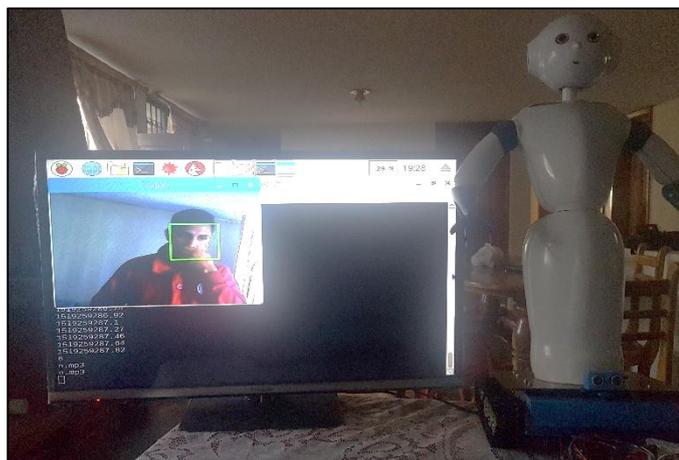


Figura 53. Detección de rostro parte superior

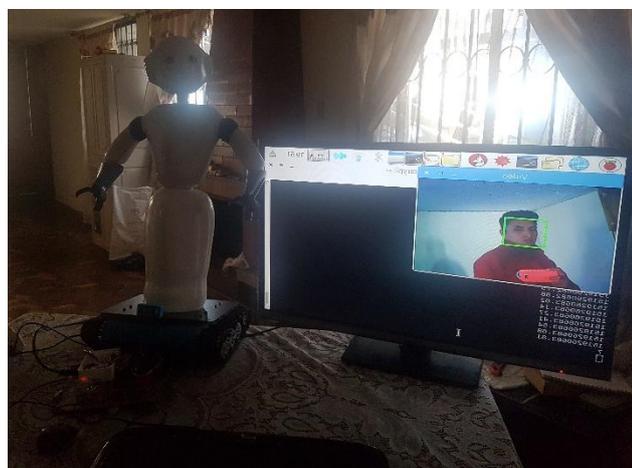


Figura 54. Detección de rostro lado izquierdo

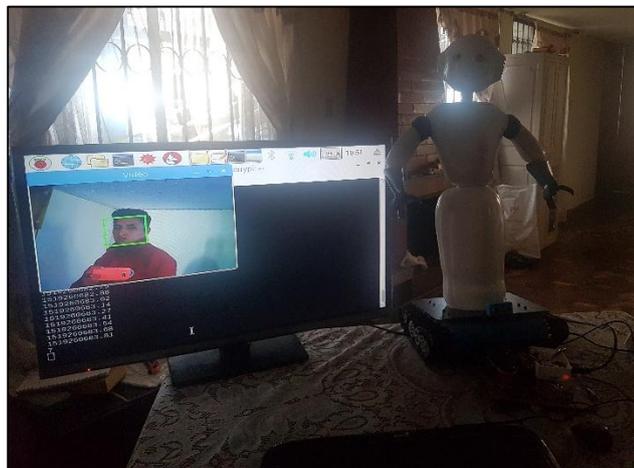


Figura 55. Detección de rostro perfil derecho



Figura 56. Detección de rostro perfil izquierdo

5.4 Prueba del sistema mecatrónico

Las pruebas del sistema mecatrónico se centran en el funcionamiento en conjunto de todo el robot, tomando en cuenta el ámbito interactivo, realizados en varias sesiones como parte principal del proyecto llevadas a cabo en la fundación Virgen de la Merced.

5.4.1 Protocolo del sistema conjunto interactuando con los niños

Se realizó 5 sesiones con los niños con trastorno del espectro autista con nivel de autismo leve y medio, ya que con ellos tienen una aceptación moderada a relacionarse con el medio. En el caso de niños con un nivel de autismo severo el robot propuesto no podría trabajar, debido a que ellos no tienen desarrollada la capacidad de relacionarse con su entorno.

Los parámetros de evaluación son aceptación, interactividad, comodidad, siguiendo el protocolo de la Tabla 30.

Tabla 30

Protocolo de prueba de la detección facial

PROTOCOLO DE PRUEBA DE DETECCIÓN FACIAL	
Responsables	Victor Mendoza Maxwell Veintimilla
Involucrados	Niños con trastorno del espectro autista leve, medio y agudo.
Procedimiento	Iniciar el funcionamiento del robot. Pedir al niño se siente cerca del robot para que interactúe con él. Registrar el la aceptación, interactividad y comodidad.
Útiles	Aula manitas inquietas, webcam.
Protocolo	Realizar una encuesta de aceptación del proyecto a las terapeutas que trabajan con los niños.
Verificación	Verificar que los niños acepten e interactúen progresivamente con el robot en cada sesión.

5.4.2 Resultados de pruebas del sistema conjunto

Para la fase de resultados se tabuló el comportamiento que tuvieron los niños al momento de interactuar con el robot, en cada una de las 5 sesiones realizadas.

En la Tabla 31, refleja la obtención de resultados en cada sesión realizada con los niños de diferente nivel de autismo, evaluando en primera instancia la aceptación del robot, haciéndolo parte de su entorno, en segunda instancia la interacción niño-robot, y como última instancia el nivel de aceptación durante todo el tiempo que el niño se sometió a la terapia con el robot.

Tabla 31*Tabulación de datos de la primera sesión*

		Autismo Leve		Autismo Medio		Autismo Severo
		Sujeto de prueba (a)	Sujeto de prueba (b)	Sujeto de prueba (c)	Sujeto de prueba (d)	Sujeto de prueba (e)
Aceptación	Sesión 1	5	4	3	3	2
	Sesión 2	6	5	4	5	3
	Sesión 3	7	7	5	5	3
	Sesión 4	8	9	6	7	4
	Sesión 5	9	10	8	8	5
Interacción	Sesión 1	4	3	3	3	0
	Sesión 2	5	4	3	4	0
	Sesión 3	7	6	6	6	3
	Sesión 4	9	8	8	7	1
	Sesión 5	9	10	9	9	3
Comodidad	Sesión 1	7	8	5	6	2
	Sesión 2	7	7	6	6	2
	Sesión 3	7	8	7	7	3
	Sesión 4	9	8	7	9	4
	Sesión 5	10	9	9	10	5
Leyenda	Excelente= 10-9 Muy Buena= 8-7 Buena=6-5 Regular=4-3 Mala=2-0					

En la Figura 57, refleja los resultados de la aceptación que tiene el niño sobre el robot en un ambiente nuevo. En las primeras sesiones se notó un grado de aceptación “bueno”, ya que es algo nuevo con respecto a sus acciones cotidianas en la fundación, por lo que no se adaptan al cambio de rutina.

A medida que se realizan las sesiones el grado de aceptación aumenta de forma satisfactoria hasta “excelente”, como parte inicial de inclusión en algo fuera de lo cotidiano.

Como los niños con autismo están separados en tres grupos según su nivel de autismo, se vio una aceptación “muy buena” de los niños con autismo leve y medio,

ya que ellos tienen un cierto interés en su entorno mientras que con el niño que padece autismo severo el grado de aceptación es mucho más bajo que los otros dos casos.

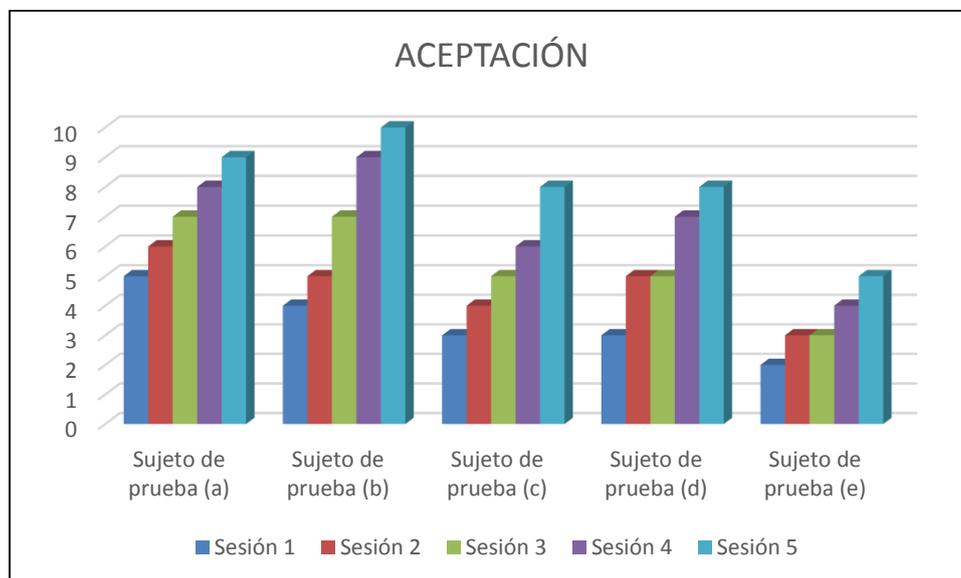


Figura 57. Resultado de la aceptación del robot por los niños

En la Figura 58, refleja los resultados de la interacción del niño con el robot. En las primeras sesiones siente un grado de interacción regular, ya que es algo desconocido en su rutina. A medida que avanza las sesiones tienen una mejoría en la interacción con el robot, obteniendo resultados satisfactorios.

Como se mencionó anteriormente en los niveles leve y medio se obtuvo un resultado creciente en cuanto a la interacción, mientras que en los niños con grado severo se notó que la interacción con el robot no tiene un resultado favorable.

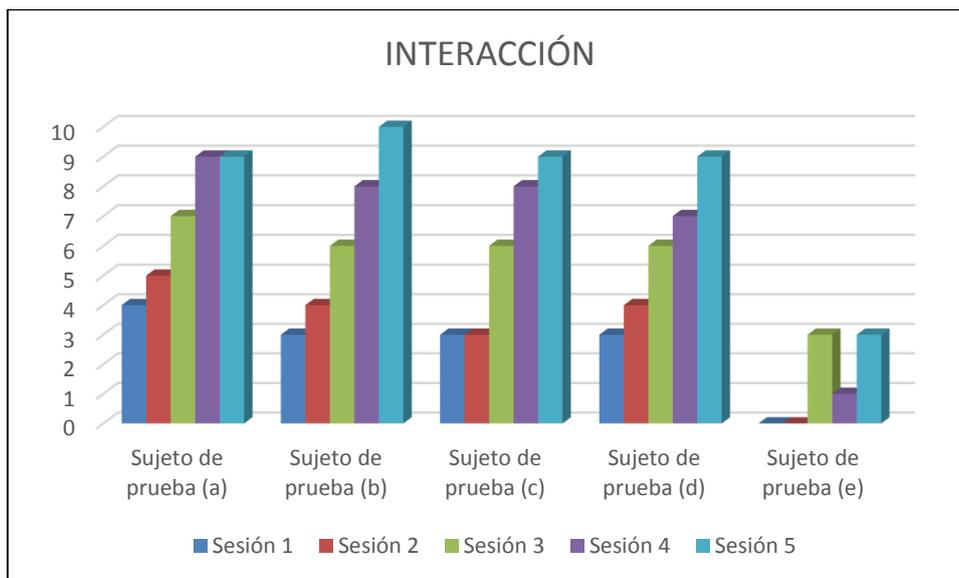


Figura 58. Resultado de la interacción entre el niño-robot

En la Figura 59, refleja los resultados del grado de comodidad que siente al niño en toda la sesión. Teniendo una mejoría en los tres niveles de autismo de forma satisfactoria, debido al estudio que se realizó en cuanto a colores, tonalidad de voz y movimientos que realizaría el robot.

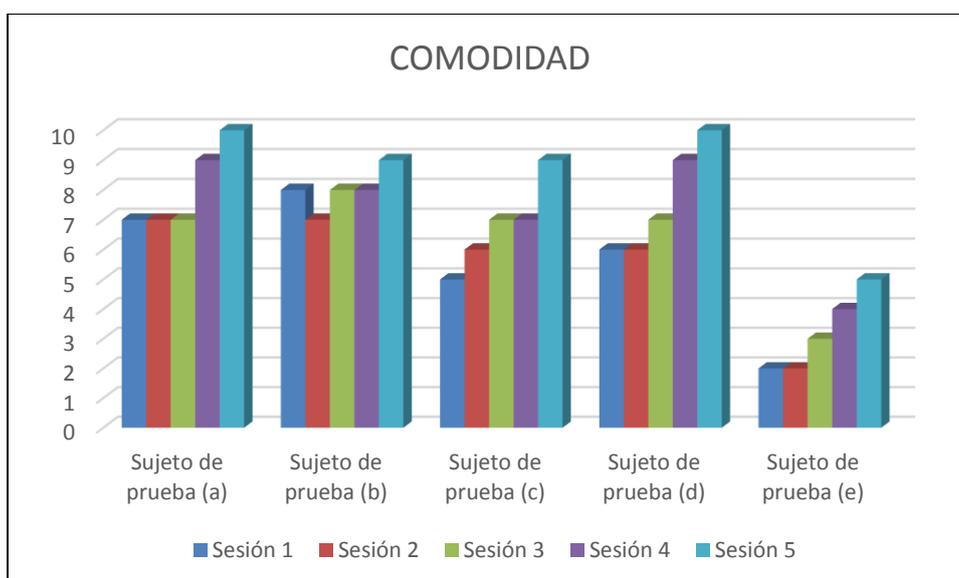


Figura 59. Resultado de la comodidad en la interacción niño robot

Como parte adicional para la verificación del sistema en conjunto se realizó una encuesta a las terapeutas de la fundación Virgen de la Merced, quienes trabajan con los niños autistas, referente a la evaluación realizada por ellas en la evolución del comportamiento de los niños durante las sesiones, en la parte de interacción con el medio.

El resultado de las encuestas realizadas, se encuentra tabulado en la Tabla 32, que se muestra a continuación.

Tabla 32

Tabulación de la encuesta realizada a las terapeutas de la fundación Virgen de la Merced

Parámetros	Resultados			Media	Evaluación/100
Encuestado/a	1	2	3		
Ocupación en la fundación	Terapeuta	terapeuta	terapeuta	NA	NA
Diseño robot	10	10	10	10.00	100.00
Tonalidad de voz	10	9	9	9.33	93.33
Secuencia que realiza el robot	10	9	10	9.67	96.67
Facilidad de uso	9	9	9	9.00	90.00
Aceptación de los niños al robot.	9	10	9	9.33	93.33
Interacción de los niños con el robot	9	9	9	9.00	90.00
Comodidad del niño con el robot	10	9	10	10.00	100.00
Total				9.48	94.76
Leyenda	Excelente= 10-9 Muy Buena= 8-7 Buena=6-5 Regular=4-3 Mala=2-0				

En la Figura 60, refleja los resultados de la encuesta realizada a las terapeutas de la fundación Virgen de la Merced teniendo un aceptación general de 94.76% del proyecto, que es un valor estimado satisfactoriamente alto. Se tiene una buena aceptación en los parámetros de la encuesta, tales como: la estética, la facilidad de

uso, las secuencias que realiza para interactuar. La parte fundamental del proyecto es la evaluación de mejora del niño referente a la intervención del robot en su vida cotidiana.

Si se incluye el robot como ayuda en el área de interacción, se obtendrá un resultado muy notorio en el cambio de actitud de los niños, mostrando más interés por su entorno y tratando de relacionarse con él.

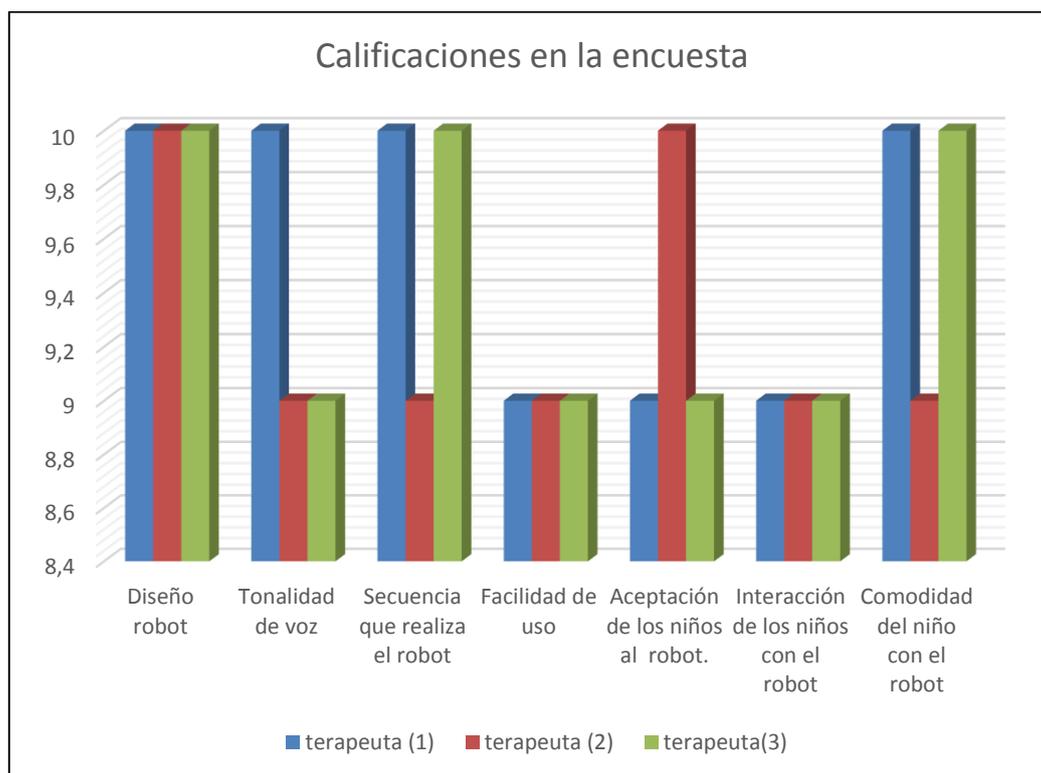


Figura 60. Resultados de la encuesta realizada a las terapeutas de la fundación Virgen de la Merced

5.5 Análisis financiero

Para la realización del análisis financiero se lo clasifica en costos directos y costos indirectos.

5.5.1 Costos directos

Son aquellos que intervienen directamente con la producción en el ámbito: de mano de obra directa, materiales, equipos, combustible y subcontratistas.

5.5.1.1 Costos de materiales directos

A continuación se detalla en la Tabla 33, describiendo parámetros, tales como: materiales mecánicos, materiales para la eléctricos/electrónicos, materiales para la estructura, accesorios eléctricos/electrónicos, y accesorios para la estructura.

Tabla 33

Costo de materiales directos

	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Materiales mecánicos	Rueda loca	2	3.5	7
	Resortes a torsión	6	0.25	1.5
	Rodamientos	2	1	2
Materiales eléctrico/electrónico	Baterías	2	50	100
	PCA-9685	1	20	20
	L298N	1	6	6
	Hobbywing interruptor	1	3.5	3.5
	Dc-Dc converter	1	12	12
	Hc-sr04	1	3	3
	Webcam	1	67	67
	Raspberry pi3	1	67	67
	Amplificador de audio	1	4.5	4.5
	Parlantes	2	2.5	5
Materiales para la estructura	Eje	1	3.25	3.25
	Varilla de aluminio hueca	1	6	6
	Oruga de tracción	1	70	70
	Servo Motores	7	8	56
	Motores DC	2	5.9	11.8
Accesorios eléctrico/electrónicos	Cables	-	8.7	8.7
	Estaño	-	4	4
	Taype	1	1.5	1.5
	Interruptor	1	1	1
Accesorios para la estructura	Tuercas	-	-	2.5
	Pernos	-	-	4.3
Total				467.55

5.5.1.2 Costos de mano de obra directa

Son los costos que corresponden a las personas que intervinieron en la implementación del proyecto. En este caso es de los tesistas y la directora de tesis. A partir del sueldo básico 386 \$ se calcula el valor de hora de trabajo para los tesistas que equivale a 2.41\$. El costo de hora del director de tesis se calculó a partir del sueldo promedio que ganan que es de 2400\$ dando un valor de hora 15\$. En la Tabla 34, que se muestra a continuación se detalla el costo de mano de obra.

Tabla 34

Costo de mano de obra directa

Descripción	Cantidad horas	Precio unitario	Precio total
Tesistas	200	2.41	482
Director del proyecto	10	15	150
Total			632

5.5.1.3 Costos total directo

Es la suma del costo de materiales directos, más la suma de mano de obra directa. En la Tabla 35, que se muestra a continuación se detalla el costo total directo.

Tabla 35

Costo total directo

Descripción	Costo
Costo de materiales directos	467.55
Costo de mano de obra directa	632
Total	1099.55

5.5.2 Costos indirectos

Son aquellos que no intervienen directamente con la elaboración del proyecto, pero son indispensables para realizarlo. En la Tabla 36, se detalla los costos indirectos que se toman en cuenta en la elaboración del proyecto.

Tabla 36*Costos indirectos*

	Días	Horas	Costo por hora	Costo total
Electricidad	107	200	0.082	16.4
Internet	107	200	0.05	10
Agua potable	107	200	0.01	2
Total				28.4

5.5.3 Costos totales

El costo total del proyecto es la suma de costos directos e indirectos. En la Tabla 37, se detalla el costo total del proyecto.

Tabla 37*Costo total del proyecto*

Descripción	Costo
Costo directos	1099.55
Costo indirectos	28.4
Total	1127.95

6. CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar el diseño y construcción de un prototipo de robot móvil interactivo para seguimiento de niños con trastorno del espectro autista, se obtuvo los siguientes resultados.

- Grados de libertad: 9°.
- Tiempo de funcionamiento: 40 minutos trabajo diario
- Fuente de alimentación: Baterías lipo DC 11.1V 5.5Ah.
- Material de la estructura: Acero A36 mecanizado estructura interna, PLA impresión 3D estructura externa.
- Tiempo de carga de baterías: 3 – 4 horas.

Para la implementación del seguimiento facial se entrenó al clasificador HAAR-cascade capturando imágenes positivas (imágenes de caras en diferentes ángulos), e imágenes negativas (imágenes sin caras), permitiendo mantener un seguimiento continuo del rostro. Lo que fue de gran ayuda para cumplir la interacción entre el niño y el robot.

El diseño implementado del robot fue realizado netamente modular, para que cualquier persona pueda manipularlo y así pueda facilitar: su mantenimiento, el cambio de partes o accesorios o remplazo de componentes electrónicos.

A partir de las pruebas de funcionamiento realizadas en los niños con trastorno del espectro autista se tuvo resultados de aceptación del 94.76%, abarcando: funcionamiento, facilidad de uso, aspecto físico, aceptación, interacción y comodidad.

Gracias a la retroalimentación obtenida con las terapeutas y el personal calificado de la fundación Virgen de la Merced, se realizaron modificaciones en la tonalidad de voz, grados de libertad, contraste de color en su aspecto y metodología de interacción. Logrando una aceptación inmediata en los niños con trastorno del espectro autista.

Se tuvo un grado de aceptación “excelente” en grupo de niños con un nivel de autismo leve y medio en un rango de edad de 6 a 11 años, donde los niños participaron cada vez más tiempo en las terapias. En el mismo rango de edad en niños con un nivel de autismo severo no se notó buenos resultados, ya que aún no tienen desarrolladas sus habilidades sociales, las mismas que permiten interactuar con las personas en su entorno.

Recomendaciones

Se recomienda que los niños permanezcan sentados en cada una de las terapias, ya que se notó mayor comodidad en esa posición.

Se recomienda adquirir una cámara con característica de autoenfoco para poder trabajar en ambientes externos.

Se recomienda utilizar un protocolo i2c para evitar la interferencia en el envío y procesamiento de datos.

Se recomienda realizar un entrenamiento exhaustivo al clasificador HAAR-cascade para tener una respuesta inmediata en la detección de rostros.

Para futuras investigaciones se puede aumentar los grados de libertad del robot para obtener movimientos más naturales y una mejor aceptación.

BIBLIOGRAFIA

- Adafruit. (2017). *Adafruit*. Obtenido de <https://www.adafruit.com/product/815>
- Adams, A., & Robinson, P. (2011). An android head for social-emotional intervention for children with autism spectrum conditions. *Affective Computing and Intelligent Interaction*, 184-190. Obtenido de https://asknao.aldebaran.com/sites/default/files/publications/shamsudinyoussof_2012_initialresponseinhri.pdf
- AICHI. (2005). Robot Project: We Live in the Robot Age at EXPO 2005. Obtenido de [http://www.expo2005.or.jp/en/robot/robot project 00.html](http://www.expo2005.or.jp/en/robot/robot%20project%2000.html)
- Arduino. (2017). Obtenido de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>
- Arkin, R., & Moshkina, L. (2013). Affect in Human-Robot Interaction. *Naval Research Laboratory*, 5-8.
- Beaglebone. (Diciembre de 2017). Obtenido de <http://beagleboard.org/bone>
- Bertel, B., & Christiansen. (2015). Robot technologies, autism and designs for learning. *The New Media Consortium*.
- Bilings, D., Chan, J., & Hancock, P. (2012). Human-Robot Interaction: Developing Trust in Robots. *ACM/IEEE*, 109–110.
- Billard, A., Nadely, J., & Dauten, K. (2006). Building Robota, a Mini-Humanoid Robot for the Rehabilitation of Children with Autism. *Assist Technol*. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.71.2892&rep=rep1&type=pdf>
- Breazeal, C. (2003). Social Interactions in HRI: The Robot View. *IEEE TRANSACTIONS ON MAN, CYBERNETICS AND SYTEMS-PART*, 1-4.
- Casper, j., & Murphy, R. (2003). Human-robot interactions during the robotassisted urban search and rescue response at the World trade Center. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 367-385.
- CONADIS. (Octubre de 2016). *Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS)*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2016, de Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS): <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadistica/index.html>
- Dautenhanhn, K., Nehaniv, C., Walters, M., & otros. (2009). KASPAR- A Minimally Expressive Humanoid Robot for Human-Robot Interaction Research. *APPLIED BIONICS*. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.160.9736&rep=rep1&type=pdf>
- ebay. (1995). Obtenido de <https://www.ebay.es/itm/160W-8A-Adjustable-DC-DC-Step-Down-Buck-Converter-Power-Supply-Case-Heatsink-/271997712814>
- ebay. (2000). Obtenido de <https://www.ebay.com/itm/Hobbywing-3A-5V-6V-BEC-UBEC-Entrada-de-tension-5-5-26-Voltios-2-6-S-Lipo-SBEC/142364316231?epid=829300012&hash=item2125931247:g:ZlcAAOSwXeJXc~om>
- ELECTRONILAB. (2015). *ELECTRONILAB*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-distancia-de-ultrasonido-hc-sr04/>

- Emanuel, R., & Weir, S. (1976). Using LOGO to catalyse communication in an autistic child. *Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh*.
- Ermer, J., & Dunn, W. (1998). A discriminant analysis of children with and without disabilities. *American Journal of Occupational Therapy*, 285-290.
- Fong, T., & Nourbakhsh, I. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, vol.42.
- FUTABA. (2011). *Futaba*. Obtenido de <https://servodatabase.com/servo/futaba/s3003>
- Genius. (2017). *Genius*. Obtenido de http://www.naylampmechatronics.com/blog/55_tutorial-sensor-de-distancia-sharp.html
- Greenspan, & Wieder, S. (1997). Developmental patterns and outcomes in infants and children with disorders in relating and communicating: A chart review of 200 cases of children with autistic spectrum diagnoses. *Journal of Developmental and Learning Disorders*, 100-140.
- Jacobs, P. (2003). When is a garden . . . not a garden? The garden festival at Grand Metis, Quebec, invites designers to go to the limit – and then some. *Landscape Architecture*.
- Johanna Tobar, A. C. (2015). PICTOAPRENDE: Application that contributes to the personal autonomy of children and youth with autism spectrum disorder in Ecuador. *IEEE*, 3-4.
- Jones, V., & Prior, M. (1985). Motor imitation abilities and neurological signs in autistic children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45.
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact. *Nervous child vol. 2*, 240-250.
- Koegel. (1999). Pivotal response intervention I: Overview of approach. *Journal of the Association for the Severely Handicapped*, 180-184.
- Kozima, H., & Nakagawa, C. (2006). Interactive Robots as Facilitators of Children's Social Development. *National Institute of Information and Communications Technology - Japan*. Obtenido de http://cdn.intechopen.com/pdfs/59/InTech-Interactive_robots_as_facilitators_of_childrens_social_development.pdf
- Llamas, L. (2017). *Luis Llamas*. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/hasta-32-de-servos-en-arduino-con-el-controlador-usc-32/>
- Logitech. (2017). *Logitech*. Obtenido de <https://www.logitech.com/es-roam/product/webcam-c170>
- Lord, C., & Schopler, E. (1989). Stability of assessment results of autistic and non-autistic language-impaired children from preschool years to early school age. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 580-590.
- Michaud, F., Salter, T., Duquette, A., & Mercier, H. (2006). Assistive Technologies and Children-Robot Interaction. *American Association for Artificial Intelligence*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/221251056_Assistive_Technologies_and_Children-Robot_Interaction
- Montemayor, J., Alborizi, H., Hendeler, J., Pollack, D., & Porteous, L. (2000). From PETS to storykit: Creating new technology with and intergenerational design team. *Workshop on Interactive Robots and Entertainment (WIRE)*.
- MOTOR, E. (2015). *ETENM, MOTOR*. Obtenido de http://www.etonm.com/products_detail/productId=28.html

- MUNDO. (9 de Marzo de 2011). *ElComercio*. Obtenido de <http://elcomercio.pe/mundo/actualidad/kaspar-robot-que-ayuda-ninos-autistas-noticia-724860>
- Mwendo, M. (2011). Inclusive Education for Children with Autism; Challenges facing Teachers at City Primary School, Nairobi Province, Kenya. *Kenyatta University*, 56-59.
- NAYLAMP. (2014). *NAYLAMP*. Obtenido de http://www.naylampmechatronics.com/blog/55_tutorial-sensor-de-distancia-sharp.html
- Nisbet, R. G. (8va edición). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. McGrawHill.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas*. México: PEARSON.
- Oleson, K., Billings, D., & Otros. (2011). The Influence of a Robot's Embodiment on Trust: A Longitudinal Study. *IEEE*, 175–178.
- Perez, M., & Sevilla, M. (1993). Psychological assessment of adolescents and adults with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 664.
- Popolu. (2017). *Pololu*. Obtenido de <https://www.pololu.com/product/207>
- Prior, M., & Ozonoff, S. (1998). Psychological Factors in Autism. *Autism and Pervasive Developmental Disorders*, 100-105.
- PVI. (11 de Marzo de 2016). *El Mercurio*. Obtenido de <http://www.elmercurio.com.ec/519515-en-la-ups-crean-robots-que-daran-ayuda-social/>
- Raspberry. (Diciembre de 2017). Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- Robins, B., Dickerson, P., Stribling, P., & Dautenhahn, K. (2004). Robto-mediated joint attention in children with autism: A case study in robot-human interaction. *Interaction Studies*, 161-198.
- Rogers, S., & Lewis, H. (1989). An effective day treatment model for young children with pervasive developmental disorders. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 210-214.
- Scassellati, B. (2005). Quantitative metrics of social response for autism diagnosis. 585-590.
- Shamsuddin, S., Yussol, H., & Mohamed, S. (2012). Initial Response in HRI- a Case Study on Evaluation of Child with Autism Spectrum Disorders Interacting with a Humanoid Robot NAO. *ELSEVIER*.
- Starmedia. (20 de Marzo de 2017). *Horoscopo*. Obtenido de <http://horoscopo.starmedia.com/mujer/autismo-no-enfermedad-sino-condicion/>
- Strain, & Kohler, F. (2001). Inclusion of children with autism in early intervention settings: An examination of rationale, myths and procedures. *Early Childhood Inclusion: Focus on Change*.
- Texas Instrument. (s.f.).
- TowerPro. (06 de 01 de 2010). *TowerPro*. Obtenido de <http://www.towerpro.com.tw/product/mg90s-3/>
- TowerPro. (02 de 2010). *TowerPro*. Obtenido de <http://www.towerpro.com.tw/?product=mg92b>

ANEXOS