



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA/O EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANDADOR
INTELIGENTE PARA EL DESPLAZAMIENTO AUTÓNOMO DE
LOS ADULTOS MAYORES CON VISIÓN REDUCIDA Y
PROBLEMAS DE MOVILIDAD DEL HOGAR DE VIDA “LUIS
MALDONADO TAMAYO” MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE
TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL**

**AUTORES: JOSÉ LUIS GUAMUSHIG LAICA
MIGUEL ANGEL JEREZ GAVILÁNEZ**

DIRECTOR: ING. DARÍO MENDOZA M. Sc

LATACUNGA

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANDADOR INTELIGENTE PARA EL DESPLAZAMIENTO AUTÓNOMO DE LOS ADULTOS MAYORES CON VISIÓN REDUCIDA Y PROBLEMAS DE MOVILIDAD DEL HOGAR DE VIDA “LUIS MALDONADO TAMAYO” MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL**” realizado por los señores **JOSÉ LUIS GUAMUSHIG LAICA** y **MIGUEL ANGEL JEREZ GAVILÁNEZ**, 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 Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **JOSÉ LUIS GUAMUSHIG LAICA** y **MIGUEL ANGEL JEREZ GAVILÁNEZ** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 27 de febrero del 2018

Atentamente;

Ing. Mendoza Dario
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA



CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **JOSÉ LUIS GUAMUSHIG LAICA** y **MIGUEL ANGEL JEREZ GAVILÁNEZ**, con cédula de ciudadanía 050410782-2 y 050397902-3 respectivamente, declaro que este trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANDADOR INTELIGENTE PARA EL DESPLAZAMIENTO AUTÓNOMO DE LOS ADULTOS MAYORES CON VISIÓN REDUCIDA Y PROBLEMAS DE MOVILIDAD DEL HOGAR DE VIDA “LUIS MALDONADO TAMAYO” MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL**” 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.

Latacunga, 22 de febrero del 2018

	
José Luis Guamushig Laica	Miguel Angel Jerez Gavilánez
C.C.: 0504107822	C.C.: 0503979023





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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **JOSÉ LUIS GUAMUSHIG LAICA** y **MIGUEL ANGEL JEREZ GAVILÁNEZ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANDADOR INTELIGENTE PARA EL DESPLAZAMIENTO AUTÓNOMO DE LOS ADULTOS MAYORES CON VISIÓN REDUCIDA Y PROBLEMAS DE MOVILIDAD DEL HOGAR DE VIDA “LUIS MALDONADO TAMAYO” MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 27 de febrero del 2018

 José Luis Guamushig Laica C.C.: 0504107822	 Miguel Angel Jerez Gavilánez C.C.: 0503979023
--	--

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres Fernando y Mercedes, quienes me han depositado su confianza en mí, y que con sus palabras guían mi camino, a Don Cesar y la Sra. Carmen quienes han apoyado el desarrollo de mi carrera.

A mis abuelitos, a mis tíos y tías quienes de una u otra manera con palabras sabias han impartido un sabio consejo.

A mis hermanos con quienes he compartido toda mi vida y me han brindado su apoyo a su manera (bullying).

José Luis

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado con total orgullo a mis Padres María de Lourdes Gavilánez y Luis Abraham Jerez, quienes han sido mi ejemplo a seguir, han velado mi bienestar y educación y gracias a ello soy la persona que se encuentra en este lugar.

También dedico este proyecto a mis hermanos Jessica y Marlon que fueron cómplices de aquellos momentos de felicidad y soporte en esos momentos de sabor amargo que aparecieron en mi vida.

De igual manera a mi abuelita mamá Sarita quién fue un pilar fundamental en mi desarrollo y a mi sobrino e ahijado Lenin que con sus travesuras e inocencia saca más de una sonrisa.

Miguel Angel

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios por la vida y salud que poseo, también a mis padres Fernando y Mercedes por ser un apoyo en todo momento y guiarme por un buen sendero.

Un agradecimiento muy especial al Sr. Cesar Chango Y Sra. Carmen Torres quienes son mis segundos padres y me han brindado su apoyo durante toda esta carrera.

A los raspiamigos por compartir tantos momentos en las aulas y fuera de ellas, les doy las gracias por siempre permanecer juntos apoyándose los unos a los otros para llegar al final juntos.

A Gracielita quien, desde que tengo uso de razón ha sabido hacer de mí, un hombre de bien, con sus consejos y apoyo incondicional.

A mis hermanos Jhilson y Maribel sin los cuales mi vida no tendría el sentido que hoy tiene, gracias por ser los mejores.

José Luis

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a Dios por darme la salud que tengo, la paciencia y perseverancia necesaria para alcanzar este nuevo logro.

Le doy gracias a mis padres Luis, Lourdes y mis hermanos Jessica y Marlon por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida y sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A los buenos amigos que se formaron en las aulas de la universidad, un agradecimiento especial a los raspiamigos, que con bromas y optimismo se formaron muchas experiencias.

Además, agradezco de manera especial al Ing. Darío Mendoza director de este proyecto por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de este proyecto.

Por último, pero no menos importante, a todas y cada una de las personas que contribuyeron de una u otra manera a la realización de este proyecto.

Miguel Angel

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FÍGURAS	viii
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Justificación.....	2
1.4. Planteamiento del problema	3
1.5. Hipótesis	4
1.6. Disfunciones en la marcha	4
1.6.1. Adulto mayor	4
1.6.2. Trastornos y patologías en la marcha.....	5
1.6.3. Hogar de vida Luis Maldonado Tamayo	6
1.7. Andadores como dispositivos aumentativos de movilidad	7
1.7.1. Andadores convencionales	8
1.7.2. Andadores inteligentes	10
a) Apoyo físico.....	10
b) Asistencia sensorial.....	11
c) Asistencia cognitiva.....	12
d) Vigilancia de salud	12
1.8. Estados del arte de andadores inteligentes	12
1.8.1. Mobil	13

1.8.2. PAM (personal Adaptative Mobility).....	13
1.8.3. GUIDO	15
1.8.4. PAMM Smart Walker (Personal Aid for Mobility and Monitoring)	15
1.8.5. MARC (Medical Automation Research Center)	16
1.8.6. Care-O-bot	17
1.8.7. NURSEBOT	17
1.8.8. I-Walker.....	18
1.9. Robótica móvil.....	18

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL ANDADOR	20
2.1. Definición de las necesidades	20
2.2. Definición de las especificaciones	21
2.3. Definición de la estructura funcional	22
2.4. Definición de alternativas de diseño	23
2.5. Módulo 1. Sistema mecánico	23
2.5.1. Motriz	23
2.5.2. Tipo de desplazamiento	26
a) Modelo matemático	28
b) Cinemática directa.....	29
c) Cinemática inversa.....	32
2.5.3. Diseño estructural	33
a) Diseño de las bases de motores.	36
b) Diseño del eje de acople motor-rueda	38
c) Diseño del bocín de la rueda posterior	38
d) Selección de rodamiento	39
e) Diseño de la base para el sistema electrónico.....	40
f) Diseño de la carcasa para elementos electrónicos.....	41
g) Diseño de la base superior	42
2.6. Módulo 2. Sistema eléctrico/electrónico	43
2.6.1. Controladores.....	43
2.6.2. Energía	45
2.6.3. Accionamiento.....	47
2.6.4. Odometría	49

2.6.5. Visión	50
2.7. Módulo 3. Control	54
2.7.1. Adquisición.....	54
2.7.2. Control principal	56
2.7.3. Software de programación	58
2.8. Definición del diseño	60

CAPÍTULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS.....	62
3.1. Construcción e implementación del sistema mecánico.....	62
3.1.1. Manufactura de las bases de los motores	62
3.1.2. Manufactura del eje de acople motor-rueda	63
3.1.3. Manufactura del bocín de la rueda posterior	63
3.1.4. Manufactura de la base para el sistema electrónico	64
3.1.5. Manufactura de la carcasa para los elementos electrónicos.....	64
3.1.6. Manufactura de la base para el ordenador y cámara.....	64
3.2. Implementación del sistema eléctrico	65
3.2.1. Conexiones de los motores	65
3.2.2. Conexiones de los sensores ultrasónicos.....	67
3.2.3. Conexiones de los sensores de fuerza.....	67
3.2.4. Conexiones de los pulsadores de sentido de giro	68
3.3. Comprobación de sensores.....	69
3.4. Implementación del sistema de control.....	69
3.4.1. Dependencias necesarias para el desarrollo del algoritmo.....	70
3.4.2. Comunicación Serial	73
a) Comunicación serial Raspberry Pi.....	74
3.4.3. Etapas del algoritmo de detección de objetos	75
a) Captura	76
b) Preprocesamiento	78
c) Segmentación	79
d) Extracción de características.....	80
e) Identificación de objetos	81
3.4.4. Algoritmo de detección de gradas	83

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	84
4.1. Pruebas de adquisición	84
4.2. Pruebas de filtrado	85
4.3. Prueba de detección de objetos	86
4.6.1. Detección y evasión de objetos pequeños	89
4.6.2. Detección y evasión de objetos medianos y grandes	91
4.6.3. Detección de objetos dinámicos	93

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1. Validación de la hipótesis	96
5.2. Análisis de económico.....	98
5.3. Conclusiones.....	99
5.4. Recomendaciones.....	102

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
ANEXOS	110
CERTIFICACIÓN.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Enfermedades asociadas con trastornos de la marcha	5
Tabla 2. Necesidades por atender en el proyecto	21
Tabla 3. Detalle de especificaciones.....	21
Tabla 4. Estructura modular de andador	22
Tabla 5. Matriz de selección de conceptos (Sistema Motriz).....	23
Tabla 6. Matriz de evaluación de conceptos (Sistema Motriz)	24
Tabla 7. Matriz de selección de conceptos (Tipo de desplazamiento)	27
Tabla 8. Matriz de evaluación de conceptos (Tipo de desplazamiento)	27
Tabla 9. Matriz de selección de conceptos (Estructura Base)	34
Tabla 10. Matriz de evaluación de conceptos (Estructura Base)	34
Tabla 11. Matriz de selección de conceptos (Controladores)	43
Tabla 12. Matriz de evaluación de conceptos (Controladores).....	44
Tabla 13. Matriz de selección de conceptos (Energía).....	45
Tabla 14. Matriz de evaluación de conceptos (Energía)	46
Tabla 15. Matriz de selección de conceptos (Accionamiento)	48
Tabla 16. Matriz de evaluación de conceptos (Accionamiento).....	48
Tabla 17. Matriz de selección de conceptos (Odometría)	49
Tabla 18. Matriz de evaluación de conceptos (Odometría)	50
Tabla 19. Matriz de selección de conceptos (Visión)	51
Tabla 20. Matriz de evaluación de conceptos (Visión)	51
Tabla 21. Características del sensor HC-SR04.....	53
Tabla 22. Matriz de selección de conceptos (Adquisición)	54
Tabla 23. Matriz de evaluación de conceptos (Adquisición)	55
Tabla 24. Pines analógicos y digitales utilizados	55
Tabla 25. Comparación de características de las placas Arduino	56
Tabla 26. Matriz de selección de conceptos (Control Principal)	56
Tabla 27. Matriz de evaluación de conceptos (Control Principal)	57
Tabla 28. Matriz de selección de conceptos (Software)	58
Tabla 29. Matriz de evaluación de conceptos (Software)	59

Tabla 30. Definición del diseño	60
Tabla 31. Correspondencia de distancia en el mapa de profundidad	80
Tabla 32. Prueba de detección por distancias	87
Tabla 33. Prueba de detección y evasión de objetos pequeños	89
Tabla 35. Prueba de detección de objetos medianos y grandes	91
Tabla 35. Prueba de detección y evasión de objetos dinámicos	94
Tabla 36. Datos para calcular chi-cuadrado.....	97
Tabla 37. Datos de la frecuencia esperada.....	97
Tabla 38. Análisis costo económico del andador	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hogar de vida "Luis Maldonado Tamayo"	7
Figura 2. Andadores convencionales	8
Figura 3. Andador inteligente ASAS	11
Figura 4. Andador inteligente Mobil	13
Figura 5. PAM-AID.....	14
Figura 6. Andador VA PAMAID.....	14
Figura 7. Andador Inteligente GUIDO	15
Figura 8. Andador Inteligente PAMM	16
Figura 9. Andador Inteligente MARC	16
Figura 10. Prototipo del Care-O-bot.....	17
Figura 11. Andador Inteligente NURSEBOT	17
Figura 12. I-Walker	18
Figura 13. Motor DC con caja reductora	26
Figura 14. Posición del robot (x , y , θ)	28
Figura 15. Cinemática de una rueda.....	29
Figura 16. Configuración de ruedas en tracción diferencial.....	29
Figura 17. Selección de la estructura base del andador	35
Figura 18. Sistema de movimiento diferencial.....	35
Figura 19. Selección rueda tipo castor.....	36
Figura 20. Selección del sistema regulable de altura	36
Figura 21. Diseño de las bases de los motores	37
Figura 22. Subensamble de las bases de los motores.....	37
Figura 23. Análisis del Material en SolidWorks	38
Figura 24. Análisis del acople motor-rueda.....	38
Figura 25. Bocín rueda posterior.....	39
Figura 26. Resultados de la selección de rodamiento	40
Figura 27. Rodamiento SKF 608.....	40
Figura 28. Base de la electrónica del andador	41
Figura 29. Análisis de la base de componentes electrónicos	41

Figura 30. Carcasa de componentes electrónicos	42
Figura 31. Base del miniordenador	42
Figura 32. Análisis de la base del miniordenador.....	43
Figura 33. Driver Motor DC con Mosfet IRF3205	45
Figura 34. Batería PRO LIPO	47
Figura 35. Componentes del sensor Kinect	52
Figura 36. Adaptador de voltaje del sensor Kinect	53
Figura 37. Convertidor dc-dc XI6009	54
Figura 38. Raspberry Pi 3.....	57
Figura 39. Raspberry Pi Touch Display.....	58
Figura 40. Sistema operativo Raspbian	59
Figura 41. Diseño final del andador inteligente	60
Figura 42. Impresión 3D de las bases de los motores	62
Figura 43. Machuelado del eje de acople	63
Figura 44. Elaboración del acople de la rueda posterior	63
Figura 45. Corte CNC de las bases.	64
Figura 46. Base de aluminio para el ordenador y la cámara.	64
Figura 47. Conexiones de los motores y driver	65
Figura 48. Diagrama de bloques del hardware del andador	66
Figura 49. Conexiones de los sensores ultrasónicos	67
Figura 50. Sensores de fuerza FSR402.....	68
Figura 51. Conexiones de los sensores FSR402	68
Figura 52. Conexiones de los pulsadores de sentido de giro	69
Figura 53. Definición de pines en el Arduino.....	69
Figura 54. Librería python-serial	70
Figura 55. Verificación librería OpenCV	72
Figura 56. Función iniciarserial().....	74
Figura 57. Función enviardatos()	74
Figura 58. Función recibirdatos()	75
Figura 59. Función terminarserial()	75
Figura 60. Comparación entre PDI y el algoritmo implementado	76

Figura 61. Demo de la librería libfreenect	76
Figura 62. Funciones de adquisición de imagen	77
Figura 63. Llamado a las funciones de adquisición.....	77
Figura 64. Imágenes de salida de las funciones de adquisición.....	77
Figura 65. Operaciones principales de Filtrado.....	78
Figura 66. Cálculo del ángulo de visión de la Kinect.....	79
Figura 67. Función de segmentación	80
Figura 68. Función de comprobación de ocupación.....	81
Figura 69. Función de lógica de control de motores	81
Figura 70. Visualización de direcciones.	82
Figura 71. Visualización de divisiones.	82
Figura 72. Formato de salida procesamiento	82
Figura 73. Detección de gradas.	83
Figura 74. Pruebas de ángulo del sensor Kinect.....	84
Figura 75. Iteraciones de erosión.....	85
Figura 76. Comparación de los diversos tamaños de kernel.....	86
Figura 77. Detección de objetos pequeños y acciones	89
Figura 78. Evaluación del algoritmo con objetos pequeños	91
Figura 79. Evaluación del algoritmo con objetos medianos y grandes	93
Figura 80. Detección y evasión de personas	93
Figura 81. Evaluación del algoritmo con objetos dinámicos	95
Figura 82. Tabla del chi-cuadrado	98

NOMENCLATURA

Calif.: Calificación

Ev. Po. : Evaluación Ponderada

RPM: Revoluciones por minuto

v: Velocidad de marcha del adulto mayor

d: Diámetro de la rueda del andador

r: Radio de la rueda del andador

W: Peso de la estructura del andador

Wa: Peso a soportar por el andador

N1: Ruedas locas del andador

N2: Ruedas de tracción del andador

u : Coeficiente de fricción

T : Torque de los motores

c : Capacidad de la batería

I : Intensidad de corriente de la batería

t : Tiempo de operación estimado

PDI : Procesamiento digital de imágenes

OpenCV: Open Computer Vision

SO: Sistema operativo / Operating System

h₀: Hipótesis Nula

h₁: Hipótesis válida

GDL : Grados de libertad en la hipótesis

xcalc² : chi-cuadrado calculador

xtb² : chi-cuadrado de tabla

RESUMEN

La solución habitual a los problemas de movilidad en adultos mayores reside en el uso de bastones, andadores y en casos extremos en sillas de ruedas. En el presente proyecto se trata de conservar la capacidad de marcha independiente del anciano además contribuir a mantener el sistema sicomotor y la autonomía en el interior de lugares de residencia acondicionados específicamente para su cuidado, en búsqueda de estos objetivos el andador ha sido dotado de interruptores de activación en los manubrios, sensores ultrasónicos, un sensor Kinect, motores de tracción y un controlador cuya función es emplear todas las señales proporcionadas por dichos sensores para permitir una movilidad adecuada evitando obstáculos como la detección de situaciones peligrosas como gradas. El desarrollo del sistema de control es en software libre de Ubuntu en su distribución de Raspbian que permite la implementación de múltiples librerías y ejecutar código abierto con acceso a diferentes componentes de hardware (sensores-actuadores) mediante el mecanismo de paso de mensajes entre procesos y visualización. El prototipo de andador inteligente es implementado en el Hogar de Vida “Luis Maldonado Tamayo” del cantón Pujilí en donde se realizan pruebas de funcionamiento con adultos mayores que aun poseen capacidad motriz y alguna deficiencia parcial en la visión.

PALABRAS CLAVE

- **SISTEMAS OPERATIVOS**
- **ANDADOR INTELIGENTE**
- **ADULTOS MAYORES - MOVILIDAD**
- **VISIÓN ARTIFICIAL**

ABSTRACT

The usual solution to the problems of mobility in older adults resides in the use of canes, walkers and in extreme cases in wheelchairs. In the present project is to preserve the ability of independent walking of the elderly also contribute to maintaining the psychomotor system and autonomy inside residential places specially prepared for their care, in pursuit of these objectives the walker has been equipped with switches of activation in the handlebars, ultrasonic sensors, a Kinect sensor, traction motors and a controller whose function is to use all the signals provided by said sensors to allow an adequate mobility avoiding obstacles such as the detection of dangerous situations such as bleachers. The development of the control system is in Ubuntu free software in its distribution of Raspbian that allows the implementation of multiple libraries and execute open source with access to different hardware components (sensors-actuators) through the mechanism of message passing between processes and display. The intelligent walker prototype is implemented in the "Luis Maldonado Tamayo" Home of Life in Pujilí canton, where performance tests are carried out with older adults who still have motor skills and some partial vision deficiency.

KEYWORDS:

- **OPERATING SYSTEMS**
- **INTELLIGENT WALKER**
- **ELDERLY ALDUTS - MOBILITY**
- **ARTIFICIAL VISION**

CAPÍTULO I

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Introducción

Millones de personas en el mundo poseen una discapacidad visual que no puede ser corregida con el uso de lentes, y la mayoría de estas personas son adultos de más de 65 años. En la última década muchos de estos adultos mayores perdieron la capacidad de visión como efecto del envejecimiento. Estas personas no pueden adquirir habilidades de movilidad independiente debido a su edad, por lo tanto, entre personas débiles y con habilidades visuales en deterioro, la capacidad de movilidad autónoma es baja.

En el interior de un lugar de cuidados, un adulto mayor es consciente que la falta de visión puede causar accidentes a sí mismo y a otras personas, como a su vez se limita la movilidad, la misma que debe ser bajo supervisión de alguna persona a su cuidado. Por lo tanto, necesita un dispositivo que brinde orientación y apoyo físico. Según la Organización Mundial de Salud (OMS) la actividad física es la clave para mantener la salud entre los adultos mayores además de contribuir a mejorar la función cognitiva y sensorial (OMS, 2016).

Este proyecto ayuda a caminar no solo a usuarios que presenten un grado de debilidad en sus extremidades, sino también a aquellos con problemas de visión, y así proporcionar un medio seguro e independiente, además asistencia de navegación en el entorno, con el uso de librerías de OpenCV que sirve como interfaz de comunicación y procesamiento.

1.2. Antecedentes

En situaciones de problemas de movilidad de diversos orígenes se requiere el uso de dispositivos de ayuda en el desplazamiento. Dichos dispositivos se utilizan según el caso de cada persona siendo los más comunes las muletas, batón o caminador. En un mercado competitivo existe una gran cantidad y variedad de estos equipos a precios accesibles y que no requieren

mantenimiento. Es así como se puede encontrar bastones de apoyo múltiple de dos a cuatro patas y andadores de dos, tres o cuatro ruedas.

En casos más crónicos se opta por el uso de sillas de ruedas que de la misma manera existen, con tracción manual, eléctrica y otros especiales. En los últimos años estos dispositivos se equipan con sensores, computadores e interfaces y así proporcionar un alto grado de autonomía al usuario.

Con menor dedicación se desarrollan sistemas de ayuda a la movilidad natural, estos dispositivos tienen el objetivo de mejorar la movilidad propia y soporte del ser humano guía. Algunos de estos dispositivos son: PAM, PAM AID, GUIDO, MARC, NURCEBOT, i-Walker que se detallan más adelante.

1.3. Justificación

Con la implementación del andador inteligente en el Hogar de Vida Luis Maldonado Tamayo el 50% de los adultos mayores estarán en la capacidad de realizar desplazamientos o caminatas durante lapsos de tiempo semanalmente, lo cual conlleva a beneficiar sus funciones cardiorrespiratorias, poner en actividad gran parte de los músculos, y de esta forma mejorar la salud ósea y muscular del adulto mayor con el fin de disminuir el riesgo de depresión.

La implementación de técnicas de visión artificial en el algoritmo de control del andador inteligente evitará el sedentarismo en personas con visión reducida que tienen el temor a sufrir lesiones por accidentes causados al chocar con objetos presentes en el interior del hogar de vida.

La importancia del proyecto radica en la autonomía de movilidad del adulto mayor en el interior del hogar de vida “Luis Maldonado Tamayo” con la introducción de nuevas tecnologías TICs para evitar posibles accidentes y así disminuir la necesidad de cuidados por parte del personal, de modo que se brinde una estadía agradable. Por lo cual, el presente proyecto busca solventar la necesidad de movilidad independiente, evitar accidentes, ayudar en la rehabilitación (cardio-respiratoria) en cuanto a requerimientos explícitos de fisioterapeutas.

1.4. Planteamiento del problema

El envejecer es un proceso natural que forma parte del ciclo de vida para todas las personas, que por lo general se acompaña de alteraciones de los sistemas funcionales del cuerpo humano, así como la aparición de problemas o enfermedades, siendo en general el caso con repercusión ocular, que incrementa su influencia con la edad, entre otras enfermedades se encuentran: cataratas, glaucomas, degeneración macular, desprendimiento de retina, retinopatía diabética, etc. (Dra. Muñoz, 2008).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en adultos mayores la actividad física radica en prácticas recreativas, caminatas o paseos lo cual conlleva a beneficiar sus funciones cardiorrespiratorias, poner en actividad gran parte de músculos, y de esta manera mejorar en sí la salud del sistema óseo del adulto mayor con el fin de disminuir el riesgo de depresión e inclusive el deterioro cognitivo al cual están propensos, por lo que recomienda 2 horas y 30 minutos semanales de esta actividad física.

El número reducido de asistentes en el Hogar de Vida hace que muchas personas de la tercera edad pasen varias horas sentados o acostados por temor a sufrir lesiones por caídas, colisiones con paredes, personas u otros objetos en el ambiente.

El Hogar de Vida Luis Maldonado Tamayo cuenta con 45 personas de la tercera edad a su cuidado, de los cuales: 10 tienen la capacidad de caminar libremente, 20 con la ayuda de equipos como bastones y andadores, 10 se movilizan mediante sillas de ruedas y el número restante se encuentran postrados.

Aproximadamente el 50% de esta población de adultos mayores que residen en el Hogar de Vida Luis Maldonado Tamayo padecen de pérdida progresiva de visibilidad, así como la falta de movilidad en sus extremidades inferiores para poder desplazarse libremente en el interior del hogar de vida.

El problema radica que con el pasar del tiempo los adultos mayores tienden a ser dependientes de fisioterapeutas, enfermeras o cualquier persona capacitada que sea responsable de su cuidado. En vista de que no existe la suficiente cantidad de asistentes, con el presente proyecto se trata de atender las necesidades de 30 personas las cuales poseen problemas de motricidad y visión reducida

La alteración en la marcha por disminución de fuerza en los músculos de las extremidades inferiores, además de problemas que afectan el equilibrio son factores frecuentes que padecen las personas de la tercera edad, en donde dichos factores involucran riesgos de caídas y lesiones en los adultos mayores. Según un estudio de EcuRed el 25 % de casos de caídas, trae como consecuencia una lesión relevante y en el 5 % una fractura. Con frecuencia la pérdida de la capacidad ambulante es el inicio de un progresivo deterioro del estado de salud y funcional (EcuRed, 2016).

1.5. Hipótesis

¿La investigación de técnicas de visión artificial para el diseño y construcción de un andador inteligente permitirá la movilización independiente de adultos mayores dentro del hogar de vida Luis Maldonado Tamayo?

1.6. Disfunciones en la marcha

1.6.1. Adulto mayor

El envejecimiento de la población es un triunfo de la humanidad, pero también un reto para la sociedad. En todo el mundo, el número de personas mayores a 60 años crece más rápido que cualquier otro grupo de edad. Se estima que el número de este grupo de edad ascienda a 688 millones en 2006, proyectándose que llegará a casi dos billones en 2050 (World Health Organization, 2007).

Existe una variedad de afecciones en la movilidad del ser humano. El más común y que afecta de manera general a gran parte de los individuos es el envejecimiento propio. La edad causa una serie de modificaciones en la marcha

humana (Duxbury, 2000). La longitud en los pasos tiende a disminuir y por ende la velocidad con el propósito de incrementar la seguridad y ahorrar energía.

Las consecuencias de los trastornos de movilidad en adultos mayores hacen que estos limiten sus actividades diarias por disminución de su capacidad motora y temor a sufrir caídas. Esto conlleva al deterioro muscular y disminución de fuerza en las extremidades lo que agrava enfermedades como osteoporosis y artritis.

Según la OMS aproximadamente el 28-35% de las personas mayores de 65 años sufren caídas cada año, este problema se incrementa a 32-42% para los mayores de 70 años. Además, el 30-50% de las personas que viven en instituciones de atención a largo plazo (asilos) pierden el equilibrio y se caen cada año, de este último grupo el 40% experimenta caídas recurrentes (World Health Organization, 2007).

1.6.2. Trastornos y patologías en la marcha

Según Duxbury, la marcha “es la capacidad del sistema nervioso central para generar una serie de complejos movimientos neuromusculares que son sincronizados por el cerebro para que el cuerpo humano se propulse hacia adelante” (Duxbury, 2000).

Tabla 1.

Enfermedades asociadas con trastornos de la marcha

Sistema orgánico afectado	Enfermedades asociadas
Músculo esquelético	Osteoartritis Osteoporosis Enfermedad de Paget Artritis reumatoide Fractura de hueso Enfermedad podiátrica
Cardiovascular	Ortostasis Síncope disrítmico Estatismo venoso Claudicación intermitente Insuficiencia cardíaca congestiva
Sistema nervioso	Carrera Mal de Parkinson Alteraciones visuales Estenosis espinal

CONTINÚA 

Neuropatía periférica Denegación de la enfermedad Encefalopatía metabólica Hidrocefalia de presión normal Vértigo

Fuente: (Duxbury, 2000)

Las causas más comunes de los trastornos de la marcha vistos en la práctica se clasifican en tres grupos, según el sistema orgánico afectado como son: el músculo esquelético, cardiovascular y sistema nervioso (ver tabla 1).

A continuación, se definirá algunos trastornos de la marcha:

- Marcha antálgica. La persona tiende a favorecer ciertos movimientos para evitar dolores, con lo que minimiza el peso a soportar por el lado afectado. Se presenta en enfermedades como osteoartritis o lesiones.
- Marcha atáxica. Es una marcha inestable o sin orden que se presenta como síntoma de enfermedades que provocan disminución de coordinación de movimientos. Se presenta en personas que padecen de esclerosis múltiple y enfermedades de la columna.
- Marcha festinante. Postura rígida con el tronco inclinado hacia adelante, con pasos cortos y sin levantar en exceso los pies del suelo.
- Marcha en tijeras. Está asociada a la parálisis cerebral, es una marcha en la cual las piernas oscilan sobre un eje imaginario y así evitar el contacto con el suelo.
- Marcha senil. Provocada por la edad y caracterizada por pasos cortos en donde se arrastran los pies.
- Marcha waddling o de pato. Asociada a la osteoartritis o la necrosis de cadera, se caracteriza por movimientos exagerados del tronco.

1.6.3. Hogar de vida Luis Maldonado Tamayo

Por medio de Ordenanza del Gobierno Municipal del Cantón Pujilí y mediante la colaboración de la embajada coreana, a través de la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (KOICA) se crea el Centro Gerontológico para el adulto mayor, HOGAR DE VIDA “Luis Maldonado Tamayo”, el mismo que inició sus actividades en diciembre del 2009. Posee una capacidad instalada de 11

habitaciones dobles que albergan 22 personas, un comedor con capacidad para 80 personas y áreas libres. La segunda etapa abre sus puertas en noviembre del 2016 que duplica la capacidad para albergar adultos mayores



Figura 1. Hogar de vida "Luis Maldonado Tamayo"

El Hogar de Vida para adultos mayores “Luis Maldonado Tamayo”, es una institución de beneficencia pública dependiente administrativamente del Patronato Municipal “Niño de Isinche”, con autonomía financiera domiciliada en la Ciudad de Pujilí, Cantón Pujilí, Provincia de Cotopaxi, se sujeta a la normativa que rige la actividad de la entidad, a las políticas y lineamientos emanados por sus Órganos de Gobierno y Dirección y a las directrices de las instancias de la gestión y coordinación técnica, administrativa y operacional del Patronato (Carvajal & Salazar, 2011).

El Hogar de Vida para adultos mayores “Luis Maldonado Tamayo”, tiene como finalidad mejorar la calidad de vida, recuperación e integración social y familiar de la población adulta mayor de 70 años de edad que se encuentran en situación de mendicidad, indigencia, abandono exclusivamente del Cantón Pujilí, que brinda una atención integral de calidad y calidez, a través de un trabajo humano y profesional, al proporcionar hospedaje, alimentación, atención médica y dignificación humana bajo la modalidad de atención: residencial y ambulatoria (Carvajal & Salazar, 2011).

1.7. Andadores como dispositivos aumentativos de movilidad

Estos dispositivos asumen un papel importante por su simplicidad y potencial en la ayuda a la rehabilitación. Los andadores funcionan como soporte durante

la bipedestación y, además usan la propia capacidad de locomoción del individuo para moverse y así evitar el uso temprano de las sillas de ruedas. (Lacey & Dawson-Howe, 1997)

Los andadores se prescriben para proporcionar soporte, mantener el equilibrio y mejorar la movilidad independiente de los pacientes. Estos aparatos aumentan la confianza y el sentido de seguridad, con lo cual se incrementa el nivel de actividad y la independencia de la persona. Puede haber beneficios fisiológicos como el limitar la osteoporosis, reducir el condicionamiento cardiopulmonar y mejorar la circulación periférica (Constantinescu, Leonard, Deeley, & Kurlan, 2007).

La pérdida de equilibrio se produce debido a movimientos voluntarios o perturbaciones externas, tales como deslizamientos, desplazamientos o empujes. El uso de un andador aumenta la base del soporte lo que permite un mayor rango tolerado de la posición del centro de masa (Tagawa, Shiba, Matsuo, & Yamashita, 2000).

Existen varios tipos de andadores, de acuerdo con diversos parámetros como son: materiales, accesorios y tamaños. Los cuales se clasifican en dos grupos: andadores convencionales y andadores inteligentes.

1.7.1. Andadores convencionales

Un aspecto importante para la clasificación es el tipo de contacto con el suelo, por lo que se tiene: andadores estándar, dos ruedas y cuatro ruedas.



Figura 2. Andadores convencionales

El andador estándar (Figura 2 a)) es un marco de aluminio de cuatro patas con puntas de goma que debe levantarse y moverse hacia adelante mientras se camina. Este tipo de andador se utiliza cuando se requiere asistencia máxima con el equilibrio de la persona. Pues bien es más fácil de utilizar que el bastón, pero se requiere un determinado grado de fuerza en la parte superior del cuerpo del paciente y capacidad cognitiva para usarlo con seguridad, además la marcha resulta ser anormal (Costa & Caldwell, 2006). La desventaja de estos dispositivos es que tienen poco valor de retropropulsión (muchos pacientes caen hacia atrás, aunque se sostengan del equipo) (Constantinescu, Leonard, Deeley, & Kurlan, 2007).

El andador con dos ruedas delanteras (Figura 2 b)) está diseñado para personas con las extremidades superiores más débiles o que tienden a caer hacia atrás cuando se levanta el equipo. Este tipo de andador promueve el desplazamiento hacia adelante del centro de gravedad corporal y permite un paso normal ya que el usuario puede continuar su marcha sin detenerse para levantar el dispositivo.

El andador de cuatro ruedas (Rollators) son los más fáciles de usar de los tres tipos, pero también proporciona menos estabilidad. Estudios realizados por (Constantinescu, Leonard, Deeley, & Kurlan, 2007), muestran que la mayor parte de usuarios prefieren estos en comparación con el resto de andadores convencionales (Figura 2 c)). Estos dispositivos no necesitan ser levantados y tienen sistemas que permiten rodar y pivotar suavemente y con poco esfuerzo. Promueven patrones de marcha naturales. Los andadores para uso dentro de interiores pueden ser equipados con una cesta para transportar determinados objetos y un asiento para que permita a la persona descansar (Costa & Caldwell, 2006).

Una de las desventajas es que los andadores incluyen la necesidad de más espacio para maniobrar en comparación con un bastón; dificultad para rodar sobre alfombras y cruzar obstáculos. El uso de cualquier dispositivo de ayuda para caminar, en particular los andadores, da como resultado una velocidad de

marcha lenta y requiere más energía y aptitud cardiovascular, que caminar sin ayuda. En este contexto, la asistencia durante el proceso de la marcha es una aplicación clara en el campo asistido de la robótica.

1.7.2. Andadores inteligentes

Surgen de la misma estructura que los convencionales, pero incluyen componentes electrónicos y robóticos, con lo cual se promueve una mejor asistencia a la marcha, especialmente en lo referente a la navegación (Morris, y otros, 2003) el monitoreo de la marcha y el apoyo parcial al peso corporal (Frizera, Abellanas, Ceres, Pons, & Raya, 2009).

Al diseñar un andador, es necesario considerar no solo las discapacidades de locomoción, sino también las deficiencias a nivel cognitivo y sensorial. Por ejemplo, los adultos mayores suelen presentar un comportamiento más lento y no están familiarizados con equipos mecatrónicos.

Los andadores inteligentes deben considerar los problemas de usabilidad, como: seguridad, comodidad y simplicidad de uso. El desarrollo de las TIC's permite integrar una gama de tecnologías útiles al andador inteligente, haciéndolos fáciles de manipular y cómodos para el usuario.

En general los andadores inteligentes se desarrollan para proporcionar asistencia al usuario en diferentes áreas, acorde a su necesidad, estos pueden presentar las siguientes funcionalidades:

- Apoyo físico
- Asistencia sensorial
- Asistencia cognitiva
- Vigilancia de salud

a) Apoyo físico

En su mayoría los andadores inteligentes presentan entre sus características el apoyo físico para proporcionar mayor estabilidad en la marcha. Existen dos tipos de asistencia física: pasiva y activa.

El soporte físico pasivo introduce mejoras en la estructura y en el diseño mecánico, por lo general las mejoras consisten en la colocación equilibrada de elementos pesados en la parte inferior del andador, de la misma forma como mejora en algunos dispositivos se reemplazan los manubrios por bases de soporte para los antebrazos (Ceres, y otros, 2005) Por ejemplo, el concepto básico de ASAS ofrece una plataforma que soporta los antebrazos.



Figura 3. Andador inteligente ASAS

Fuente: (Ceres, y otros, 2005)

Los ensayos demuestran que los soportes de antebrazos eliminan el grado de libertad del codo y más peso del usuario lo soporta el dispositivo, lo que aumenta el empuje y el coeficiente de fricción entre la rueda y el piso, y así reducir riesgos de deslizamiento (Neto, 2010).

En los andadores de cuatro ruedas, el problema es el control de movimiento libre del dispositivo. Estos se encuentran equipados con un sistema de frenos similar a los que se puede apreciar en las bicicletas. Por tanto, usar un andador convencional requiere: fuerza muscular, coordinación y capacidad de reacción, en el caso de que alguna de estas facultades falle el usuario corre el riesgo de caída.

b) Asistencia sensorial

Los andadores inteligentes pueden proporcionar asistencia sensorial al usuario en lo referente a navegación y seguridad. La detección de obstáculos es

de suma importancia para las personas que usan andadores, además a causa de la edad se deteriora el equilibrio y las variaciones en la superficie representan serios desafíos incluso con la ayuda de dispositivos.

La navegación y detección de obstáculos emplea sensores de visión, ultrasónicos e infrarrojos capaces de detectar obstáculos inclusive en movimiento. El sistema de control ayuda al usuario a evadir obstáculos ya sea mediante señales sonoras o de vibración que adviertan de interrupciones en el tránsito, por otro lado, los actuadores (motores) pueden ser operados directamente al variar la trayectoria. Esta última se diseña para personas con pérdida de visión progresiva o para ayudar a navegar en ambientes con múltiples obstáculos dinámicos.

c) Asistencia cognitiva

Una función que se puede implementar en un andador inteligente es la capacidad de navegación y localización automática en el interior de edificios y al aire libre. Estos son importantes para personas con problemas cognitivos y relacionados con memoria y ubicación. Estos dispositivos se programan para seguir caminos predeterminados en el interior de una casa o centro de cuidados, mientras que otros tienen la capacidad de crear mapas de un entorno desconocido o localización en un mapa al utilizar marcadores (Cortés, y otros, 2008) (Morris, y otros, 2003).

d) Vigilancia de salud

En situaciones de usuarios específicos el andador inteligente se puede implementar con un sistema para supervisar algunos parámetros de salud, con esta información se mantiene un historial médico o para informar al centro de salud o personal médico en caso de presentarse alguna situación de emergencia, en especial en pacientes que padecen de enfermedades cardiorrespiratorias.

1.8. Estados del arte de andadores inteligentes

Los adultos mayores necesitan de ayuda para suprimir déficits funcionales que se presentan como consecuencia del envejecimiento, estos padecimientos

no solo se refieren a la capacidad de movilidad y estabilidad física sino también problemas sensoriales y cognitivos, a continuación, se describirán los andadores inteligentes que sobresalen en la literatura:

1.8.1. Mobil

Este dispositivo presenta cuatro ruedas-libres y dos que brindan tracción y está diseñado para ofrecer más soporte mediante sus plataformas de apoyo de antebrazos además el apoyo que brinda a las personas al momento de levantarse o sentarse.



Figura 4. Andador inteligente Mobil

Fuente: (Borgolte, 1999)

El dispositivo tiene dos modos de operación, uno comandado por un mando a distancia o mediante el seguimiento al usuario, para el segundo el usuario debe utilizar un cinturón activo emisor de ultrasonidos que se comunica con el receptor ubicado en la parte alta del equipo (Borgolte, 1999).

1.8.2. PAM (personal Adaptive Mobility)

Es un proyecto del DR, Gerard Lacey, el dispositivo ha tenido diversas versiones que se detallan a continuación:

PAM-AID

Este dispositivo presenta tres modos de operación: por control humano, no supervisado y por control compartido con la ayuda de sensores y de visión, no dispone de motores tractores, pero cuenta con unos de dirección (MacNamara & Lacey, 2000).



Figura 5. PAM-AID

Fuente: *(Ceres, y otros, 2005)*

VA-PAMAID (Veterans Affairs Personal Adaptive Mobility Aid)

Cuenta con sensores ultrasónicos y laser en la parte inferior frontal y lateral para detectar y evadir elementos que pueden atravesarse en su trayectoria. Las empuñaduras y el manillar están diseñadas con muelles y encoders para medir desplazamientos y estimar la dirección de la marcha marcada (Rentschler, Cooper, Blasch, & Boninger, 2003).



Figura 6. Andador VA PAMAID

Fuente: *(Rentschler, Cooper, Blasch, & Boninger, 2003)*

1.8.3. GUIDO

Es el nombre que recibió el proyecto PAM AID posteriormente, en el cual se implementaron mejoras estéticas y ergonómicas. Este dispositivo es capaz de crear mapas de entorno en el que se encuentra mediante la utilización de sensores. Los sensores láser detectan obstáculos frente al andador, mientras que los sensores sonar identifican objetos en los laterales, de manera que el dispositivo es capaz de detectar puntos de referencia además de puertas y pasillos. Se incluyen también sensores de posición con el objetivo de reconstruir la trayectoria por odometría. El dispositivo es capaz de localizarse y construir mapas simultáneamente (SLAM- Simultaneous Localization and Map Building) (Lacey & Rodriguez-Losada, 2008).



Figura 7. Andador Inteligente GUIDO

Fuente: (Lacey & Rodriguez-Losada, The evolution of guide, 2008)

1.8.4. PAMM Smart Walker (Personal Aid for Mobility and Monitoring)

Este dispositivo además de proporcionar apoyo físico y monitorización de salud se encarga de ayudar al usuario recordándole eventos importantes como horarios de tomar medicamentos. Además de ayuda para el adulto mayor, el dispositivo fue diseñado para rehabilitación de pacientes más jóvenes.

El dispositivo es capaz de monitorizar la actividad física del usuario, los datos obtenidos pueden servir para analizar el deterioro o avance de algún tipo de patología, además cuenta con un monitor de señales electrocardiográficas para prevenir algún problema cardíaco. Para su navegación cuenta con sensores: sonar, cámara CCD y sensores de fuerza.



Figura 8. Andador Inteligente PAMM

Fuente: (Spenko, Yu, & Dubowsky, 2006)

El sensor sonar es utilizado para evadir obstáculos en la trayectoria, mientras que la cámara ayuda a determinar la ubicación mediante marcas colocadas en el techo y de los sensores de fuerza es extraído la información de guiado (Spenko, Yu, & Dubowsky, 2006).

1.8.5. MARC (Medical Automation Research Center)

Andador inteligente que dispone de tres ruedas e incluye empuñaduras de 6 grados de libertad los cuales miden fuerzas y pares del usuario para estimar la trayectoria, además incorpora sensores láser para la detección de obstáculos y frenos horizontales (Frizera, Ceres, Pons, Abellanas, & Raya, 2008).



Figura 9. Andador Inteligente MARC

Fuente: (Frizera, Abellanas, Ceres, Pons, & Raya, 2009)

1.8.6. Care-O-bot

Desarrollado por Fraunhofer Institute Manufacturing Engineering and Automation (IPA), en Alemania, posee un cuerpo cilíndrico del que sobresalen los brazos para el apoyo y guiado. El uso de técnicas de navegación reactiva junto con sensores láser se emplea para evitar obstáculos (Graf, 2001).



Figura 10. Prototipo del Care-O-bot

Fuente: (Graf, 2001)

1.8.7. NURSEBOT

Desarrollado por la Carnegie Mellon University, cuenta con dos ruedas de tracción, además es capaz de ubicar un lugar apropiado para aparcarse y posterior retornar al usuario cuando este lo solicite. Al momento de ser empleado, las ruedas que brindan tracción no influyen sobre la marcha, la ayuda que proporciona es un mapa de guiado a través de una pantalla con flechas (Glover, y otros, 2003).



Figura 11. Andador Inteligente NURSEBOT

Fuente: (Glover, y otros, 2003)

1.8.8. I-Walker

Es un andador desarrollado dentro del proyecto SHARE-it coordinado por el Prof. Ulises Cortés, docente de la Universidad Politécnica de Cataluña. Este dispositivo cuenta con sensores de fuerza, sensores de inclinación y un sistema de detección de la posición de los pies del usuario, además un sistema ultrasónico de localización y un par de ruedas de tracción motorizadas (Cortes, y otros, 2008)



Figura 12. I-Walker

Fuente: (Cortes, y otros, 2008)

1.9. Robótica móvil

La robótica móvil actualmente se ha convertido en una de las ramas con mayor enfoque e investigación científica por su versatilidad en diversas aplicaciones, las cuales varían de acuerdo con el entorno siendo en aspectos generales entornos interiores y exteriores.

Según Bräunl (1998) un robot móvil se define como “una máquina automática que posee la capacidad de movimiento dentro de un ambiente propio”, no obstante, el término abarca varios aspectos relevantes como cinemática, percepción, localización en un ambiente, control, entre otros. Dentro de la navegación se establecen parámetros como la evasión de obstáculos tanto estáticos como dinámicos que se encuentren dentro de la trayectoria de movimiento.

En el control de los robots móviles es necesario el conocimiento de su posición y orientación siendo la técnica más común la odometría que obtiene los valores de sensores generalmente denominados encoders, aunque la acumulación de error es grande para lo cual la inclusión de giroscopios y acelerómetros disminuyen en un porcentaje dicho error. La adición de más sensores influye en el control y costo computacional como es el caso de los sensores láser y/o sensores ultrasónicos en donde la relación de señal/ruido varía acorde a las características propias de los sensores y su respectivo acondicionamiento. (Ollero, 2007)

Los robots móviles tienen aplicaciones en el campo industrial por su versatilidad y flexibilidad en los procesos, en el transporte de componentes dentro de estaciones de trabajo, incluso constan de aplicaciones de monitoreo y control de ambientes donde la intervención de las personas es mínima ya sea por ser un entorno nocivo o que pueda causar algún tipo de daño a las personas. Además, forman parte del campo de la seguridad ya sea en la detección de intrusos o seguimiento de personas sospechosas

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL ANDADOR

Una vez revisada toda la parte teórica es importante plantear las alternativas de diseño del andador. El capítulo 2 está basado en el modelo de diseño concurrente (Ulrich & Eppinger, 2013), empieza por identificar las necesidades de los usuarios y de los diseñadores, que posteriormente son relevantes en la definición de las especificaciones. Éstos dos parámetros permiten la elaboración de la estructura funcional, que se evalúa posteriormente, y con ello se realiza la definición del diseño que ayuda en la selección e implementación de los componentes. Finalmente se realiza la evaluación, corrección y determinación de mejoras del diseño en el concepto final.

2.1. Definición de las necesidades

La definición de necesidades del cliente es parte integral en el proceso de desarrollo de un diseño o producto, ya que sirven en la identificación de las características que tendrá dicho diseño en su etapa final y las especificaciones técnicas del mismo.

Con respecto a la definición de las necesidades se realiza un procedimiento acorde con la metodología del diseño concurrente, que se basa en la recopilación de los datos sin procesar de los clientes, interpretar dichos datos en necesidades, los cuales se organizan con un nivel jerárquico para establecer la importancia relativa de las necesidades. Por último, el reflejar en los resultados y el proceso que abarca el conocimiento desconocido en primera instancia al recopilar la información. (Ulrich & Eppinger, 2013, pág. 89)

Las necesidades por considerar en el desarrollo del presente proyecto se pueden identificar en la Tabla 2, en donde se toman en cuenta parámetros como las necesidades de usuarios (U) y diseñadores (D1), y de manera semejante se los clasifican los conceptos en requerimientos (R) o deseos (D2). El propósito de dicha tabla es el esclarecer los puntos que abarca el diseño del presente andador.

Tabla 2.

Necesidades por atender en el proyecto

Concepto	N°	Propone	R/D2	Necesidad
	1	U	R	Diseño para interiores
	2	U/D1	R	Restringir velocidad de desplazamiento
Aplicación	3	U	R	Período de operatividad prolongado
	4	U/D1	R	Evasión de obstáculos
	5	U	R	Accesibilidad
	6	U/D1	R	Interfaz gráfica sencilla
	7	U/D1	R/D2	Apoyo de manos ajustable
Manufactura	8	D	D	Uso de materiales nuevos
	9	D	R	Estabilidad estática y dinámica
	10	U/D1	R/D2	Sistema de frenos
	11	D1	R/D2	Movimiento sencillo
Control	12	D1	R/D2	Tecnología de código abierto
	13	U/D1	R	Accionamiento por sensores
Costos	14	D1	D2	Relación de costo/beneficio

Leyenda. U: Usuario, D1: Diseñador, R: Requerimiento, D2: Diseño

2.2. Definición de las especificaciones

Las especificaciones objetivo son el resultado del vincular las necesidades del usuario con las métricas siendo estas últimas un parámetro medible relacionado con las necesidades. La relación fundamental es que por cada necesidad exista por lo menos una métrica.

Tabla 3.

Detalle de especificaciones

Necesidad	Métrica	Magnitud	Unidad
1,5,14	Distancia entre ruedas	60	cm.
2,9,11	Velocidad promedio de desplazamiento	0,5	m/s
8,10,14	Peso máximo por soportar		Kg
1,2,11,14	Número mínimo de motores	2	-

CONTINÚA 

1,9,11,14	Número de ruedas de apoyo	2	-
1,3,14	Duración mínima de la batería	2	Hora
4,6,12	Uso de tecnología abierta	-	-
8,14	Costo de implementación		USD
1,13	Distancia entre sensor y persona	10	cm.
1,7	Tamaño de altura del apoyo mínimo	80	cm.
8,12	Área de manipulación de interfaz	7	Inch ²
3,4	Resolución y enfoque de la cámara mínimos	640 x 480	Mpx.
1,2,3,4	Distancia máxima de percepción	3	m

En la tabla 3, se identifica la relación de las métricas con las necesidades de usuario, y de esta manera se tiene como referencia la magnitud promedio para el diseño del andador.

2.3. Definición de la estructura funcional

Para determinar la estructura funcional del andador es necesario identificar la forma con la cual debe trabajar, por tal motivo, se prosigue a desglosar su operatividad en una estructura modular.

Tabla 4.

Estructura modular de andador

N°	Módulo	Sub- módulos
1	Sistema mecánico	Motriz (Tracción)
		Tipo de desplazamiento
		Diseño estructural
		Controladores
2	Sistema eléctrico/electrónico	Energía
		Accionamiento
		Odometría
		Visión
3	Sistema de control	Adquisición de datos
		Control principal
		Software de programación

La estructura modular por implementarse en el andador está mostrada en la Tabla 4.

2.4. Definición de alternativas de diseño

En las alternativas de diseño se utiliza los módulos presentes en la Tabla 4, y así mostrar diferentes opciones para el óptimo uso de los módulos definidos.

2.5. Módulo 1. Sistema mecánico

2.5.1. Motriz

En esta sección se seleccionan los componentes que producen la energía de traslación para el movimiento de la estructura del andador. Existe diferentes tipos de actuadores, pero para aplicaciones de robótica móvil la utilización de motores de corriente continua es la óptima y así se deja de lado opciones como motores de combustión interna o motores de corriente alterna que conllevan un alto costo de implementación y mantenimiento. En la Tabla 5 se muestra los criterios de selección con las correspondientes alternativas de solución para el sistema motriz.

Tabla 5.

Matriz de selección de conceptos (Sistema Motriz)

Criterios de selección	Servomotores	Motores dc con caja reductora	Motores paso a paso
Potencia	-	0	+
Dimensiones	+	+	+
Facilidad de mantenimiento	0	+	0
Alimentación simple	0	+	+
Precio	+	+	-
Facilidad de implementación	0	0	0
Precisión	+	+	+
Suma +	4	5	4
Suma 0	3	2	2
Suma -	1	0	1
Evaluación Neta	3	5	3
¿Continuar?	Revisar	Si	Revisar

A continuación, se prosigue con la ponderación de los criterios de selección, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Matriz de evaluación de conceptos (Sistema Motriz)

Criterios de selección	Peso	Servomotor		Motores dc con caja reductora		Motores paso a paso	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Potencia	25%	3	0,75	5	1,25	5	1,25
Dimensiones	15%	2	0,3	4	0,6	3	0,45
Facilidad de mantenimiento	10%	4	0,4	5	0,5	3	0,3
Alimentación simple	15%	5	0,75	4	0,6	4	0,6
Precio	15%	3	0,45	4	0,6	2	0,3
Facilidad de implementación	10%	3	0,3	3	0,3	3	0,3
Precisión	10%	3	0,3	3	0,3	3	0,3
	Total		3,25		4,15		3,5
	Lugar		3		1		2
¿Continuar?			No		Si		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

En la tabla anterior se evidencia la selección general de un motor dc con caja reductora siendo el principal factor de selección la potencia a utilizar, con lo cual se prosigue al adecuado dimensionamiento de este mediante los cálculos siguientes:

Cálculo de las RPM de los motores

La velocidad de marcha de adultos mayores es aproximadamente 0.92 m/s (Carrera & Salazar, 2014) y se considera el diámetro de las ruedas que brindan tracción de 173 mm. Al aplicar la ecuación 1, es posible calcular las RPM de los motores.

$$RPM = \frac{60v}{\pi d} \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de marcha y d es el diámetro de las ruedas.

$$RPM = \frac{60 * 0.92(m/s)}{3.14 * 0.173m}$$

$$RPM = 101.6 \frac{rev}{min}$$

Las revoluciones por minuto calculadas con 173mm de diámetro en las ruedas y 0.92 m/s de velocidad es de 101.6 RPM. Por lo tanto, se considera el valor de 110 RPM como valor estándar.

Cálculo del torque del motor

Ahora se procede a calcular el torque necesario para mover el andador:

- Número de ruedas = Cuatro ruedas incluidas dos ruedas locas.
- Número de motores = Dos.

Se asume un coeficiente de fricción igual a 0.5 al considerar que el andador se manipulará en el interior de un asilo.

- Radio de la rueda = 86.5 mm.
- Peso del andador = $W = mg = 100N$

A continuación, se considera la masa promedio de un adulto mayor de 60 kg. El peso = $W = mg = 600N$ el cual al apoyarse en los manubrios se estima un tercio del peso total =200N.

Se toma el total de peso = peso del andador + carga útil = 100N + 200N = 300N.

El peso total actúa sobre las cuatro ruedas y puede escribirse como $2*N1 + 2*N2 = W$. en donde, N1 son las ruedas locas y N2 son las ruedas de tracción.

Se asume que el andador es estacionario. El máximo torque es requerido cuando este inicia su movimiento. Además, debe superar la fricción.

Se puede escribir la fuerza de fricción menos el torque = 0 justo antes de iniciar el movimiento. En esta condición el máximo torque del andador es el siguiente:

$$\mu Nr - T = 0 \quad (2)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción, N es el peso que actúa en cada rueda, r el radio de la rueda, y T es el torque.

$N = \frac{w}{4}$ Al asumir que el peso es distribuido equitativamente en las cuatro ruedas. Por lo tanto, se obtiene:

$$0.5 * \left(\frac{300N}{4}\right) * 0.0865m - T = 0$$

$$T = 3.24N - m \text{ ó } T = 33.04 Kg - cm$$

Mediante los cálculos anteriores se prosigue a seleccionar un motor Dc tipo gusano de alto torque a 110 rpm cuyas características se muestran en la hoja de datos del anexo 1.



Figura 13. Motor DC con caja reductora

2.5.2. Tipo de desplazamiento

El tipo de desplazamiento implica el mecanismo de traslación a utilizar, teniendo en cuenta las especificaciones técnicas con un uso mínimo de dos motores, en la Tabla 7 se identifican las alternativas de solución con sus respectivos criterios de selección.

Tabla 7.

Matriz de selección de conceptos (Tipo de desplazamiento)

Criterios de selección	Desplazamiento por el sistema	Desplazamiento por rueda motora	Desplazamiento diferencial
	Ackerman	única	
Facilidad de control	-	+	+
Maniobrabilidad	0	+	+
Estabilidad	+	-	0
Deslizamientos mínimos	+	-	0
Precio	-	+	+
Fácil implementación	0	+	+
Suma +	2	4	4
Suma 0	2	0	2
Suma -	2	2	0
Evaluación Neta	0	2	4
¿Continuar?	No	Revisar	Sí

En cambio, en la Tabla 8, mediante la ponderación de los criterios de selección se identifica como la solución óptima el uso del desplazamiento diferencial por su facilidad de control con deslizamientos mínimos en superficies.

Tabla 8.

Matriz de evaluación de conceptos (Tipo de desplazamiento)

Criterios de selección	Peso	Desplazamiento por sistema		Desplazamiento por rueda motora		Desplazamiento diferencial	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Facilidad de control	30%	4	1,2	5	1,5	5	1,5
Maniobrabilidad	20%	3	0,6	4	0,8	4	0,8
Estabilidad	15%	4	0,6	2	0,3	5	0,75
Deslizamientos mínimos	15%	5	0,75	3	0,45	4	0,6
Precio	10%	3	0,3	5	0,5	4	0,4
Fácil implementación	10%	3	0,3	3	0,3	3	0,3

CONTINÚA 

	Total	3,75	3,85	4,35
	Luga	3	2	1
	r			
¿Continuar?		No	No	Si

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

Cualquier sistema de desplazamiento conlleva el cálculo del modelo matemático del mismo y siendo el caso de selección del sistema diferencial se presentan a continuación los aspectos generales del mismo, así como sus cálculos.

a) Modelo matemático

Un robot móvil, tiene 6 grados de libertad (DOF) del inglés (degrees of freedom) (x, y, z , roll, pitch, yaw). Está compuesto de dos partes: la posición (x, y, z) y la rotación (Roll, Pitch, Yaw).

Para un robot en una superficie de dos dimensiones, la posición 2D (x, y, θ)

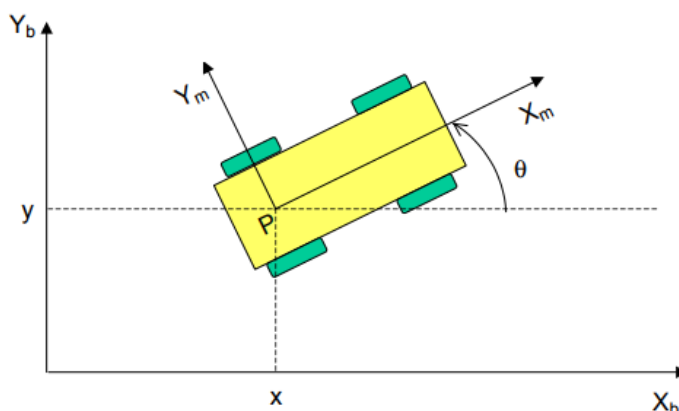


Figura 14. Posición del robot (x, y, θ)

Para un robot con tracción diferencial, la dirección del movimiento se controla por las velocidades v_l y v_r de las ruedas izquierda y derecha respectivamente.

Las siguientes ecuaciones cinemáticas para un vehículo móvil con tracción diferencial, se usan para resolver el problema de estimar la posición (x', y', θ') en un tiempo $t + \delta t$, al partir de la posición (x, y, θ) y un tiempo t .

b) Cinemática directa

Se parte de observar como un movimiento de rotación simple de la rueda, en la figura 15, se aprecia una rueda en el sistema de coordenadas la misma que se observa desde su perspectiva superior.

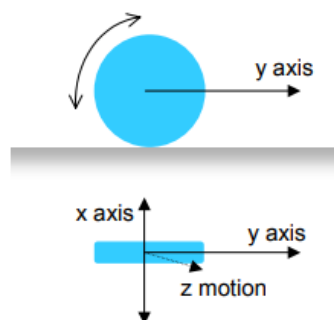


Figura 15. Cinemática de una rueda

Para un giro completo de la rueda, el centro se mueve una distancia de $2\pi r_\omega$, donde r_ω es el radio de la rueda, se asume que no existe deslizamiento y el movimiento es únicamente en dos dimensiones.

Para un robot con varias ruedas, cada una debe girar sobre su propio eje Y, y debe existir un punto central para la rotación, el cual es denominado ICC (Instantaneous Center of Curvature)

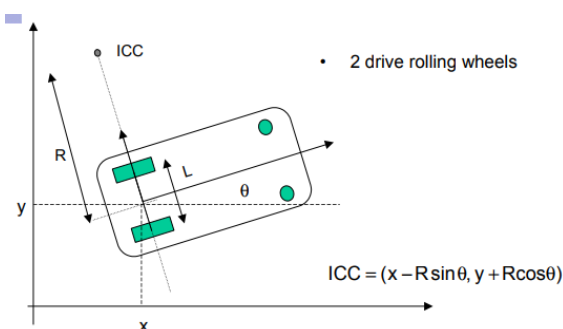


Figura 16. Configuración de ruedas en tracción diferencial

Un robot con tracción diferencial está formado por dos ruedas colocadas sobre un eje común. Cuando las ruedas giran en el suelo, existe un punto ICC (siempre que $v_l \neq v_r$) alrededor del cual ambas giran. Al variar v_l y v_r , ICC se mueve y el robot toma diferentes trayectorias.

El concepto principal para determinar las ecuaciones cinemáticas es la velocidad angular ω del robot. Cada rueda gira alrededor del ICC, a lo largo de un círculo con radio R .

La velocidad de la rueda está dada por $v = \frac{2\pi R}{T}$ donde T es el tiempo necesario para dar una vuelta completa alrededor del ICC. La velocidad angular ω es definida como $\omega = \frac{2\pi}{T}$ en radianes por segundo. Al combinar las ecuaciones para v y ω se obtiene:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi R}{RT} = \frac{v}{R}$$

$$\omega R = v \quad (3)$$

Nótese que conectados en R y v para ambas ruedas, izquierda y derecha da la misma ω de otra manera las ruedas se moverían una con respecto a la otra. Por lo tanto, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\omega \left(R + \frac{L}{2} \right) = v_r \quad (4)$$

$$\omega \left(R - \frac{L}{2} \right) = v_l \quad (5)$$

Donde, R es la distancia entre el ICC y el punto medio del eje de las ruedas, y L la longitud entre ambas ruedas diferenciales. Al resolver para ω y R se obtiene:

$$R = \frac{L(v_l + v_r)}{2(v_r - v_l)} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{(v_r - v_l)}{L} \quad (7)$$

La expresión para el radio R y la velocidad angular ω contiene la información necesaria para resolver el problema de cinemática directa. Se asume que el robot gira alrededor del ICC con una velocidad angular ω por δt segundos.

$$\theta' = \omega \delta t + \theta \quad (8)$$

Donde el centro de rotación está dado por trigonometría básica como:

$$ICC = [ICC_x, ICC_y] = [x - R \sin\theta, y + r \cos\theta] \quad (9)$$

Dada la posición inicial (x, y) se puede calcular la nueva posición (x', y') al usar la matriz de rotación. Si gira alrededor del ICC con una velocidad angular ω por un intervalo de tiempo δt segundos se obtiene la siguiente posición al tiempo $t + \delta t$:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega \delta t) & -\sin(\omega \delta t) \\ \sin(\omega \delta t) & \cos(\omega \delta t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - ICC_x \\ y - ICC_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ICC_x \\ ICC_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

Por lo tanto, la nueva posición (x', y', θ') puede ser calculado de la ecuación 8) y 10) dados $\omega, \delta t$ y R . En la ecuación 5 está dado, pero la velocidad de las ruedas v_l y v_r son difíciles de calcular con la precisión del caso. En lugar de calcular, la rotación de cada rueda puede ser medida por instrumentos denominados encoders. Estos sensores son montados en los ejes de las ruedas. Las señales del encoder alimentan contadores digitales tal que la distancia recorrida desde el tiempo t hasta $t + \delta t$ es derivado del incremento en el valor del contador n : $n \text{ step} = v \delta t$. Para esto, v se calcula como:

$$v = \frac{n \text{ step}}{\delta t} \quad (11)$$

Al utilizar esta ecuación en 5 y 6 se obtiene:

$$R = \frac{L(v_l + v_r)}{2(v_r - v_l)} = \frac{L(n_l + n_r)}{2(n_r - n_l)} \quad (12)$$

$$\delta t = \frac{(v_r - v_l) \delta t}{L} = \frac{(n_r - n_l) \text{ step}}{L} \quad (13)$$

Donde n_l , n_r son el conteo de los encoder y v_l , v_r corresponden a las velocidades de las ruedas izquierda y derecha, respectivamente. Así, si el robot parte de la posición (x, y, θ) y se mueve n_l y n_r durante un intervalo de tiempo δt , la nueva posición (x', y', θ') esta dada por:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega\delta t) & -\sin(\omega\delta t) & 0 \\ \sin(\omega\delta t) & \cos(\omega\delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x - ICC_x \\ y - ICC_y \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ICC_x \\ ICC_y \\ \omega\delta t \end{pmatrix} \quad (14)$$

Donde

$$R = \frac{L(n_l + n_r)}{2(n_r - n_l)} \quad (15)$$

$$\omega\delta t = \frac{(n_r - n_l) \text{ step}}{L} \quad (16)$$

$$ICC = [x - R \sin\theta, y + R \cos\theta] \quad (17)$$

Nótese que las ecuaciones 14 y 17 son independientes de δt lo cual el difícil estimar con precisión.

c) Cinemática inversa

Mientras las ecuaciones de cinemática directa proporcionan una posición actualizada dada la velocidad de las ruedas, se puede escribir las fórmulas inversas para el problema:

Al partir de la posición (x, y, θ) y el tiempo t , se determina los parámetros de control v_l y v_r tal que la posición al tiempo $t + \delta t$ sea (x', y', θ') .

Este problema a menudo no tiene solución, en el sentido de que el robot no puede alcanzar una pose arbitraria simplemente al configurar los valores adecuados para las velocidades de las ruedas v_l y v_r y dejar a los motores activos durante un intervalo de tiempo. Para algunos robots y vehículos es posible, y estos vehículos se llaman homólogos. Sin embargo, la mayoría de los vehículos y robots no son homólogos. Por ejemplo, un automóvil no lo es y por lo que el estacionamiento en paralelo es tan difícil.

Para un robot no homólogo, hay formas de aumentar la movilidad restringida. Si se permite una secuencia de diferentes (v_l y v_r), normalmente hay infinitas formas de pasar de una postura a otra. Desde aquí se estudia el caso especial con un robot dirigido por un controlador diferencial. Al insertar valores en las ecuaciones 14-17, se identifica dos casos especiales de control:

1. $v_r = v_l \Rightarrow n_r = n_l \Rightarrow R = \infty, \omega\delta t = 0 \Rightarrow$ el robot se mueve en línea recta y θ se mantiene constante.

2. $v_r = -v_l \Rightarrow n_r = -n_l \Rightarrow R = 0, \omega\delta t = \frac{2n_l \text{step}}{n}$ y $ICC = [ICC_x, ICC_y] = [x, y] \Rightarrow x' = x, y' = y, \theta' = \theta + \omega\delta t \Rightarrow$ el robot tiende a gira alrededor de ICC y conserva su misma posición.

Para combinar estas dos operaciones el siguiente algoritmo puede ser usado para alcanzar una posición objetivo al partir de cualquier posición inicial:

1. Gire hasta que la orientación del robot coincida con la línea desde la posición inicial hasta la posición objetivo:

$$v_r = -v_l = v_{rot}$$

2. Conduzca recto hasta que la posición del robot coincida con la posición objetivo:

$$v_r = v_l = v_{ahead}$$

3. Gire hasta que la orientación del robot coincida con la orientación del objetivo:

$$v_r = -v_l = v_{rot}$$

Donde v_{rot} y v_{ahead} pueden elegirse arbitrariamente.

2.5.3. Diseño estructural

La idea principal de este proyecto es un mecanismo móvil sin cables que inhabiliten o impidan su movimiento por lo cual al tomar esta consideración es necesario el diseño de la base donde se soportan los actuadores, sensores,

drivers de motores, el sistema de control y suministro de energía, no obstante, en la investigación de los estados del arte del capítulo uno, al identificar las ventajas de los andadores se comparan los diversos tipos de andadores convencionales como se aprecia en la tabla 9.

Tabla 9.

Matriz de selección de conceptos (Estructura Base)

Criterios de selección	Estándar	Dos Ruedas	Cuatro Ruedas
Asistencia en el equilibrio	+	+	0
Asistencia en la marcha	-	-	+
Valor de retropropulsión	-	0	+
Facilidad de utilización	0	+	+
Facilidad de adquisición	+	+	0
Dimensiones	0	0	0
Suma +	2	3	3
Suma 0	2	2	3
Suma -	2	1	0
Evaluación Neta	0	2	3
¿Continuar?	No	No	Si

El valor de retropropulsión dentro de las características de los andadores convencionales se refiere a la fuerza necesaria que el ocupante debe aplicar para movilizar el dispositivo con la probabilidad que exista una caída por la parte posterior del mismo, como se observa en la Tabla 10, dicha característica posee una alta ponderación con lo cual se obtiene como selección un andador con cuatro ruedas.

Tabla 10.

Matriz de evaluación de conceptos (Estructura Base)

Criterios de selección	Peso	Estándar		Dos Ruedas		Cuatro Ruedas	
		Calif.	Ev. Po	Calif.	Ev. Po	Calif.	Ev. Po
Asistencia en el equilibrio	15%	4	0,6	4	0,6	3	0,45
Asistencia en la marcha	10%	2	0,2	3	0,3	5	0,5
Valor de retropropulsión	25%	2	0,5	3	0,75	5	1,25
Facilidad de utilización	15%	3	0,45	4	0,6	5	0,75
Facilidad de adquisición	20%	5	1	5	1	4	0,8
Dimensiones	15%	3	0,45	3	0,45	3	0,45
	Total		3,2		3,7		4,2

CONTINÚA 

	Lugar	3	2	1
¿Continuar?		No	No	Si

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada



Figura 17. Selección de la estructura base del andador

Llegado aquí, se muestra la figura 18 en donde se identifican las ruedas motrices para el desplazamiento diferencial y con ayuda de los puntos de apoyo siendo en este caso las ruedas locas identificadas en la parte superior.

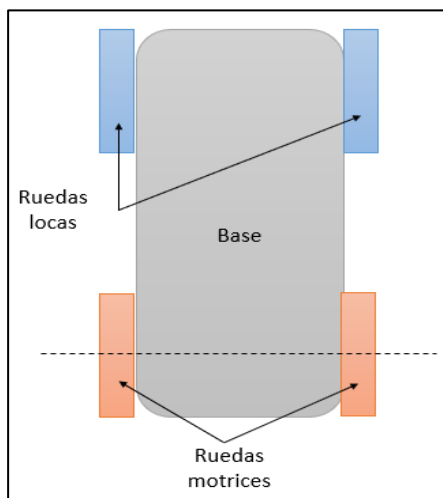


Figura 18. Sistema de movimiento diferencial

Las características técnicas para el diseño e implementación de las ruedas cubren aspectos como el tener un peso ligero, pero con un labrado considerable para obtener un buen agarre en las superficies y de esta forma evitar deslizamiento, por otro lado, las ruedas de apoyo deben permitir una respuesta

rápida y por ende se seleccionan las ruedas de tipo castor, como se muestra en la figura 19.

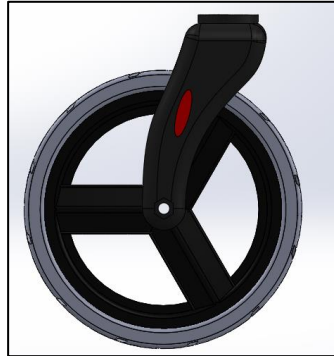


Figura 19. Selección rueda tipo castor

El sistema mecánico ajustable a la altura de la persona se realiza por medio de la utilización de dos perfiles siendo el uno fijo y el otro móvil los cuales son sujetos por un perno en orificios separados equidistantes entre ellos como se muestra en la figura 20.

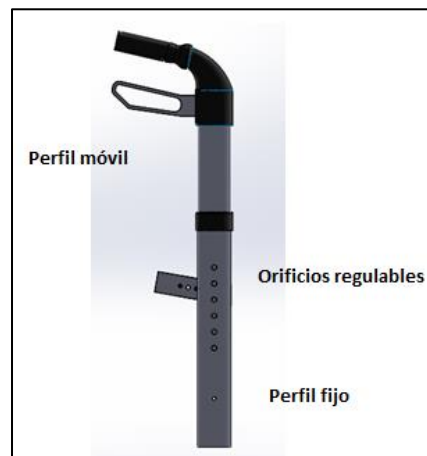


Figura 20. Selección del sistema regulable de altura

a) Diseño de las bases de motores.

Para el diseño de las bases se cuenta con los motores dc con caja reductora que previamente se escogió mediante las matrices de selección y evaluación de conceptos respectivamente, al contar con este tipo de motor, se procede a

diseñar las bases que puedan adaptarse tanto a la caja reductora y al perfil de la estructura (ver figura 21).

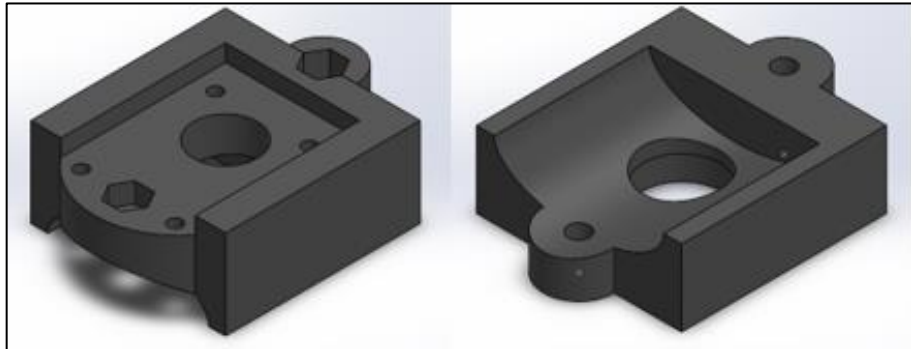


Figura 21. Diseño de las bases de los motores

Para continuar con el procedimiento respectivo, surge la necesidad de buscar el material para construir el acople, motivo por el cual se selecciona el PLA (Ácido Poli láctico), muy utilizado en impresión 3D cuyo método es elegido para la construcción debido a sus características y accesibilidad de uso.

En la figura 22 se observa el ensamblaje correspondiente a la rueda de tracción donde están las dos bases de los motores junto al perfil a utilizar, mientras tanto en la figura 23 se aprecia el análisis estructural del mismo en un software de diseño

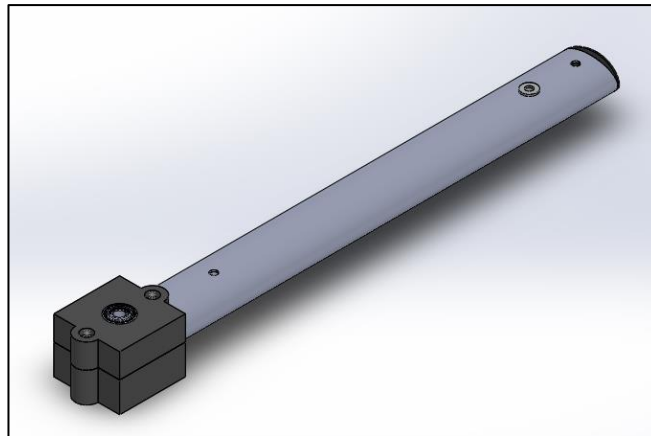


Figura 22. Subensamblaje de las bases de los motores

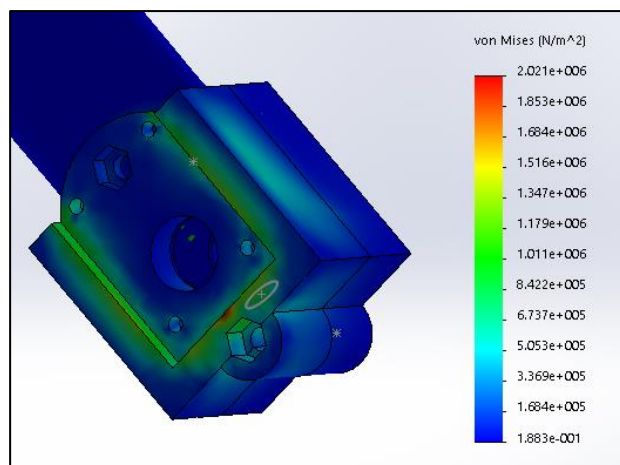


Figura 23. Análisis del Material en SolidWorks

b) Diseño del eje de acople motor-rueda

Se dispone de una rueda de estructura plástica con llanta de caucho, la cual recibirá la transmisión de movimiento del motor que se seleccionó, dada la estructura surge la necesidad de un acople para el eje del motor de 8 mm y la misma dimensión para ingresar en la rueda y proporcionar movimiento. En la figura 24 se observa el análisis de dicho eje acorde a las fuerzas y momentos de torsión a las que está sometido.

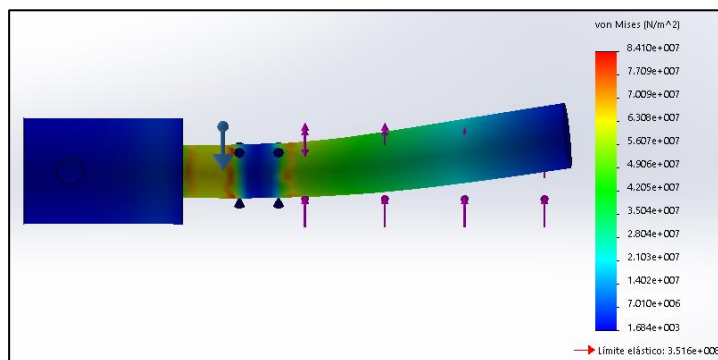


Figura 24. Análisis del acople motor-rueda

c) Diseño del bocín de la rueda posterior

Al poseer la rueda con una perforación de mayor dimensión que el eje de acople, es necesario embocinar dicha rueda, el material utilizado es aluminio por facilidad de mecanizado y por ser ligero (ver figura 25).

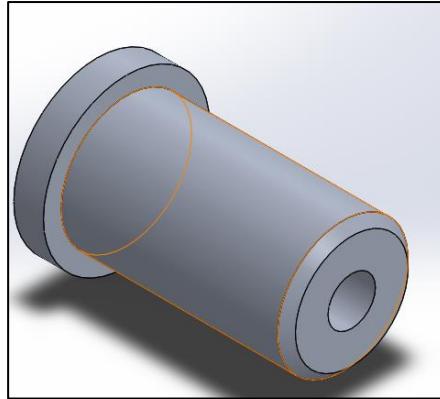


Figura 25. Bocín rueda posterior

d) Selección de rodamiento

La selección de un rodamiento adecuado y óptimo en la aplicación se la realiza mediante una página web de SKF en donde al ingresar una serie de datos y especificaciones de uso, la selección será fácil y eficaz. Para eso se toman las siguientes consideraciones:

Velocidad de rotación constante de 110 RPM

Temperatura de trabajo: 20°C

Carga radial: 175 N

Ambiente de trabajo: considerablemente limpio

Lubricación: Por grasa y sin lubricación externa

Diámetro interno: 8 mm

Diámetro externo: 22 mm

La página web muestra varias opciones de los cuales se selecciona el rodamiento 608 (rodamiento rígido de bolas, una hilera) el cual tendrá un estimado de vida útil de 799000 horas en trabajo continuo. Para mayor detalle revisar especificaciones y datos técnicos en el anexo 2.

En la figura 26 se encuentra la tabla con los valores resultantes de la selección del rodamiento, mientras que en la figura 27 está el aspecto físico de dicho rodamiento.

Result

Deep groove ball bearings, Single row

Designation	d mm	D mm	B mm	C kN	C ₀ kN	L _{10m} 10 ⁶ rev	L _{10mh} hours	t _f hours	Notes
608 *	8.0	22.0	7.0	3.45	1.37	5270	799000	-	Loads

*SKF Explorer bearing

Back Save Report

Figura 26. Resultados de la selección de rodamiento



Figura 27. Rodamiento SKF 608

e) Diseño de la base para el sistema electrónico

Para la ubicación de los componentes electrónicos como: drivers, tarjeta de adquisición de datos, convertidor de voltaje, baterías y cableado es necesaria una base rígida que en lo posible será ubicada lo más cerca al suelo. Esto con la finalidad equilibrar el peso de la estructura e incrementar la adherencia de las ruedas.

La base será fabricada en aluminio que se caracteriza por ser ligero, resistente a la corrosión y en aleaciones adecuadas, posee excelente resistencia mecánica. Su diseño debe adaptarse a la estructura seleccionada por lo que su forma se aprecia en la figura 28.

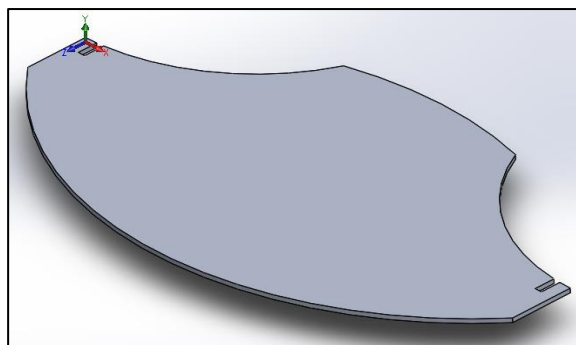


Figura 28. Base de la electrónica del andador

A la vez se realiza un análisis mediante software para determinar el espesor óptimo sin tener problemas de pandeo por las cargas a colocar o por el propio peso de la plancha además de efectos de la gravedad. La carga total a colocar al considerar el peso de baterías, drivers, tarjeta controladora y carcasa es de 20N (ver figura 29).

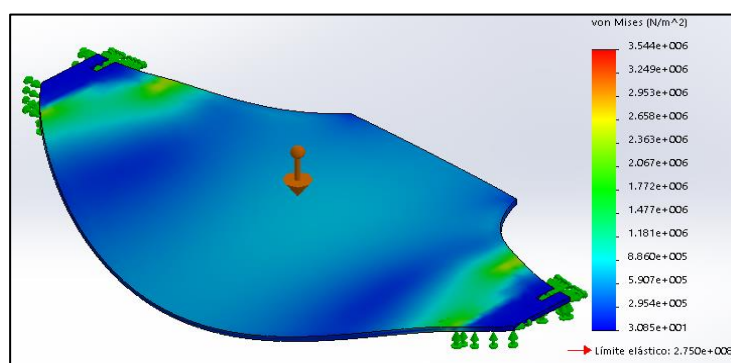


Figura 29. Análisis de la base de componentes electrónicos

f) Diseño de la carcasa para elementos electrónicos

Como es de suponerse, la electrónica en el presente proyecto no puede estar expuesta a la intemperie, tampoco ser susceptible a que cualquier persona por curiosidad u otra razón, manipule directamente los componentes electrónicos ya que el andador puede sufrir fallos y provocar un accidente. Debido a esta situación se opta por proteger con una carcasa los componentes delicados y que no necesitan ser manipulados por el usuario.

La carcasa es de acrílico ya que ofrece propiedades con respecto a los impactos, es más ligero con respecto al aluminio, resistencia a la intemperie y

permite un termo formado con lo que el diseño puede ser variado y no una típica caja prismática (ver figura 30).

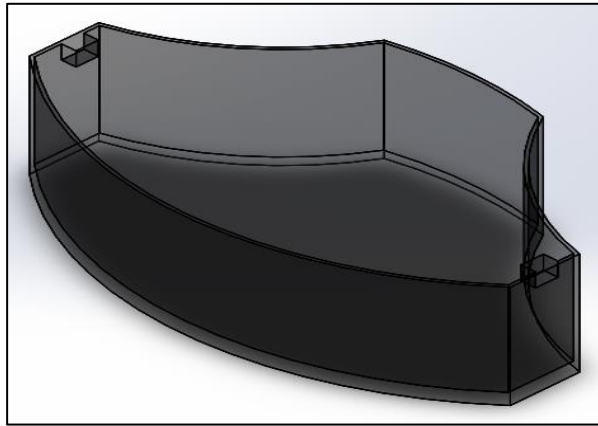


Figura 30. Carcasa de componentes electrónicos

g) Diseño de la base superior

Para colocar el miniordenador que es la unidad de procesamiento y la Kinect es imprescindible de una base o soporte que se ubique a una altura en la cual el usuario pueda acceder y el campo de visión necesario para que la cámara obtenga un video en tiempo real y facilite la programación.

El material empleado es aluminio por las características expuestas en párrafos anteriores. La forma o diseño es realizado para salir de lo monótono como rectángulos o circunferencias, y de esta forma mejorar el aspecto del andador (ver figura 31).

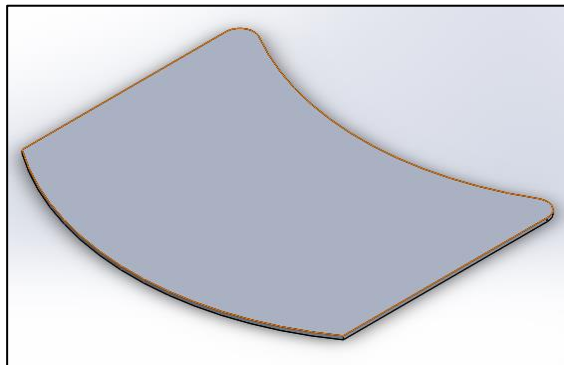


Figura 31. Base del miniordenador

De igual forma se presenta un análisis en software para determinar que el espesor y las dimensiones sean las adecuadas y no exista deformaciones excesivas, cuya carga aplicada es de 22 N al considerar el peso de la Raspberry pi, la Kinect, teclado y el banco de baterías.

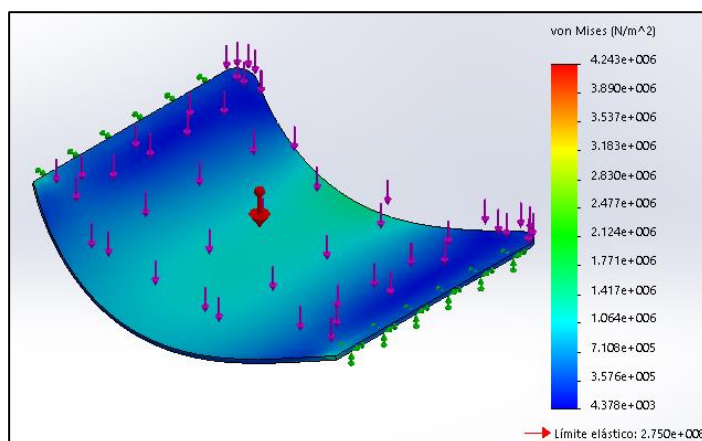


Figura 32. Análisis de la base del miniordenador

2.6. Módulo 2. Sistema eléctrico/electrónico

El módulo 2 hace referencia a la selección de las diferentes alternativas de diseño a los componentes eléctricos y/o electrónicos que formarán parte para el óptimo funcionamiento del andador.

2.6.1. Controladores

En la sección del módulo anterior correspondiente al sistema motriz se seleccionó un par de motores de corriente continua con una caja reductora de tipo “Gusano”, en cambio la sección de controladores hace énfasis en la selección de la tarjeta que realizará el control de dichos motores. En la siguiente tabla se muestran las diferentes alternativas:

Tabla 11.

Matriz de selección de conceptos (Controladores)

Criterios de selección	Puente H L298 circuito integrado	Driver Motores Dc Mosfet Irf3205	Driver Motores Dc BTS7960B
Corriente nominal 10 ^a	-	+	+
Funcionamiento a altas frecuencias	+	+	+

CONTINÚA 

Dimensiones	+	+	0
Precio	0	0	-
Protección por sobre voltaje y cortocircuito	0	+	+
Facilidad de adquisición	+	0	0
Facilidad de Control	0	+	-
Control dual de motores	+	+	-
Fácil implementación	0	+	0
Suma +	4	7	3
Suma 0	4	2	3
Suma -	1	0	3
Evaluación Neta	3	7	0
¿Continuar?	No	Si	No

Tabla 12.

Matriz de evaluación de conceptos (Controladores)

Criterios de selección	Peso	Puente H L298 circuito integrado		Driver Motores Dc Mosfet Irf3205		Driver Motores Dc BTS7960B	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Corriente nominal 10^a	25%	2	0,5	5	1,25	4	1
Funcionamiento a altas frecuencias	10%	3	0,3	3	0,3	3	0,3
Dimensiones	5%	3	0,15	3	0,15	3	0,15
Precio	10%	4	0,4	3	0,3	2	0,2
Protección por sobre voltaje y cortocircuito	15%	4	0,6	4	0,6	4	0,6
Facilidad de adquisición	5%	5	0,25	4	0,2	4	0,2
Facilidad de Control	5%	4	0,2	5	0,25	3	0,15
Control dual de motores	15%	4	0,6	4	0,6	1	0,15
Fácil implementación	10%	4	0,4	4	0,4	3	0,3
	Total		3,4		4,05		3,05
	Lugar		2		1		3
¿Continuar?			No		Si		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

En la tabla 12 se identifica la matriz de evaluación correspondiente a la selección de los controladores de motores, con la alternativa de solución del driver controlador de motores DC con Mosfet Irf3205, el cual obtuvo mayor ponderación por sus características principales de corriente nominal de 10

amperios con una corriente máxima de 30 amperios, que a su vez consta de una configuración dual que permite el control de los dos motores con una misma tarjeta controladora. Dicha tarjeta se puede identificar en la siguiente figura:



Figura 33. Driver Motor DC con Mosfet IRF3205

2.6.2. Energía

El sub-módulo de energía especifica la capacidad de suministro de energía para la alimentación de los componentes eléctricos y electrónicos; y con ello se plantea la utilización de dos fuentes de energía siendo la primera para el sistema de control y la otra para la alimentación de motores por el alto consumo de corriente de estos.

En vista de que es un andador para movilidad, el uso de energía eléctrica alterna por medio de cables queda descartado. Por consiguiente, se opta por alternativas como: a) baterías de polímero de litio, b) banco externo de baterías, c) panel solar y d) baterías de gel.

Tabla 13.

Matriz de selección de conceptos (Energía)

Criterios de selección	Baterías de polímero de litio	Banco externo de baterías	Panel solar	Baterías de gel
Tiempo de carga corto	0	0	+	-
Capacidad	+	+	-	0
Dimensiones	+	+	-	0
Precio	0	0	+	0
Facilidad de adquisición	+	0	+	+

CONTINÚA



Facilidad de montaje	+	+	0	0
Suma +	4	3	3	1
Suma 0	2	3	1	4
Suma -	0	0	2	1
Evaluación Neta	4	3	1	0
¿Continuar?	Sí	Revisar	No	No

La alternativa de solución con mayor ponderación en el sub-módulo de energía es la batería de polímero de litio (ver Tabla 14), con la cual se logra satisfacer el requerimiento de usuario del período de operatividad prolongado, con lo cual se procede al adecuado dimensionamiento de la misma y se parte del consumo de corriente de los motores, para este caso en particular, motores dc con caja reductora con un consumo de corriente nominal de 1,5 A. Dado que se utilizan dos motores la corriente resultante es de 3 A.

Tabla 14.

Matriz de evaluación de conceptos (Energía)

Criterios de selección	Peso	Baterías de polímero de litio		Banco externo de baterías		Panel solar		Baterías de gel	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Tiempo de carga corto	20%	3	0,6	3	0,6	5	1	3	0,6
Capacidad	25%	5	1,25	4	1	1	0,25	4	1
Dimensiones	10%	4	0,4	4	0,4	3	0,3	3	0,3
Precio	15%	4	0,6	4	0,6	5	0,75	3	0,45
Facilidad de adquisición	15%	5	0,75	3	0,45	3	0,45	4	0,6
Facilidad de montaje	15%	4	0,6	4	0,6	3	0,45	3	0,45
	Total		4,2		3,65		3,2		3,4
	Lugar		1		2		4		3
¿Continuar?			Si		No		No		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

La capacidad de una batería está definida por la intensidad de corriente capaz de suministrar en un tiempo determinado, dicha relación se encuentra en la siguiente ecuación:

$$c = I \times t = 3 \times 2 = 6\text{Ah} \quad (18)$$

Dónde: c es la capacidad de la batería, I es el consumo de corriente y t es el tiempo de operación. Por consiguiente, se establece un tiempo de operación para el dispositivo de unas 2 horas.

$$C_{\text{final}} = c \times 1,1 \times 1,2 = 7,9 \text{ Ah} \quad (19)$$

En la ecuación anterior se aprecian dos factores de corrección siendo el primero el factor de carga que se dimensiona a 1,2 veces para evitar las caídas de tensiones por descarga. El segundo factor refleja el factor de seguridad siendo el valor de 1,1 recomendado en el caso de baterías. (Veiga, Zymler, Shayani, Viana, & Orrico, 2012)

La tensión común en las baterías es de 12 V, dentro de este marco se establece como opción una batería con una tensión nominal de 11,8 voltios, con una capacidad de 7600 mAh, como se muestra en la figura 34.



Figura 34. Batería PRO LIPO

2.6.3. Accionamiento

El sub-módulo de accionamiento hace referencia a la utilización de sensores para la activación del andador al tomar en cuentas las necesidades del usuario de que no exista una activación accidental del andador, siendo el caso de la

ubicación de un sensor a la altura de la cintura y otro sensor en los apoyos de las manos. Dicho lo anterior se optan por los sensores que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 15.

Matriz de selección de conceptos (Accionamiento)

Criterios de selección	Sensor ultrasónico	Sensor infrarrojo	Final de carrera	Sensor de fuerza
Precio	+	0	0	+
Fácil control	0	+	+	+
Bajo nivel de ruido	0	0	0	+
Tamaño	+	-	0	0
Facilidad de adquisición	+	+	+	+
Facilidad de implementación	+	-	-	0
Suma +	4	2	2	4
Suma 0	2	2	3	2
Suma -	0	2	1	0
Evaluación Neta	4	0	1	4
¿Continuar?	Revisar	No	No	Revisar

Como es posible notar en la Tabla 15 se muestra una evaluación neta de igual ponderación para las opciones del sensor ultrasónico y sensor de fuerza por ende se prosigue a unir dichas alternativas de diseño (ver tabla 16).

Tabla 16.

Matriz de evaluación de conceptos (Accionamiento)

Criterios de selección	Peso	Sensor ultrasónico y Sensor de fuerza		Sensor infrarrojo		Final de carrera	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Precio	15%	5	0,75	3	0,45	3	0,45
Fácil control	20%	5	1	4	0,8	4	0,8
Bajo nivel de ruido	20%	5	1	4	0,8	4	0,8
Tamaño	15%	5	0,75	3	0,45	4	0,6

CONTINÚA 

Facilidad de adquisición	15%	5	0,75	3	0,45	3	0,45
Facilidad de implementación	15%	4	0,6	4	0,6	4	0,6
	Total		4,85		3,55		3,7
	Lugar		1		3		2
¿Continuar?			Si		No		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

Las alternativas con mejor ponderación en el sub-módulo de accionamiento son el sensor ultrasónico y sensores de fuerza, por ende, en el diseño se prosigue con la unión de los dos sistemas que tendrán diferente ubicación, siendo el sensor ultrasónico ubicado a una altura promedio de la cintura del ocupante y la ubicación de los sensores de fuerza en los manubrios del dispositivo y de esta manera satisfacer a una de las necesidades del usuario y diseñador.

2.6.4. Odometría

El término odometría hace énfasis a las mediciones necesarias para determinar la posición y orientación de un dispositivo con ruedas siendo el caso del andador, durante la navegación. Las alternativas propuestas para realizar odometría son encoders, la unión de encoders y giroscopio y último, pero no menos importante los sensores de desplazamiento óptico cuyas características principales se aprecian en la tabla siguiente:

Tabla 17.

Matriz de selección de conceptos (Odometría)

Criterios de selección	Encoder	Encoder y giroscopio	Sensor de desplazamiento óptico
Control sencillo	0	+	0
Dimensiones	+	+	0
Precio	+	0	+
Reducción del error acumulado	-	+	0
Facilidad de adquisición	+	+	0
Facilidad de implementación	+	0	+
Suma +	4	4	2
Suma 0	1	2	4

CONTINÚA 

Suma -	1	0	0
Evaluación Neta	3	4	2
¿Continuar?	No	Si	No

La selección del sub-módulo de odometría es la combinación de los encoders y las unidades de sensores inerciales (IMU) en donde la reducción de error acumulativo es significativa, en consecuencia, el encoder para los motores a paso se generará mediante el control de las señales de pulsos que se envían a los motores.

Tabla 18.

Matriz de evaluación de conceptos (Odometría)

Criterios de selección	Peso	Encoder		Encoder y giroscopio		Sensor de desplazamiento óptico	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Control sencillo	15%	4	0,6	5	0,75	4	0,6
Dimensiones	10%	4	0,4	4	0,4	3	0,3
Precio	20%	5	1	5	1	3	0,6
Reducción del error acumulado	25%	2	0,5	4	1	3	0,75
Facilidad de adquisición	15%	4	0,6	4	0,6	4	0,6
Facilidad de implementación	15%	3	0,45	4	0,6	4	0,6
	Total		3,55		4,35		3,45
	Lugar		2		1		3
¿Continuar?			No		Sí		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

2.6.5. Visión

El sub-módulo de visión cumple la función de la adquisición de los datos provenientes de la cámara a seleccionar, con lo cual se evitarán los obstáculos y a su vez ayuda en la creación del mapa de entorno. En la Tabla 19, se identifican las alternativas de solución al presente módulo.

Tabla 19.

Matriz de selección de conceptos (Visión)

Criterios de selección	Kinect	Asus Xtion	Intel	Logitech
	Xbox 360		RealSense	C920
Resolución de la cámara	0	0	+	+
Creación de mapas de profundidad	+	+	0	-
Tiempo de apertura del lente	0	+	+	+
Angulo de visión	+	+	+	0
Frames por segundo	+	+	+	+
Fácil adquisición	+	-	-	0
Fácil implementación	0	0	0	+
Precio	+	-	-	+
Suma +	5	4	4	5
Suma 0	3	2	2	2
Suma -	0	2	2	1
Evaluación Neta	5	2	2	4
¿Continuar?	Sí	No	No	Revisar

En la tabla 20 se determina que la alternativa con mejor ponderación es la utilización de un sensor Kinect Xbox 360 dado que por su característica de la generación de mapas de profundidad proveniente del sensor infrarrojo y cámaras RGB en calibración estéreo, cabe recalcar que con esto se reduce el tiempo de computo ya que al utilizar dos o más cámaras necesaria su calibración en conjunto.

Tabla 20.

Matriz de evaluación de conceptos (Visión)

Criterios de selección	Peso	Kinect		Asus Xtion		Intel		Logitech	
		Xbox 360				RealSense		C920	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Resolución de la cámara	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Creación de mapas de profundidad	20%	5	1	5	1	5	1	2	0,4

CONTINÚA



Tiempo de apertura del lente	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Angulo de visión	15%	4	0,6	4	0,6	4	0,6	3	0,4 5
Frames por segundo	15%	4	0,6	5	0,75	4	0,6	4	0,6
Fácil adquisición	10%	5	0,5	2	0,2	2	0,2	4	0,4
Fácil implementación	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4	5	0,5
Precio	10%	4	0,4	3	0,3	3	0,3	4	0,4
	Total		4,3		4,05		3,9		3,6 5
	Lugar		1		2		4		3
¿Continuar?			Si		No		No		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

Por otro lado, en la figura 35 se observa el sensor Kinect con sus partes principales.

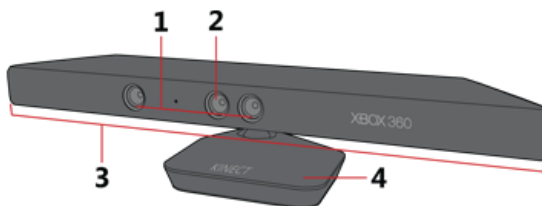


Figura 35. Componentes del sensor Kinect

Fuente: (XBOX, 2016)

Dado la ubicación del sensor Kinect se encuentra a una altura de 1 m con respecto al suelo, los posibles obstáculos cercanos al andador se encuentran en un punto muerto de la cámara, para lo cual se opta por la utilización de sensores ultrasónicos ubicados en el mismo plano de los componentes electrónicos. Los sensores ultrasónicos de más fácil adquisición son los de la serie HC-SR04, los mismos que poseen las características que se muestran en la tabla 21.

Tabla 21.**Características del sensor HC-SR04**

Característica	Magnitud (Unidad)
Voltaje de operación	3.3 V - 5 V
Corriente de operación	15 Ma
Rango	2cm – 4m
Ángulo de medición	15°

Fuente: (Micropik, 2016)

Con lo que se refiere a las conexiones del sensor Kinect el mismo posee una salida especial para la consola de juegos, y dado que nuestra aplicación debe ser conectada a un ordenador en general es necesaria la adquisición del adaptador de voltaje el mismo que se muestra en la figura 36.

**Figura 36. Adaptador de voltaje del sensor Kinect**

Fuente: (Carracedo, 2013)

El adaptador mostrado en la figura 36 debe ser conectado a una fuente de energía alterna de 110 voltios cosa que no se quiere en el proyecto ya que no deben existir cables que interrumpan el movimiento, por tal motivo se seleccionó un convertidor dc-dc cuya alimentación es por medio de la batería seleccionada anteriormente (ver figura 37).



Figura 37. Convertidor dc-dc XI6009

2.7. Módulo 3. Control

El presente módulo se divide en tres parámetros como son la recolección o adquisición de datos de los motores y sensores, el control de la odometría y procesamiento de imágenes necesario para el movimiento del andador y, por último, pero no menos importante el software base en el que se realizan las tareas anteriormente en mención.

2.7.1. Adquisición

En la adquisición de las señales correspondientes al acondicionamiento de los sensores y control de los motores se plantean alternativas tales como: a) tarjeta Arduino, b) Microcontrolador PIC

Tabla 22.

Matriz de selección de conceptos (Adquisición)

Criterios de selección	Arduino	Microcontrolador PIC
Acondicionamiento de señales de entrada / salida	+	-
Librerías adicionales	+	0
Precio	0	+
Memoria	+	+
Facilidad de adquisición	+	+
Facilidad de implementación	+	0
Suma +	5	3
Suma 0	1	1
Suma -	0	1
Evaluación Neta	5	2
¿Continuar?	Si	No

Tabla 23.**Matriz de evaluación de conceptos (Adquisición)**

Criterios de selección	Peso	Arduino		Microcontrolador PIC	
		Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Acondicionamiento de señales de entrada / salida	25%	5	1,25	4	1
Librerías adicionales	15%	5	0,75	3	0,45
Precio	15%	4	0,6	4	0,6
Memoria	15%	4	0,6	3	0,45
Facilidad de adquisición	15%	4	0,6	4	0,6
Facilidad de implementación	15%	5	0,75	3	0,45
	Total		4,55		3,55
	Lugar		1		2
¿Continuar?			Si		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

La opción con mayor ponderación es la selección de un sistema embebido Arduino (ver tabla 23), no obstante, es indispensable determinar el número de entradas y salidas tanto digitales como analógicas a utilizar, por ello en la Tabla 24, se muestran los sensores con sus respectivos pines y el número a utilizar en el presente proyecto.

Tabla 24.**Pines analógicos y digitales utilizados**

Sensor	Número	Pines	D/A
Ultrasónico SR04	4	8	D
Pulsador	2	4	D
Sensor de fuerza	2	2	A
Encoder	2	4	D

En la Tabla 25, se evidencia la comparación de las diferentes placas Arduino presentes en el mercado de la cual se selecciona la placa Arduino Mega 2560, dado que es necesaria la utilización de 16 pines digitales y 2 pines analógicos con sus respectivos pines de alimentación.

Tabla 25.**Comparación de características de las placas Arduino**

Modelo	Voltaje	E/S Digitales	E/S Análogas	Tipo USB
Uno	5-12V	14	6	USB B
Leonardo	5-12V	20	12	Micro USB
Mega 2560	5-12V	54	16	USB B
Micro	5- 9V	20	12	Micro USB
Nano	5- 9V	14	8	Micro USB

Fuente: (Gallardo & Gaona, 2015)

2.7.2. Control principal

El control del andador por analogía al cuerpo humano, este necesita un cerebro que dirija las acciones a controlar. Las tarjetas controladoras en la presente época toman impulso por características como su tamaño y potencia, que a su vez la utilización de un minicomputador para su adecuado desempeño se optan siguientes alternativas a utilizar: a) raspberry pi 3, b) beaglebone, y c) lattepanda

Tabla 26.**Matriz de selección de conceptos (Control Principal)**

Criterios de selección	Raspberry Pi 3	Beaglebone	Lattepanda
Velocidad de procesamiento	0	0	+
Dimensiones	+	+	+
Precio	+	-	-
Adaptabilidad de sistemas operativos	+	+	-
Facilidad de adquisición	+	0	0
Tamaño de memoria	0	0	+
Facilidad de implementación	+	0	0
Suma +	5	2	3
Suma 0	2	4	2
Suma -	0	1	2
Evaluación Neta	5	1	1
¿Continuar?	Si	No	No

En la Tabla 27 se identifica la ponderación de las diversas características de las tarjetas de control principales, acorde a dicha ponderación se opta por la utilización de una Raspberry Pi 3 por sus mejoras con respecto a versiones anteriores de la misma.

Tabla 27.

Matriz de evaluación de conceptos (Control Principal)

Criterios de selección	Peso	Raspberry Pi 3		Beaglebone		Lattepanda	
		Calif.	Ev. Po	Calif.	Ev. Po	Calif.	Ev. Po
Velocidad de procesamiento	15%	3	0,45	3	0,45	5	0,75
Dimensiones	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Precio	15%	5	0,75	4	0,6	3	0,45
Adaptabilidad de sistemas operativos	25%	5	1,25	4	1	2	0,5
Facilidad de adquisición	10%	4	0,4	4	0,4	3	0,3
Tamaño de memoria	15%	4	0,6	4	0,6	5	0,75
Facilidad de implementación	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4
	Total		4,25		3,85		3,55
	Lugar		1		2		3
¿Continuar?			Sí		No		No

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

En la figura 38 se identifica la tarjeta de control general del sistema siendo esta la Raspberry Pi 3, hay un inconveniente con dicha tarjeta, el cual es que para su utilización es necesario periféricos externos como un monitor, teclado, entre otros.



Figura 38. Raspberry Pi 3

Fuente: (Raspberry Pi, 2016)

Dicho lo anterior, se opta por la adquisición de un display diseñado para la raspberry, el mismo que posee un touchscreen que facilita la interacción con el usuario final (ver figura 39).



Figura 39. Raspberry Pi Touch Display

Fuente: (Raspberry Pi, 2016)

2.7.3. Software de programación

Según Martínez (2013) un sistema operativo se define como: “un grupo de programas de proceso con las rutinas de control necesarias para mantener continuamente operativos dichos programas.”

Antes de continuar es necesario determinar el sistema operativo que funcione en la tarjeta de control principal siendo en caso de los sistemas operativos principales las versiones de Windows y Linux (ver tabla 28).

Tabla 28.

Matriz de selección de conceptos (Software)

Criterios de selección	Windows	Linux/Ubuntu
Fiabilidad	-	+
Rendimiento	0	+
Seguridad	-	+
Drivers	+	0
Aplicaciones	+	0
Costo de licencia	-	+
Suma +	2	4

CONTINÚA 

Suma 0	1	2
Suma -	3	0
Evaluación neta	-1	4
¿Continuar?	No	Sí

En la Tabla 29 se identifican las ponderaciones de las opciones a sistemas operativo anfitrión dando como resultado la selección de Linux por su fiabilidad, rendimiento y el mínimo uso de recursos para su adecuado funcionamiento. De igual manera, un factor importante en la selección es la integración con Raspberry Pi el cual posee mayor documentación y estabilidad con Linux.

Tabla 29.

Matriz de evaluación de conceptos (Software)

Criterios de selección	Windows			Linux/Ubuntu	
	Peso	Calif.	Ev. Po.	Calif.	Ev. Po.
Fiabilidad	20%	3	0,6	5	1
Rendimiento	15%	3	0,45	5	0,75
Seguridad	20%	3	0,6	5	1
Drivers	20%	5	1	3	0,6
Aplicaciones	15%	4	0,6	3	0,45
Costo de licencia	10%	3	0,3	5	0,5
	Total		3,55		4,3
	Lugar		2		1
¿Continuar?			No		Si

Leyenda. Calif.: Calificación, Ev. Po.: Evaluación ponderada

El software usado para el desarrollo del presente proyecto es Raspbian Jessie ya que es una versión estable y disponible suficiente documentación acerca de las configuraciones necesarias para su adecuado funcionamiento.

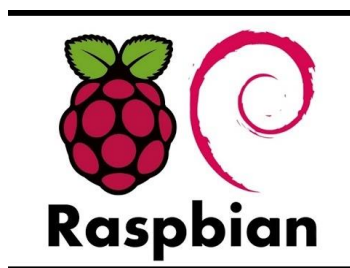


Figura 40. Sistema operativo Raspbian

2.8. Definición del diseño

En resumen, a las soluciones de la sección anterior en la figura 41 se muestra el diseño final del dispositivo, mientras que en la Tabla 30 se observa la selección a los diferentes módulos y sub-módulos de los sistemas que conforman el andador.



Figura 41. Diseño final del andador inteligente

Tabla 30.

Definición del diseño

Módulo	Definición	Sub-módulo	Selección
Módulo 1	Sistema mecánico	Motriz (Tracción)	Gear Turbo Motor 12V
		Tipo de desplazamiento	Desplazamiento diferencial
		Diseño estructural	Andador con 4 ruedas
		Tipo de material	Aluminio e impresiones en PLA
Módulo 2	Sistema eléctrico/electrónico	Controladores	Driver motor Dc con Mosfet IRF3205

CONTINÚA 

Módulo 3	Sistema de control	Energía	Batería LIPO PRO 7600 mAh
		Accionamiento	Sensor ultrasónico y sensor de fuerza
		Odometría	Encoder y MPU 6050
		Visión	Cámara Kinect Xbox 360
		Adquisición de datos	Arduino Mega 2560
		Software de programación	Raspbian
		Control Principal	Raspberry Pi 3

CAPÍTULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS

En este apartado se detalla el proceso de ensamble del andador, así como la elaboración los distintos elementos mecánicos además la implementación de componentes eléctricos y circuitos electrónicos que forman parte del sistema, para posteriormente continuar con el análisis de resultados de la puesta en marcha del andador.

3.1. Construcción e implementación del sistema mecánico

El proceso inicia con la selección de la estructura base de donde se parte para realizar las adaptaciones correspondientes y el proyecto funcione acorde a las necesidades del usuario. Con la estructura en pie se procede con la manufactura de los elementos diseñados en el capítulo anterior.

3.1.1. Manufactura de las bases de los motores

Una vez realizado el diseño CAD y análisis estático para comprobar en medida de lo posible los fallos de diseño se procede con la elaboración de las partes, por medio de impresión 3D cuyo material de adición es PLA. Dicho diseño se guarda como archivo de extensión stl dado que serán posteriormente impresos (ver figura 42).



Figura 42. Impresión 3D de las bases de los motores

3.1.2. Manufactura del eje de acople motor-rueda

El eje de acople fue elaborado en acero de transmisión 1018, y se lo realizó completamente en el laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad del Campus Latacunga. Uno de los procesos desarrollados en el eje de acople se puede observar en la figura 43.



Figura 43. Machuelado del eje de acople

3.1.3. Manufactura del bocín de la rueda posterior

El bocín de la rueda posterior se elaboró partiendo de un eje de aluminio de 1 ½ pulgadas de diámetro, el proceso de manufactura se realizó en el mismo laboratorio, en donde se realizaron actividades como: torneado, taladrado, machuelado y corte (ver figura 44).

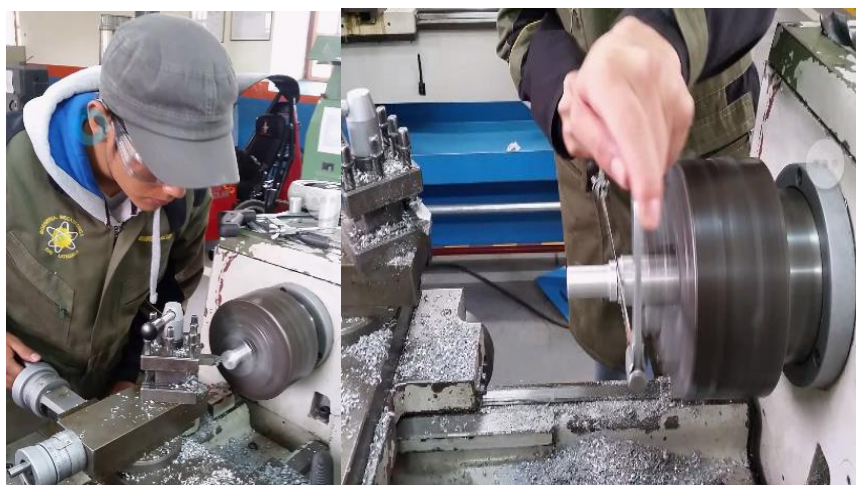


Figura 44. Elaboración del acople de la rueda posterior

3.1.4. Manufactura de la base para el sistema electrónico

Posterior al diseño, un poco fuera de las formas comunes (rectangulares o cuadradas) se procede al corte de la plancha de aluminio de 3 mm de espesor, con la ayuda de corte CNC por plasma.



Figura 45. Corte CNC de las bases.

3.1.5. Manufactura de la carcasa para los elementos electrónicos

Por la presencia de polvo y productos químicos de limpieza además debido a la exposición a la que se encontrará el dispositivo se opta por construir una carcasa que cubra en gran parte los elementos electrónicos y evite que estos sean manipulados por el usuario. La carcasa es construida en acrílico de 3 mm de espesor, y al ser expuesta a calor se obtiene la forma deseada.

3.1.6. Manufactura de la base para el ordenador y cámara

Al igual que la base para los elementos electrónicos esta base es construida de una plancha de aluminio de 3 mm de espesor por la ayuda de corte CNC por plasma.



Figura 46. Base de aluminio para el ordenador y la cámara.

3.2. Implementación del sistema eléctrico

La presente sección se trata acerca de las conexiones necesarias de los diferentes sensores y actuadores que forman parte del andador diagrama mostrado en el anexo 3.

El movimiento del andador se da mediante dos motores de corriente directa (CC) con sus respectivos codificadores. Los motores son accionados mediante el módulo controlador, el cual a su vez está interconectado a la placa de adquisición de datos siendo en este caso el módulo Arduino Mega 2560. Al mismo tiempo dicho módulo recibe los datos de los pulsadores, sensores de fuerza y ultrasónicos. Estos datos se envían a un miniordenador y el sensor de visión se conecta al mismo para su posterior procesamiento. El diagrama de bloques resultante del proceso es el que se muestra en la figura 48.

3.2.1. Conexiones de los motores

El uso de los motores implica la vinculación de estos con la tarjeta controladora y los codificadores, pero en el presente caso dichos motores no constan con codificadores propios por ende la construcción de estos se da por medio de la utilización de módulos encoder de tipo herradura con rueda codificadora, dando como resultado el diagrama de la figura 47.

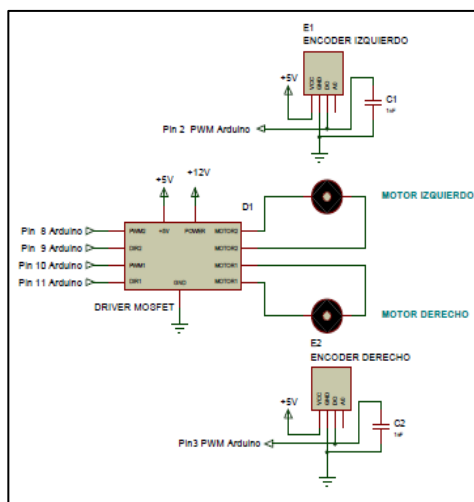


Figura 47. Conexiones de los motores y driver

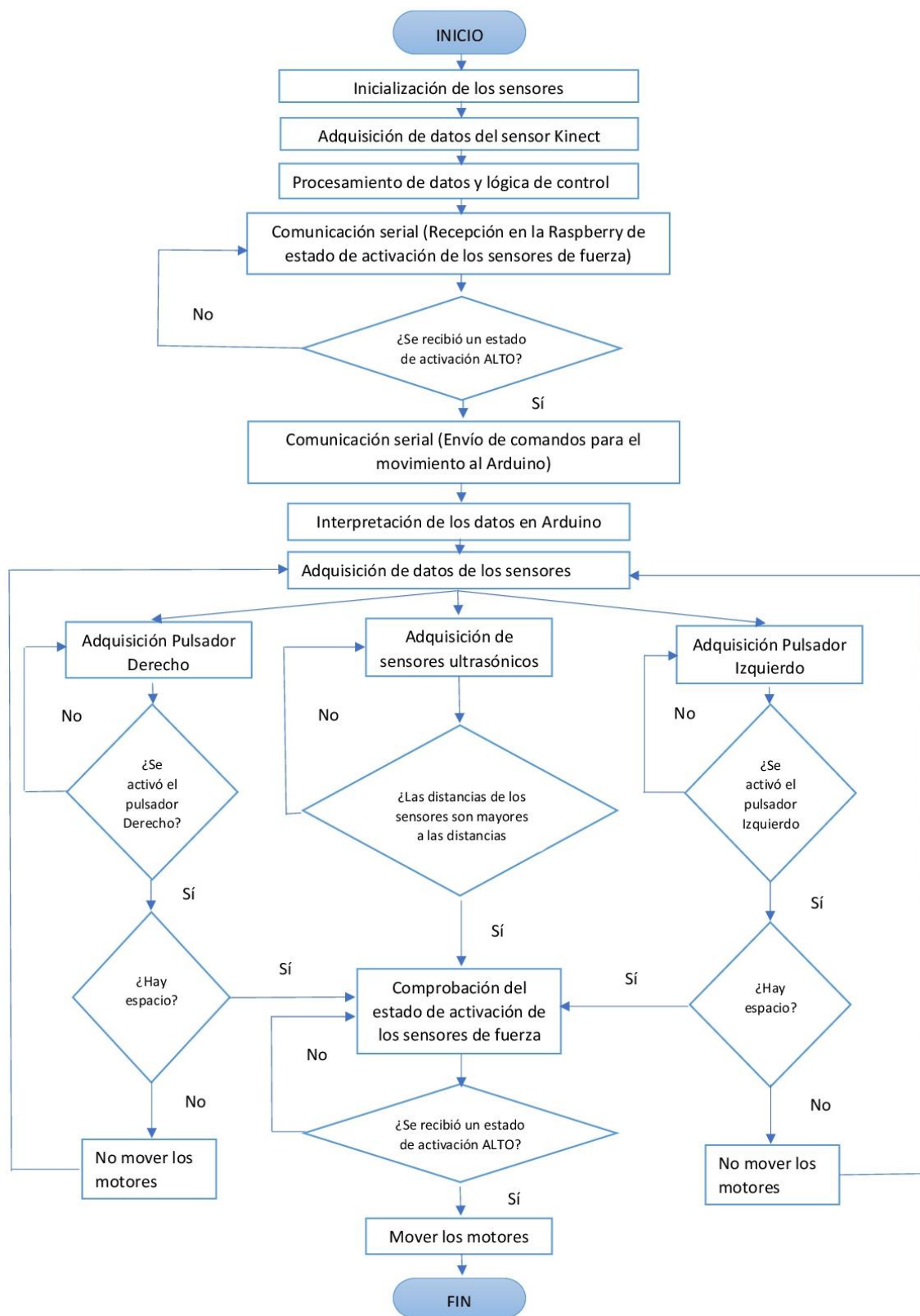


Figura 48. Diagrama de bloques del hardware del andador

Para la optimización de los recursos que presenta la tarjeta de adquisición de datos Arduino, en la misma se procede a utilizar sus pines de interrupción como son los pines digitales 2 y 3 para la lectura de los datos enviados del módulo encoder.

3.2.2. Conexiones de los sensores ultrasónicos

La utilización de la cámara proporciona una gran ayuda en el procesamiento de datos, no obstante, con la ubicación de esta sobre el andador su ángulo de mapeo es reducido para la detección de objetos que se encuentren muy cerca del mismo, para brindar una solución a este inconveniente se incorporan sensores ultrasónicos que son distribuidos en 3 sentidos en la parte delantera y un cuarto sensor que detecta la presencia de la persona en la parte posterior para el accionamiento de este. Las conexiones de los sensores se muestran en la figura 49.

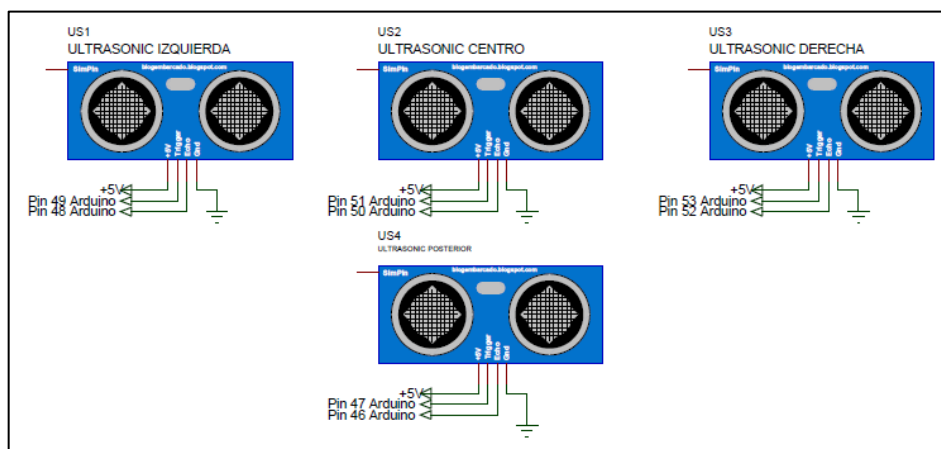


Figura 49. Conexiones de los sensores ultrasónicos

3.2.3. Conexiones de los sensores de fuerza

Los sensores FSR402 son resistencias variables con la fuerza cuya resistencia es inversamente proporcional a la fuerza aplicada, con ello es necesario identificar el umbral de trabajo para que se considere un estado de activación. El sensor se identifica en la figura 50 que posee un polímero delgado con un valor de histéresis de un 10 % en promedio.



Figura 50. Sensores de fuerza FSR402

Los sensores de fuerza necesitan ser acondicionados para su adecuado funcionamiento ya que estos son los encargados del accionamiento del dispositivo, las conexiones realizadas del mismo se presentan en la figura 51.

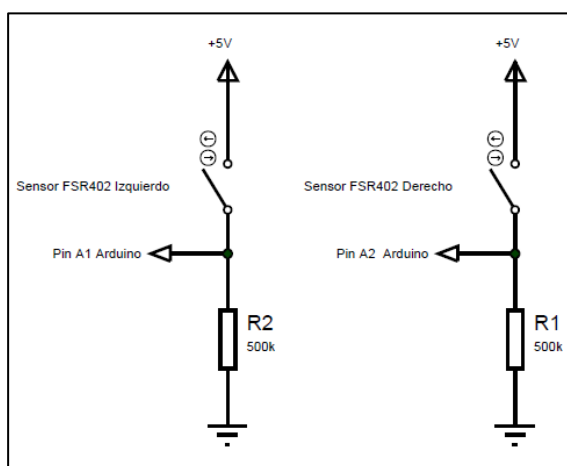


Figura 51. Conexiones de los sensores FSR402

3.2.4. Conexiones de los pulsadores de sentido de giro

Al hablar de pulsadores de sentido de giro se refiere a los pulsadores incorporados en las manijas del dispositivo andador que dada las condiciones de programación permiten realizar la rotación al sentido del sensor que se acciona. La inclusión de dichos pulsadores permite darle un pequeño porcentaje de control a las acciones a tomar al usuario, pero con la condición siempre presente de la evasión de obstáculos. Las conexiones se presentan en la figura 52.

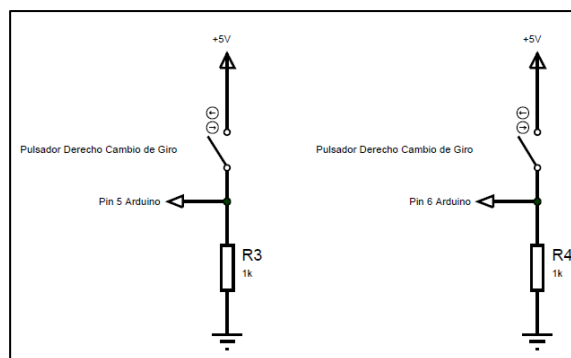


Figura 52. Conexiones de los pulsadores de sentido de giro

3.3. Comprobación de sensores

Una vez comprobadas las conexiones mostradas en las figuras 48,49,50,51 y 52, se realiza un programa en el IDE de Arduino en el cual se describe las partes importantes del mismo, además es necesaria la creación de nuevos encabezados para la comunicación serial entre dispositivos (ver figura 53).

```

//***** Interrupción para la MPU *****
// Indica si el pin de interrupción de la MPU ha pasado a alto
volatile bool mpuInterrupt = false;
void dmpDataReady()
{ mpuInterrupt = true; }

//***** Definición de los pines encoders *****
// Encoder izquierdo
#define Left_Encoder 2
volatile long Left_Encoder_Ticks = 0;
volatile bool LeftEncoderBSet;

// Encoder derrecho
#define Right_Encoder 3
volatile long Right_Encoder_Ticks = 0;
volatile bool RightEncoderBSet;

//***** Definición de los pines motores *****
// Pines Motor Izquierdo
#define Dir_izq 9
#define pwm_izq 8

// Pines Motor Derecho
#define Dir_der 11
#define pwm_der 10

```

Figura 53. Definición de pines en el Arduino

Una vez definidas las librerías utilizadas, se empieza con la definición de los pines a utilizar para cada uno de los componentes, así como la configuración de estos mediante la definición de pines de entrada o salida y la declaración de las variables auxiliares para la programación (ver figura 53).

3.4. Implementación del sistema de control

En el capítulo anterior se muestra la selección de la tarjeta controladora Raspberry pi 3, con un sistema operativo anfitrión Raspbian en su versión Jessie,

lo que implica la instalación de las dependencias necesarias para su adecuado funcionamiento.

3.4.1. Dependencias necesarias para el desarrollo del algoritmo

a) Instalación de la librería pyserial

La librería pyserial es la encargada de la comunicación entre el arduino y la raspberry pi, la cual viene por defecto al inicializar Raspbian y para su comprobación se puede observar los comandos en la figura 54.

```
pi@raspberrypi:~ $ sudo apt-get install python-serial
Reading package lists... Done
Building dependency tree
Reading state information... Done
python-serial is already the newest version.
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 0 not upgraded.
pi@raspberrypi:~ $ █
```

Figura 54. Librería python-serial

b) Instalación de la librería de OpenCV

OpenCV como su nombre lo indica Open Source Computer Vision Library es una librería abierta bajo la licencia BSD, la cual es una licencia libre y permisiva que libera el uso tanto académico como comercial, para el tratamiento de imágenes, con enfoque a aplicaciones en tiempo real, además posee compatibilidad con varios sistemas operativos. (OpenCV, 2016)

Para la instalación de la librería de OpenCV en la Raspberry Py se sigue el tutorial desarrollado por (Rosebrock, 2015), como primer paso que es necesario realizar es la actualización de cualquier paquete existente, de igual manera, la actualización del firmware de la Raspberry Pi y el reinicio de este mediante los siguientes comandos:

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get upgrade
$ sudo rpi-update
$ sudo reboot
```

Se instalan las dependencias necesarias siendo identificadas las dependencias

para cargar los diferentes formatos de imagen, los paquetes de entrada/salida de imagen y video, la biblioteca de desarrollo GTK para compilar submódulos de OpenCV, archivos de encabezado para la vinculación entre Python y OpenCV con los comandos mostrados a continuación:

```
$ sudo apt-get install build-essential git cmake pkg-config
$ sudo apt-get install libjpeg-dev libtiff5-dev libjasper-dev libpng12-dev
$ sudo apt-get install libavcodec-dev libavformat-dev libswscale-dev
libv4l-dev
$ sudo apt-get install libxvidcore-dev libx264-dev
$ sudo apt-get install libgtk2.0-dev
```

El siguiente paso es la obtención de los paquetes de OpenCV para su compilación.

```
$ cd ~
$ mkdir opencv
$ cd opencv
$ wget -O opencv.zip https://github.com/Itseez/opencv/archive/3.0.0.zip
$ unzip opencv.zip
$ wget -O opencv_contrib.zip
https://github.com/Itseez/opencv_contrib/archive/3.0.0.zip
$ unzip opencv_contrib.zip
$ cd ~/opencv-3.0.0/
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake -D CMAKE_BUILD_TYPE=RELEASE \
-D CMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local \
-D INSTALL_C_EXAMPLES=ON \
-D INSTALL_PYTHON_EXAMPLES=ON \
-D OPENCV_EXTRA_MODULES_PATH=~/opencv_contrib3.0.0/modules \
-D BUILD_EXAMPLES=ON ..
```

```
$ make
$ sudo make install
$ sudo ldconfig
```

Como último paso, para empezar a programar en python la aplicación que se desea se comprueba si la librería se instaló satisfactoriamente mediante la utilización de los comandos mostrados en la figura 55

```
pi@raspberrypi:~/Opencv/opencv-3.0.0/build $ python
Python 2.7.9 (default, Sep 17 2016, 20:26:04)
[GCC 4.9.2] on linux2
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import cv2
>>> cv2.__version__
'3.0.0'
>>> █
```

Figura 55. Verificación librería OpenCV

c) Instalación de la librería Libfreenect

El sensor Kinect es un hardware de Microsoft lo que conlleva a que la mayoría de las librerías se implementen en base al sistema operativo de Windows, no obstante, varios grupos de investigación como OpenKinect desarrollaron una serie de librerías para diversos sistemas operativos y acorde a dichas investigaciones se procede con la utilización de los paquetes para Linux con sus distribuciones de Ubuntu y Raspbian.

Para empezar con la instalación, se debe actualizar el sistema con los comandos:

```
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get upgrade
```

Una vez realizado el paso anterior se procede con la instalación de Libfreenect, mediante la instalación de las dependencias necesarias de acuerdo con los siguientes comandos:

```
$ sudo apt-get install git-core cmake freeglut3-dev pkg-config build-essential
libxmu-dev libxi-dev libusb-1.0-0-dev
```

A continuación, se ubica por terminal en el directorio en donde se desea clonar la carpeta que contiene los instaladores de la librería, que a su vez se compila, construyen los paquetes e instala en el sistema mediante los comandos siguientes:

```
$ git clone git://github.com/OpenKinect/libfreenect.git
$ cd libfreenect
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake .
$ make
$ sudo make install
```

Se crea el vínculo a la librería en esa ubicación

```
$ sudo ldconfig /usr/local/lib64/
```

La última línea es para añadir al usuario con cual se va a trabajar y éste pueda acceder a las funciones del Kinect, específicamente es usado para omitir el comando sudo cada vez que se ejecuta algún programa con la librería libfreenect.

```
$ sudo adduser $USER video
```

3.4.2. Comunicación Serial

La etapa de comunicación serial implica un tipo de comunicación dúplex o emisor/receptor entre el sistema embebido Raspberry Pi y la tarjeta controladora Arduino. El estado de la Raspberry Pi como emisor consta del envío de dos tramas principales correspondientes al dato de confirmación de inicio del sistema y la trama de control de los motores la cual será decodificada en el arduino.

El primer dato de confirmación corresponde al dar un inicio a la ejecución del sistema en conjunto para ser recibido por el arduino el mismo que comprueba el estado de los sensores de accionamiento como son los sensores de fuerza y el sensor ultrasónico.

Si el estado de los sensores está en alto el mismo envía un dato de confirmación caso contrario la raspberry se encuentra en un estado de espera.

a) Comunicación serial Raspberry Pi

Dentro de los archivos de programación de la Raspberry Pi se encuentra un script de python denominado COMSERIAL, el mismo que consta con la definición de módulos o funciones encargados de los parámetros de la comunicación serial detallados a continuación:

iniciarserial(): Función encargada de especificar los parámetros de la comunicación, siendo la selección del puerto a utilizar, la velocidad de transmisión , la activación y desactivación del DTR del puerto serial (ver figura 56).

```
import serial          #Importa la libreria serial
import time
ser = serial.Serial()

def iniciarserial():
    ser.baudrate = 115200 #Especifica la velocidad de transferencia
    ser.port = '/dev/ttyACM0' #Abre el puerto serial para Arduino, siempre termin
    ser.open()
    ser.setDTR(False) # Desactiva DTR, para iniciar el puerto serial
    time.sleep(0.022) #Espera un tiempo
    ser.setDTR(True) #Activa DTR para reiniciar el puerto serial
```

Figura 56. Función iniciarserial()

enviardatos(): Es la función encargada de codificar el dato a enviar hacia el arduino, siendo su codificación por medio de caracteres identificadores de inicio y final de trama (ver figura 57).

```
def enviardatos(dato,a,b):
    print("Funcion enviar datos")
    while ser.in_waiting == 0:
        pass
    c = ser.read()
    print(c)
    datostr = "i" + str(dato) + "f" + "\0"
    print(datostr)
    ser.write(datostr)
    while ser.in_waiting == 0:
        pass
    c = ser.read()
    print(c)
    print("Finalizo")
```

Figura 57. Función enviardatos()

recibirdatos(): La función se encarga de decodificar el dato del arduino que se recibe con los caracteres de identificación de inicio y final de la trama (ver figura 58).

```
def recibirdatos(a,b):
    dato = 0
    print("Funcion Recibir datos")
    ser.write(a)
    print("Enviado confirmacion")
    datosbuffer = ser.in_waiting
    while datosbuffer < 1:
        ser.write(a)
        datosbuffer = ser.in_waiting

    print("Datos en el buffer, recibiendo...")
    leer = 0
    for z in range(0, datosbuffer):
        w = ser.read(1)

        if w == 'f':
            break
        if leer == 1:
            dato = dato*10
            dato = dato + int(w)
        if w == 'i':
            leer = 1

    print("Dato recibido: ")
    print(dato)
    return dato
```

Figura 58. Función recibirdatos()

terminarserial(): Es la función que cumple la tarea de cerrar el puerto una vez finalizado el sistema (ver figura 59).

```
def terminarserial():
    ser.close()
```

Figura 59. Función terminarserial()

Las funciones declaradas en la comunicación serial son definidas para un lado del terminal de comunicación (python), para el otro lado es necesario definir otras, que cumplan las mismas funciones (arduino).

3.4.3. Etapas del algoritmo de detección de objetos

El algoritmo requerido debe ser capaz de identificar los obstáculos presentes a cierta distancia y emitir señales de control hacia los motores, para lo cual se realiza una comparación entre las etapas del procesamiento digital de imágenes y los pasos del algoritmo implementado (ver figura 60).

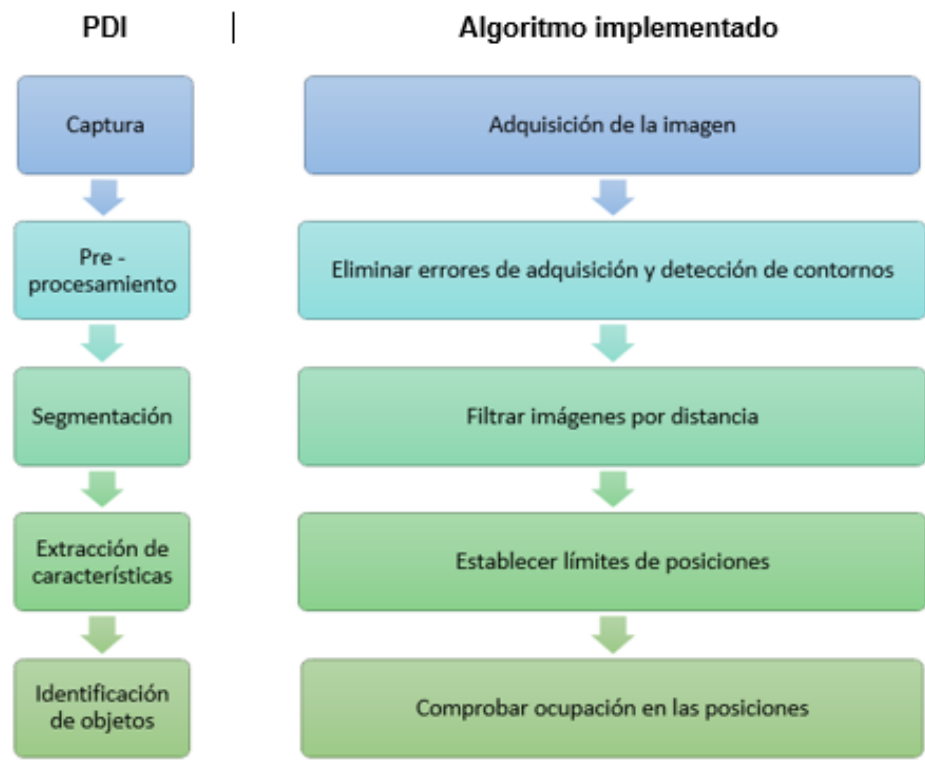


Figura 60. Comparación entre PDI y el algoritmo implementado

a) Captura

La adquisición de datos de la cámara RGB del sensor Kinect se complementa con las imágenes de profundidad del plano que proporciona el sensor infrarrojo del mismo, las cuales pasan a ser procesadas por la tarjeta Raspberry Pi 3. La inclusión de la librería libfreenect posee un demo para obtener las imágenes, las mismas se pueden apreciar en la figura 61.

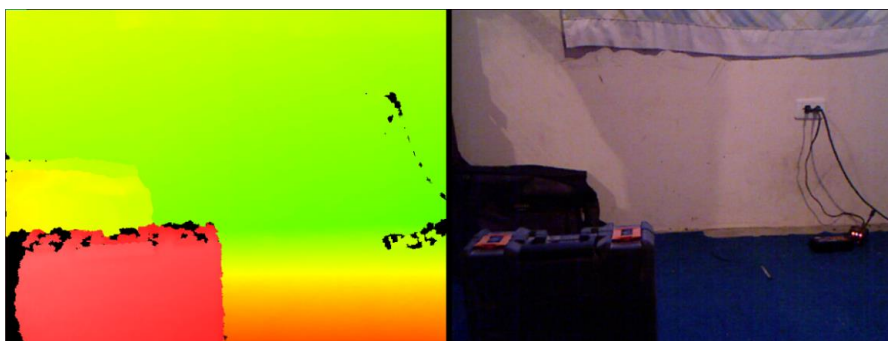


Figura 61. Demo de la librería libfreenect

El primer paso es crear las funciones para la adquisición de los datos provenientes del sensor Kinect definidas como *frame_video()* y *frame_depth()* que obtienen los datos de la cámara RGB y la información del sensor de profundidad respectivamente (ver figura 62).

```
def frame_video(video):
    video = cv2.cvtColor(video,cv2.COLOR_BGR2RGB)
    return video

def frame_depth(depth):
    np.clip(depth, 0, 2**10 - 1, depth)
    depth >= 2
    depth = depth.astype(np.uint8)
    return depth
```

Figura 62. Funciones de adquisición de imagen

El formato de imagen por defecto que devuelve la función *frame_depth()* es un mapa de profundidad de 11 bits, siendo este inadecuado para ser visualizado con *cv2.imshow*, por ende, se opta por realizar una conversión del tamaño de la imagen a un formato de 8 bits. (Beyeler, 2015) (ver figura 63).

```
frame = frame_video(freenect.sync_get_video()[0])
dst = frame_depth(freenect.sync_get_depth()[0])
```

Figura 63. Llamado a las funciones de adquisición

Los datos adquiridos son en tiempo real, cuando el algoritmo llama a las funciones de adquisición, dichos valores se guardan en una variable para ser procesadas en las siguientes etapas o visualizarlas como se muestran en la figura 64.



Figura 64. Imágenes de salida de las funciones de adquisición

b) Preprocesamiento

Como se puede apreciar en la figura 64 existen áreas pequeñas de color blanco que corresponden al ruido que posee la etapa anterior, por tal motivo dentro del preprocesamiento es necesaria la aplicación de técnicas de visión artificial para obtener una imagen clara y evitar la detección errónea de los objetos.

En primer lugar, se define el tamaño del kernel, con el cual se van a realizar las acciones de filtrado de la imagen para posteriormente utilizar las transformaciones morfológicas presentes en la librería de OpenCV entre las cuales están el `erode()` y el `dilate()` cuyas acciones implican: la eliminación de espacios en negro dentro de la región de interés y la eliminación de regiones blancas en zonas que deberían ser negras respectivamente. Para determinar el número de iteraciones óptimo que reduzca la mayor cantidad de ruido dentro de la imagen se procede con la creación de barras (ver figura 65).

```
kernel = np.ones((7, 7), np.uint8)
dst = (dst/binn)*binn
dst = cv2.erode(dst, kernel, iterations=e)
dst = cv2.dilate(dst, kernel, iterations=d)
edges = cv2.Canny(dst, v1, v2)
im2, contours, hierarchy = cv2.findContours(edges,
                                             cv2.RETR_TREE,
                                             cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

Figura 65. Operaciones principales de Filtrado

La identificación de los objetos dentro de la imagen es importante, pero en primera instancia no es muy notoria para lo cual se opta por la utilización de operaciones como `canny` para detectar los bordes, en una imagen binaria los cambios de nivel son drásticos siendo de 0 a 255 de forma instantánea caso que no sucede con la imagen de profundidad con la que se trabaja en donde se puede apreciar la detección de bordes con distintas tonalidades que más adelante se segmentarán por distancias.

En esta etapa aparece la definición de falsos positivos y falsos negativos que son influenciados por el adecuado preprocesamiento o filtrado en este caso de dichas imágenes. Los falsos positivos se refieren a objetos que son detectados

en la imagen pero que no se encuentran en el entorno, y los falsos negativos que se refieren a objetos que se encuentran inmersos en el mundo real pero que no son identificados dentro del procesamiento de la imagen.

c) Segmentación

El ángulo de visión del sensor Kinect es de 57 grados como característica propia del mismo, no obstante, dicho ángulo presenta un error práctico el cual se calcula mediante la detección de los objetos a analizar (ver figura 66).

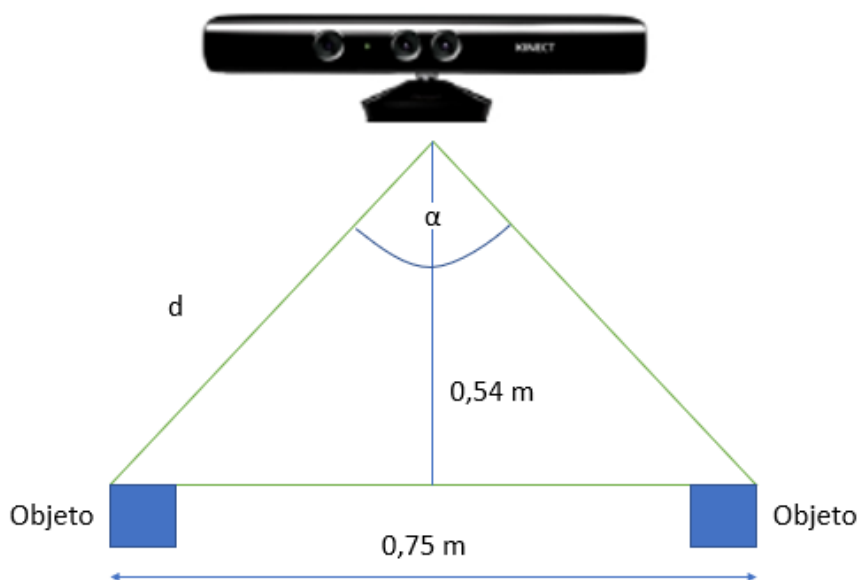


Figura 66. Cálculo del ángulo de visión de la Kinect

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{0,75}{2(0,54)}$$

$$\alpha = 2 * \text{atan}(0,69)$$

$$\alpha = 69,55^\circ$$

Como resultado se obtuvo un ángulo de visión aproximado de 70°, y se elaboró una prueba con la información del mapa de profundidad para determinar una representación de las distancias con las que se realiza la segmentación, para esto se colocó el sensor Kinect frente a una pared y se tomó muestras desde 0 m hasta los 3,5 m. (ver tabla 31).

Tabla 31.**Correspondencia de distancia en el mapa de profundidad**

Analogía	Distancia (cm)	Valor en el mapa de profundidad
0	Menor que 50	80
1	De 50 a 62	100
2	De 62 a 74	120
3	De 74 a 86	140
4	De 86 a 98	160
5	De 98 a 110	180
6	De 110 a 122	200
7	Mayor a 122	220

Mediante la creación de una función denominada *filtrar_cerca()* que utiliza los parámetros de la imagen pre- procesada con sus respectivas número de filas y columnas y una variable denominada *spac*, se procede a la segmentación por distancias utilizando los valores de la tabla anterior, en donde se muestran en la pantalla impresos los valores de analogía acorde a los valores de profundidad para una mejor representación (ver figura 67).

```
dst,direc = filtrar_cerca(dst, rows , cols, spac)
```

Figura 67. Función de segmentación**d) Extracción de características**

Dentro de la función de la figura 67 se crea otro módulo que realiza la comprobación de estado, es decir, verificar si se encuentra un objeto a determinada distancia dentro de posiciones o divisiones realizadas, para lo cual en el presente proyecto se realiza 5 divisiones a la imagen procesada.

Se desea subrayar que como indicadores de estado de ocupación se utiliza las combinaciones de 0 o 1, en donde dentro de la programación el estado de 0 significa que se encuentra un objeto dentro de los rangos de dicha división o caso contrario devuelve un estado de 1.

Dentro del proyecto las alternativas de división de posiciones empiezan de un simple entorno de 3 divisiones que posteriormente es ampliado a 5, lo cual conlleva a la aplicación de un mayor número de decisiones para la lógica de control (ver figura 68).

```
def RegionCheck(foo, ListPath):#foo defines x-coordinate of point
    if (foo <= 130) and (ListPath[0] is not 0):
        ListPath[0] = 0
    if (foo > 130) and (foo <= 260) and (ListPath[1] is not 0):
        ListPath[1] = 0
    if (foo > 260) and (foo <= 385) and (ListPath[2] is not 0):
        ListPath[2] = 0
    if (foo > 385) and (foo <= 510) and (ListPath[3] is not 0):
        ListPath[3] = 0
    if (foo > 510) and (ListPath[4] is not 0):
        ListPath[4] = 0
    return ListPath
```

Figura 68. Función de comprobación de ocupación

e) Identificación de objetos

El siguiente proceso del algoritmo es la creación de la lógica de control mediante la utilización de variables como son el arreglo con los estados de detección que devuelve la función RegionCheck() mostrado en la figura 68, y el valor de la correspondencia en el mapa de profundidad creando de esta forma una tabla de verdad con 25 posibles casos,

```
def comprobar(ListPath,t):
    Move,sent = 15, 1
    if(ListPath[0:5]==[1,1,1,1,1]):
        if (t == 85):
            Move,sent = 13, 1
        elif (t == 100):
            Move,sent = 12, 1
        elif (t == 120):
            Move,sent = 11, 1
```

Figura 69. Función de lógica de control de motores

La función *comprobar()* de la figura 68 devuelve 2 parámetros: *Move* y *sent*, de los cuales el primero se envía al arduino para controlar los motores, y el segundo parámetro se utiliza para la visualizar en la imagen de salida la dirección al evadir los posibles objetos (ver figura 70).

```

if(sentido == 1):
    cv2.putText(dst, "Ade", (30,100), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
    cv2.putText(dst, "", (30,140), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
    cv2.putText(dst, "", (30,180), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
    cv2.putText(dst, "", (30,220), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
elif(sentido == 2):
    cv2.putText(dst, "", (30,100), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
    cv2.putText(dst, "Der", (30,140), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
    cv2.putText(dst, "", (30,180), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)
    cv2.putText(dst, "", (30,220), cv2.FONT_HERSHEY_TRIPLEX, 1, (2), 1)

```

Figura 70. Visualización de direcciones.

De igual manera en el formato de imagen de salida final se visualizará unas líneas las cuales representan el rango de cada división que se desarrolló en la figura 67, y dichas líneas son realizadas mediante el algoritmo que se identifica en la figura 71.

```

cv2.line(dst, (130,0), (130,480), (0), 1)
cv2.line(dst, (260,0), (260,480), (0), 1)
cv2.line(dst, (380,0), (380,480), (0), 1)
cv2.line(dst, (510,0), (510,480), (0), 1)
cv2.imshow('Video', dst)

```

Figura 71. Visualización de divisiones.

La figura 72 representa el formato de salida de la imagen resultante con los parámetros descritos anteriormente siendo visualizado el número 2 con una mayor intensidad que el fondo de la escena que no es procesado dentro del código, además de las leyendas que se encuentran en la parte superior izquierda.

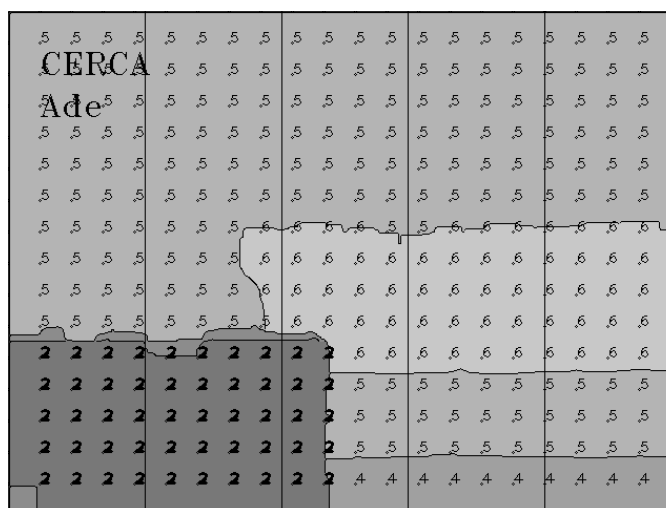


Figura 72. Formato de salida procesamiento

3.4.4. Algoritmo de detección de gradas

Para la determinación de pasos a desnivel o gradas se toma en consideración varios aspectos como, que el ángulo de inclinación del motor del sensor Kinect se encuentre regulado a 20 grados, y la distancia útil de adquisición desde el sensor hasta el plano del suelo sea en promedio de 80 cm.

Dado que el plano de adquisición del sensor Kinect posee un ángulo se utiliza su proyección hacia el plano del piso y como este se encuentra teóricamente fijo ya que no posee inclinaciones representativas se considera que si la distancia adquirida en el mapa de profundidad se incrementa entonces el dispositivo se encuentra con una grada, todas estas consideraciones se aplican a una región de interés (ROI) creada al tomar los píxeles inferiores de la imagen. (ver figura 73)

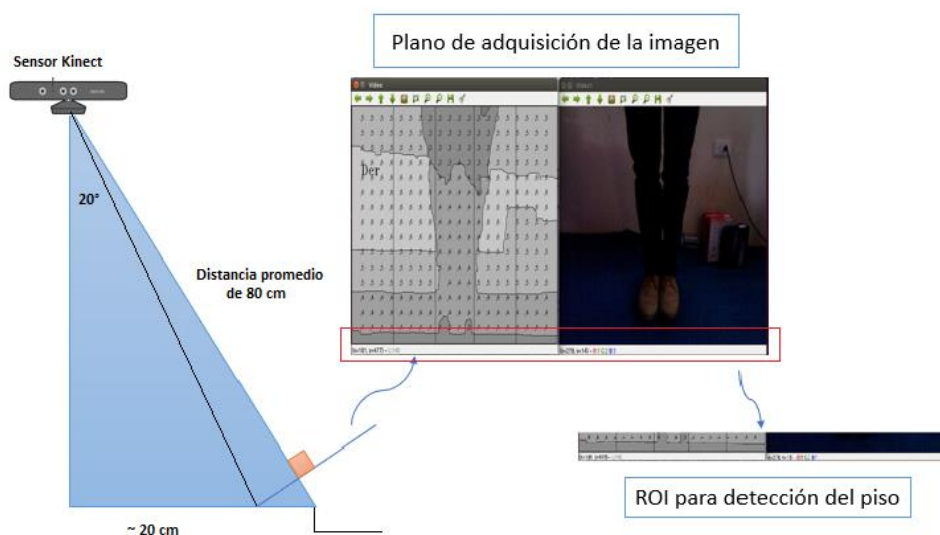


Figura 73. Detección de gradas.

CAPÍTULO IV

4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para las pruebas realizadas se tomó varios aspectos a considerar como la adecuada activación de los sensores, la segmentación de la imagen, así como el algoritmo de detección de objetos para su posterior evasión. En donde las pruebas para los diversos parámetros se encuentran a continuación.

4.1. Pruebas de adquisición

Las pruebas de adquisición de la imagen consisten en obtener los datos RGB y de profundidad de la imagen de forma individual y para agregarlas en una sola posteriormente, y de esta forma determinar el número de Frames por segundo adecuados para el procesamiento, de igual manera la corrección del efecto espejo en la adquisición.

En la figura 74 se aprecian las imágenes adquiridas mediante la variación del ángulo del sensor Kinect.



Figura 74. Pruebas de ángulo del sensor Kinect

Se puede diferenciar que las imágenes son adquiridas correctamente y dado que el ángulo con el que se puede obtener mayor ventaja es un ángulo de 20 grados con dirección al piso, con lo cual se evita la detección del suelo con respecto a las distancias a trabajar y de igual manera la detección de objetos de menor altura con respecto a un sensor Kinect ubicado con un ángulo paralelo a su superficie de apoyo.

4.2. Pruebas de filtrado

En el proceso de filtrado se evidencia la utilización de las técnicas de la librería de OpenCV, así como la diferencias al utilizar diversos tamaños de kernel. En donde, las acciones realizadas mediante el paquete de visión artificial se inician con la determinación del valor de la erosión en la imagen, como se puede observar en la figura 75, los cambios en el número de las iteraciones de la erosión reducen el ruido blanco presente en la imagen.

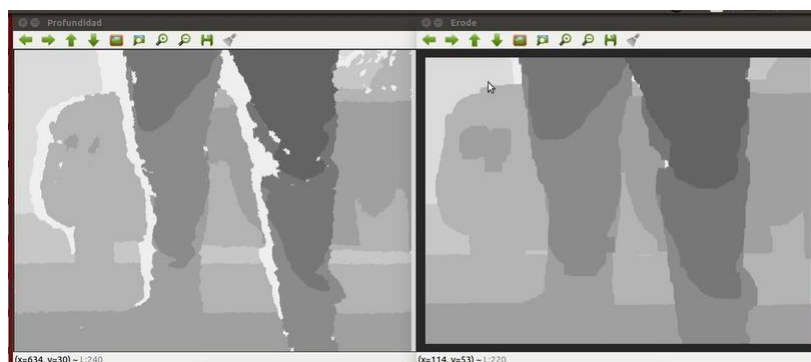


Figura 75. Iteraciones de erosión

Otra opción complementaria a la anterior para reducir el ruido es la dilatación de la imagen que de igual manera se procede a determinar el número de iteración óptimo para obtener mejores resultados.

Con respecto a las divisiones de la pantalla un objeto puede detectarse de diversas formas acorde a la posición en la que se encuentra siendo las siguientes: izquierda (posición 0), centro-izquierda (posición 1), centro (posición 2), centro-derecha (posición 3), derecha (posición 4), no obstante, mediante las

combinaciones y el tamaño del objeto el mismo puede compartir posiciones y de esta forma generar mayores posibilidades de ocupación.

En la figura 76 se diferencia la importancia de la selección de un valor de kernel adecuado ya que se puede observar la presencia de blobs u objetos de menor áreas los cuales en su mayoría son ruidos que se presentan en la adquisición de datos, o de igual manera falsos positivos presentes en la escena que por las limitaciones de rango del sensor Kinect son mostrados.

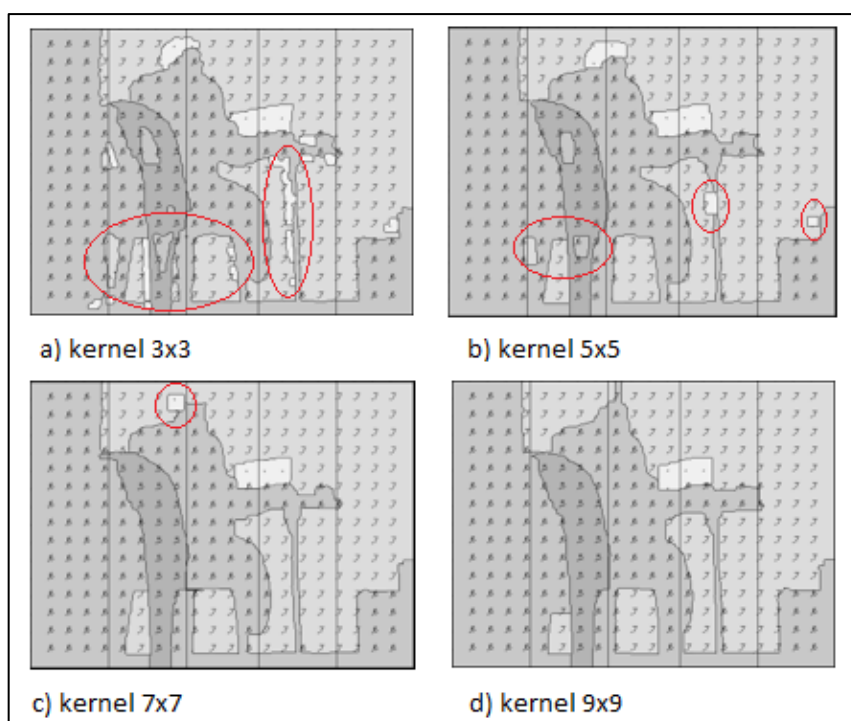


Figura 76. Comparación de los diversos tamaños de kernel

4.3. Prueba de detección de objetos

Cabe recalcar que este proyecto tiene como objetivo la evasión de obstáculos en un entorno controlado que generalmente posee objetos estáticos cotidianos como sillas, mesas, entre otros y acciones dinámicas como el cruce de personas, y de igual manera los adultos mayores que lo utilizarán tienen un tiempo establecido para realizar sus actividades, en consecuencia, las pruebas se realizaron durante el día y horas de la tarde.

Para la experimentación en la prueba de detección de objetos se plantean varios escenarios de acuerdo con las distancias que son validadas con la adquisición de la imagen de profundidad en consecuencia se obtienen los datos de la tabla 32.

Tabla 32.

Prueba de detección por distancias

N° Pruebas	Rango de detección de profundidad (analogía)			
	0 (Menor a 50 cm)	1 (De 50 a 62 cm)	2 (De 62 a 74 cm)	3 (De 74 a 86 cm)
1	*	+	+	+
2	+	+	+	+
3	+	+	+	+
4	+	*	+	+
5	+	-	+	+
6	+	+	+	+
7	+	+	+	+
8	+	+	+	+
9	+	+	+	+
10	-	+	+	+
11	-	+	+	+
12	+	+	+	+
13	+	+	+	+
14	-	+	+	+
15	+	*	+	+
16	+	+	+	+
17	+	+	+	+
18	+	+	+	+
19	+	+	+	+
20	+	+	+	+
21	+	-	+	+
22	+	+	+	+
23	+	+	+	+
24	+	+	+	+
25	+	+	+	+
26	+	+	+	+
27	+	+	-	+
28	+	+	+	+
29	*	+	+	+
30	*	+	+	+

CONTINÚA 

31	-	+	+	+
32	+	+	+	-
33	+	+	-	+
34	+	+	+	+
35	+	+	+	+
36	+	+	+	+
37	+	+	+	+
38	+	+	+	+
39	+	+	+	-
40	-	+	+	+
41	+	+	+	+
42	+	+	+	+
43	+	+	+	+
44	-	+	+	+
45	*	+	+	+
46	+	+	+	-
47	+	+	+	+
48	+	-	-	+
49	+	+	+	+
50	-	+	+	+
Falsos Positivos	38	45	47	47
Falsos Negativos	7	5	3	3
Porcentaje	78	90	94	94

De la tabla 32 se obtiene como resultados, que a distancias menores de 50 cm se consigue un 78% de efectividad, mientras que en valores entre 50 y 62cm se consigue un 90%, a una distancia entre 62 y 74 cm el resultado es de 94% y a distancias entre 74 y 86 se consigue 94%. Se puede observar que la detección de objetos con menor altura no es muy apreciable a una distancia promedio de 50 cm con respecto a la Kinect dado a las limitaciones de estas, en este caso se opta por la utilización de sensores ultrasónicos para la detección de objetos que se encuentren a una distancia menor a la especificada.

En consecuencia, para la óptima detección de objetos y que la lógica de control cumpla su cometido a tiempo se considera que las distancias comprendidas entre 62 a 74 cm brindan una respuesta de efectividad aceptable, no obstante, existe la posibilidad que los objetos dinámicos se posicionen rápidamente muy cerca del andador para lo cual como medida de seguridad

dentro del algoritmo se incluye la lógica de control para distancias entre 50 y 62 cm.

4.6.1. Detección y evasión de objetos pequeños

Para esta prueba se utiliza una caja de (17x6x6) cm que se la coloca en cada posición de la segmentación anterior (ver figura 77), mediante esta acción se obtiene una imagen de visualización del mapa de profundidad con los identificadores acorde a las distancias presentes en la tabla 31.

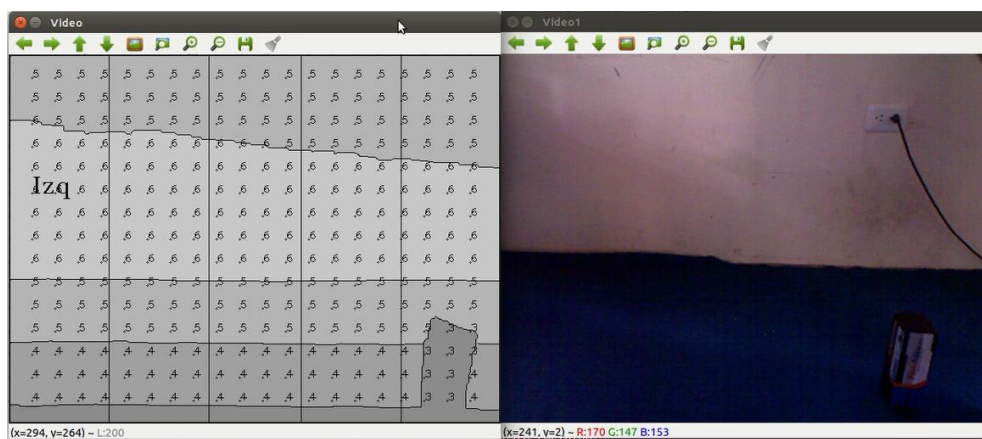


Figura 77. Detección de objetos pequeños y acciones

La Tabla 33 muestra la cantidad de objetos de un tamaño pequeño detectados, dividiéndolos en alternativas como positivas (detectadas) y negativos (no detectados).

Tabla 33.

Prueba de detección y evasión de objetos pequeños

N° Pruebas	Detecto	No detectó	N° de objetos	Efectividad
1	1	0	1	100,0
2	1	0	1	100,0
3	1	0	1	100,0
4	1	0	1	100,0
5	2	0	2	100,0
6	2	0	2	100,0
7	2	0	2	100,0
8	1	0	1	100,0
9	1	0	1	100,0

CONTINÚA 

10	1	0	1	100,0
11	1	0	1	100,0
12	1	0	1	100,0
13	1	0	1	100,0
14	1	0	1	100,0
15	1	0	1	100,0
16	1	0	1	100,0
17	2	0	2	100,0
18	1	1	2	50,0
19	2	0	2	100,0
20	2	1	3	66,7
21	2	1	3	66,7
22	3	0	3	100,0
23	1	0	1	100,0
24	1	0	1	100,0
25	1	0	1	100,0
26	2	1	3	66,7
27	3	0	3	100,0
28	1	1	2	50,0
29	2	0	2	100,0
30	3	1	4	75,0
31	4	0	4	100,0
32	4	0	4	100,0
33	1	0	1	100,0
34	5	0	5	100,0
35	4	1	5	80,0
36	5	0	5	100,0
37	4	1	5	80,0
38	1	0	1	100,0
39	0	1	1	0,0
40	1	0	1	100,0
Total	74	9	83	90,9
Porcentaje	89,16	10,84		

La figura 76 muestra una comparación del porcentaje obtenido en cada una de las opciones siendo este caso 89,16% para objetos detectados, y un 10,84 % de los objetos no encontrados por el algoritmo

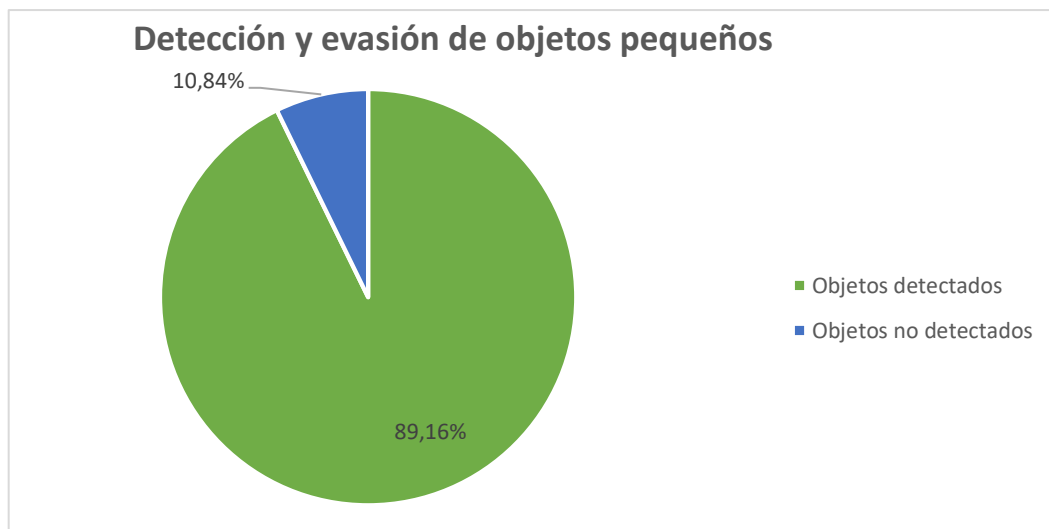


Figura 78. Evaluación del algoritmo con objetos pequeños

4.6.2. Detección y evasión de objetos medianos y grandes

Para esta prueba se utiliza un objeto de aproximadamente de 50x45x6 cm que se la coloca en cada posición de la segmentación anterior (ver figura 68), mediante esta acción se obtiene una imagen de visualización del mapa de profundidad con los identificadores acorde a las distancias (ver tabla 31).

La Tabla 34 muestra la cantidad de objetos de un tamaño mediano y grande detectados, dividiéndolos en alternativas como positivas (detectadas) y negativos (no detectados).

Tabla 34.

Prueba de detección de objetos medianos y grandes

N° Pruebas	Detecto	No detectó	N° de objetos	Efectividad
1	1	0	1	100
2	1	0	1	100
3	1	0	1	100
4	0	1	1	0
5	1	0	1	100
6	1	0	1	100
7	1	0	1	100
8	1	0	1	100
9	1	0	1	100
10	1	0	1	100

CONTINÚA

11	1	0	1	100
12	1	0	1	100
13	1	0	1	100
14	2	0	2	100
15	2	0	2	100
16	2	0	2	100
17	2	0	2	100
18	2	0	2	100
19	1	1	2	50
20	2	0	2	100
21	2	0	2	100
22	2	0	2	100
23	2	0	2	100
24	2	0	2	100
25	2	0	2	100
26	1	1	2	50
27	2	0	2	100
28	3	0	3	100
29	3	0	3	100
30	3	0	3	100
31	3	0	3	100
32	3	0	3	100
33	3	0	3	100
34	3	0	3	100
35	3	0	3	100
36	3	0	3	100
37	3	0	3	100
38	3	0	3	100
39	3	0	3	100
40	3	0	3	100
Total	77	3	80	95
Porcentaje	96,25	3,75		

La figura 79 muestra una comparación del porcentaje obtenido en cada una de las opciones siendo este caso 96,26% para objetos detectados, y un 3,75 % de los objetos no encontrados por el algoritmo

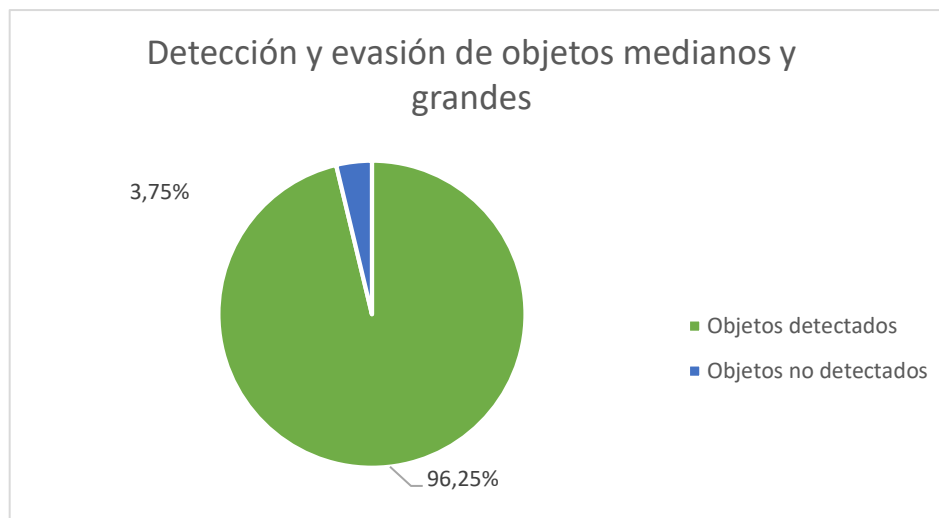


Figura 79. Evaluación del algoritmo con objetos medianos y grandes

4.6.3. Detección de objetos dinámicos

Para esta prueba se toma en consideración como objetos dinámicos a las personas u objeto que por algún motivo se encuentre en movimiento como por ejemplo sillas de ruedas, entre otros.

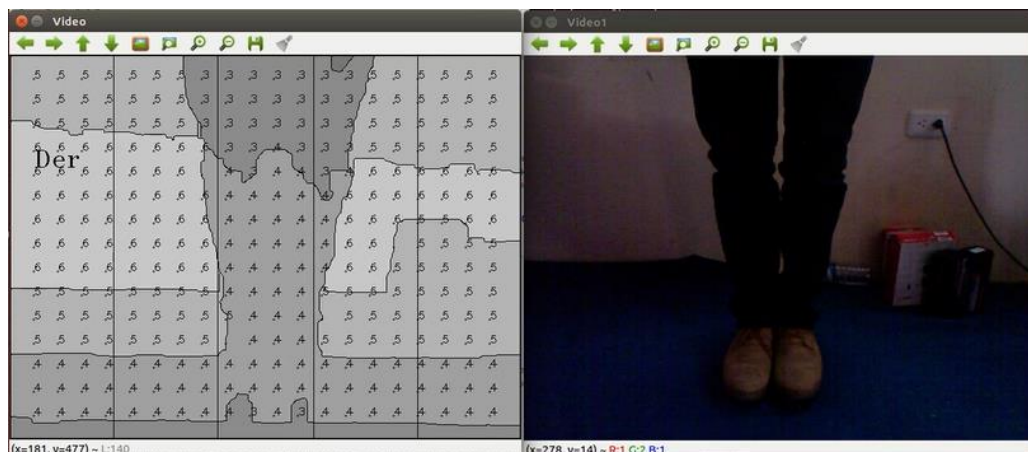


Figura 80. Detección y evasión de personas

Para lo cual en la Tabla 35 muestra la cantidad de personas u objetos dinámicos, dividiéndolos en alternativas como positivas (detectadas) y negativas (no detectados).

Tabla 35.

Prueba de detección y evasión de objetos dinámicos

N° Pruebas	Detecto	No detectó	N° de objetos	Efectividad
1	1	0	1	100
2	1	0	1	100
3	1	0	1	100
4	0	1	1	0
5	1	0	1	100
6	1	0	1	100
7	1	0	1	100
8	1	0	1	100
9	1	0	1	100
10	1	0	1	100
11	1	0	1	100
12	1	0	1	100
13	1	0	1	100
14	1	0	1	100
15	1	0	1	100
16	1	0	1	100
17	1	0	1	100
18	1	0	1	100
19	1	0	1	100
20	1	0	1	100
21	2	0	2	100
22	2	0	2	100
23	2	0	2	100
24	2	0	2	100
25	2	0	2	100
26	2	0	2	100
27	2	0	2	100
28	2	0	2	100
29	2	0	2	100
30	2	0	2	100
31	2	0	2	100
32	2	0	2	100
33	2	0	2	100
34	2	0	2	100
35	2	0	2	100
36	2	0	2	100
37	2	0	2	100
38	2	0	2	100
39	2	0	2	50

CONTINÚA



40	2	0	2	100
Total	59	1	60	96
Porcentaje	98,33	1,67		

La figura 81 muestra una comparación del porcentaje obtenido en cada una de las opciones siendo este caso 96,67% para objetos detectados, y un 3,33 % de los objetos no encontrados por el algoritmo



Figura 81. Evaluación del algoritmo con objetos dinámicos

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Validación de la hipótesis

La hipótesis planteada es la siguiente:

¿La investigación de técnicas de visión artificial para el diseño y construcción de un andador inteligente permitirá la movilización independiente de adultos mayores dentro del hogar de vida Luis Maldonado Tamayo?

- **Variables Independientes**

Andador inteligente que usa técnicas de visión artificial

- **Variables Dependientes**

Movilidad independiente de adultos mayores

Para la validación de la hipótesis se utiliza la técnica del chi-cuadrado, con la que se determina si dos variables están relacionadas o no. (Rivera, 2011).

Se empieza por definir la hipótesis nula y la hipótesis válida como se muestra a continuación:

- **Hipótesis nula**

H_0 = No permitirá la movilización independiente de adultos mayores

- **Hipótesis válida**

H_i = Permitirá la movilidad independiente de adultos mayores.

Margen de error considerado = 5%

Margen de error tabla = 0.05

Grados de libertad = 2

$$GDL = (n^\circ \text{filas} - 1) \times (n^\circ \text{columnas} - 1)$$

Mediante las pruebas identificadas en el capítulo 4 se obtiene la Tabla 36, siendo estos los valores de la frecuencia calculada, mientras que los datos de la

Tabla 37 corresponden a los valores de la frecuencia esperada que son necesarios para el cálculo del chi- cuadrado.

Tabla 36.

Datos para calcular chi-cuadrado

	Objetos pequeños	Objetos medianos y grandes	Objetos dinámicos	Total
Evadió	74	77	59	210
No evadió	9	3	1	13
Total	83	80	60	223

Tabla 37.

Datos de la frecuencia esperada

	Objetos pequeños	Objetos medianos y grandes	Objetos dinámicos
Evadió	56,50	75,34	78,16
No evadió	3,50	4,66	4,84

$$x^2 = \sum_{i=0}^n \frac{(f - ft)^2}{ft} \quad (20)$$

Donde:

f = frecuencia calculada

ft = frecuencia teórica o esperada

n = (nfilas * ncolumnas) -1

$$x^2 = \sum_{i=0}^5 \frac{(f - ft)^2}{ft}$$

$$x^2 = 6,325$$

Al obtener el chi-cuadrado se obtiene un resultado de 6,325, el cual se compara con los valores de chi-cuadrado de la tabla (**xtbl²**), que se aprecia en la figura 82.

DISTRIBUCION DE χ^2

Grados de libertad	Probabilidad											
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,01	0,001	
1	0,004	0,02	0,06	0,15	0,46	1,07	1,64	2,71	3,84	6,64	10,83	
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	5,99	9,21	13,82	
3	0,35	0,58	1,01	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	11,34	16,27	
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	13,28	18,47	
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	15,09	20,52	
6	1,68	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	16,81	22,46	
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	18,48	24,32	
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	20,09	26,12	
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	21,67	27,88	
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	23,21	29,59	
	No significativo								Significativo			

Figura 82. Tabla del chi-cuadrado

Fuente: (Barbosa & Hoyos, 2017)

$$\text{xtbl}^2 = 5,99$$

$$x_{\text{calc}}^2 > \text{xtbl}^2 = H_1 \text{ es válida}$$

$$x_{\text{calc}}^2 < \text{xtbl}^2 = H_0 \text{ es válida}$$

$$6,325 > 5,99 = H_1 \text{ es válida}$$

La hipótesis “El andador inteligente que usa técnicas de visión artificial permitirá la movilidad independiente de los adultos mayores” fue verificada por medio de distribución chi-cuadrado, con un margen de error del 5 %.

5.2. Análisis de económico

En la tabla 38 se detalla el costo de los elementos utilizados en la construcción del andador, así como el precio por varias actividades realizadas en todo este proceso, con el objetivo de dar un valor económico al proyecto.

Tabla 38. Análisis costo económico del andador

Cantidad	Concepto	Precio unitario	Total
1	Estructura base	135,49	135,49

CONTINÚA



2	Baterías	80	160
1	Cargador de baterías	10	10
1	Kit raspberry	150	150
1	Sensor Kinect	30	30
4	Sensores ultrasónicos	1,5	6
1	Banco de baterías	40	40
1	Arduino mega	20	20
1	Convertidor de voltaje	6	6
1	Driver de motores dc	35	35
1	Fuente Kinect	30	30
2	Bases de aluminio	86	86
1	Carcasa	25	25
	Impresiones 3d	140	140
2	Sensores de presión	15	30
1	Eje de acero	4	4
1	Eje de aluminio	8	8
1	Techado Logitech	30	30
	Diseño y construcción		1000
	Artículos varios	200	200
			2145,49

Se ha indagado en la web en búsqueda de andadores inteligentes comerciales con resultados nulos, la información disponible es de investigaciones similares con costos de inversión de aproximadamente 3.5 millones de euros, sin embargo, los científicos consideran que en el futuro podrían costar no más 2000 euros (Lopez, 2015). El presente proyecto al encontrarse dentro del marco de investigación encaja correctamente con este último valor.

5.3. Conclusiones

- Se ha diseñado y construido un andador inteligente, el cual con la ayuda de las imágenes de profundidad proporcionadas por la Kinect es capaz de evitar obstáculos con el uso de librerías de código abierto.
- La selección de componentes electrónicos como: driver, arduino y conversores de voltaje se realiza después de un cálculo y análisis de los parámetros que estos manejarán debido a que es preferible adquirir del

mercado el circuito completo que obtener todos los componentes necesarios para ensamblar por cuenta propia.

- La estructura mecánica fue construida a partir de una base ya que la construcción en su totalidad no puede llevarse a cabo por la dificultad de elaborarla en aluminio. El andador puede ser regulado en altura lo cual permite que un mayor grupo de personas puede usarlo adaptándose a sus necesidades.
- El programa principal de evasión de obstáculos fue diseñado mediante el uso de librerías de Opencv, que brinda una amplia variedad de filtros y seccionamiento, todo este procesamiento se realiza en tiempo real con las imágenes de profundidad otorgadas por la Kinect.
- Se implementó el sistema mecánico y el sistema de control, el andador fue diseñado en configuración diferencial con dos ruedas tipo castor en la parte delantera, en donde el sistema de control debe ser capaz de evadir obstáculos al considerar esta característica de diseño.
- La forma de los objetos que son detectados por el sensor Kinect no es un factor importante ya que el algoritmo detecta formas regulares o irregulares mediante el uso de la información de profundidad del sensor.
- El algoritmo de detección de objetos se complementa con la evasión de estos, para lo cual el ángulo de inclinación de la cámara es de 20 grados para optimizar la detección de objetos pequeños que se encuentren frente al andador.
- La mayor efectividad del algoritmo se da cuando los objetos no presentan características de transparencia o reflectancia, ya que no pueden ser detectados y se detectan parcialmente.
- Dado que el rango de adquisición de la Kinect es a partir de aproximadamente 50 cm, se optó por complementar la evasión de objetos con sensores ultrasónicos distribuidos en 3 sentidos y así obtener mejores resultados.
- Para optimizar la etapa de detección de objetos se dividió la imagen en cinco secciones verticales, dentro de las cuales se realizó la lógica de programación mediante la utilización de estados de ocupación.

- El espesor de los objetos a detectar no influye en gran medida, ya que el sensor detecta el primer plano de estos, acorde a las distancias especificadas.
- El tiempo de adquisición de datos de los sensores ultrasónicos añade tiempo de retardo en la comunicación serial entre la tarjeta de control Raspberry pi y arduino para lo cual se optó por la utilización de un arduino nano para la adquisición de las distancias de dichos sensores y de esta manera la evasión de los obstáculos sea en tiempo real.
- El diseño y posterior construcción de las partes del andador se realizó en material PLA como materia prima para las impresiones 3D que dieron excelentes resultados por la resistencia que presenta este material además del costo accesible.
- La implementación de encoders en los motores ha dado resultados aceptables, ya que por medio de interrupciones en arduino, al comparar el número de pulsos de cada rueda con las mismas velocidades y tiempo los resultados tienen un mínimo porcentaje de error relativo.
- La lógica de programación del andador inteligente considera como un posible riesgo a los pasos a desnivel o gradas, cuya acción es el paro inmediato del sistema, caso que no sucede en los andadores convencionales y el adulto mayor resulta herido ya que por su reducida visibilidad no percibe una grada o un desnivel en su trayectoria.
- Al trabajar con los datos de profundidad del sensor Kinect la iluminación del lugar es un factor determinante para lo cual el presente proyecto está diseñado para su utilización en interiores, caso contrario como medida de seguridad si el sensor detecta cambios de iluminación elevados el dispositivo permanece en un estado de paro.
- Una condición en la que es necesaria la intervención de las terapeutas o ayudantes es cuando el andador se encuentre en un punto muerto, es decir, se ubique en la esquina de una pared sin tener la opción de giro en ningún sentido y el mismo se mantiene detenido, caso que no sucedía anteriormente ya que los ayudantes debían permanecer en estado de apoyo en todo momento

5.4. Recomendaciones

- El ambiente para el que fue diseñado el andador es cerrado por lo que se debe evitar en lo posible mantenerlo a la intemperie ya que elementos como agua y exceso de polvo pueden afectar su correcto funcionamiento.
- La estructura casi en su totalidad es de aluminio ya que es un material ligero y resistente con lo cual se reduce considerablemente la potencia de los motores, así como el consumo de corriente de las baterías.
- Las ruedas posteriores pueden ser reemplazadas por unas de mayor ancho y así permitir más tracción y resistencia al momento de frenar.
- Al momento de activarse las alarmas de las baterías es necesario que el andador sea detenido en su operación ya que al agotarse en su totalidad estas baterías pueden quedar obsoletas.
- Para un mayor tiempo de trabajo útil del dispositivo se recomienda poner los interruptores de alimentación de las baterías en estado de apagado mientras no esté en uso el dispositivo.
- Para dar mayor eficiencia al programa es viable que la tarjeta raspberry pi sea exclusivamente para uso de este proyecto.
- El motor de la Kinect no debe ser manipulado para que no se pierda el ángulo para el cual está realizada la programación.
- En lo posible al momento de sujetarse del andador el adulto debe traer las manos limpias ya que el andador al ser activado con sensores de fuerza estos están en contacto directo con el adulto mayor y la presencia de líquido o polvo reducen drásticamente la vida útil del sensor.
- La estructura debe ser regulada manualmente antes de usarse, dependiendo de la altura del adulto para asegurar un punto de apoyo perfecto para la tracción y de esta forma evitar que existan deslizamientos no deseados en las ruedas.
- Para una mejor maniobrabilidad al momento de tratar de guiar al andador hacia la izquierda o derecha se podría reemplazar los pulsadores por otro tipo de mecanismo o sensores que feliciten el uso por el adulto mayor ya que varios muestran dificultad para maniobrar.

- Para que la medición de pulsos en los encoders sea exacta de preferencia se debe adquirir motores con estos instalados para así evitar los errores generados por encoder adaptados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, J. B., & Hoyos, M. G. (17 de Junio de 2017). *Slideplayer*. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/1697756>
- Batani, H., & Maki, B. (2005). Assistive devices for balance and mobility: benefits, demands, and adverse consequences. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 134-145.
- Beyeler, M. (2015). *OpenCV with Python Blueprints: Design and develop advanced computer vision projects using OpenCV with Python*. London: Packt Publishing Ltd. doi:ISBN 978-178528269-0
- Borgolte, U. (1999). A novel mobility aid for independent daily living of elderly people. *Proceedings 5th European Conference for the Advancement of Assistive Technology (AAATE)*, 267-271.
- Bourhis, G., Horn, O., Habert, O., & Pruski, A. (2001). An autonomous vehicle for people with motor disabilities. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20-28.
- Bräunl, T. (1998). *Embedded Robotics: Mobile Design and Applications with Embebbed Systems* (Third ed.). Germany: Springer.
- Carracedo, R. (15 de Septiembre de 2013). *rubencarracedo*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2017, Obtenido de <http://www.rubencarracedo.com/como-usar-microsoft-kinect-como-escaner-3d/>
- Carrera, V., & Salazar, J. (2014). *Velocidad de la marcha como predictor de recuperación funcional en pacientes adultos mayores, hospitalizados en el servicio de geriatría del hospital docente Quito n.º 1 de la policía nacional*. Quito.
- Carvajal, P., & Salazar, N. (2011). *La planificación estratégica como factor de incidencia en los servicios sociales prestados por el Hogar de Vida Luis*

Maldonado Tamayo para la protección de adultos mayores abandonados del Cantón Pujilí. Pujilí. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/13264>

Ceres, R. (2007). Las tecnologías de apoyo para la vida independiente de los mayores. *Entre MayoresEM*, 10-11.

Ceres, R., Pons, J., Calderón, L., Mesonero-Romanos, D., Jiménez, V., Sánchez, F., . . . Bonivardo, G. (2005). Andador activo para la rehabilitación y el mantenimiento de la movilidad natural. *IMSERSO, Estudios I+ D+ I*, 1-8.

Constantinescu, R., Leonard, C., Deeley, C., & Kurlan, R. (2007). Assistive devices for gait in Parkinson's disease. *Parkinsonism & related disorders*, 133-138.

Cortés, U., Martínez-Velasco, A., Barrué, C., Benedico, T., Campana, F., Caltagirone, C., & Annicchiarico, R. (2008). A SHARE-it service to elders' mobility using the i-Walker. *Gerontechnology*, 95.

Cortes, U., Martínez-Velasco, A., Barrué, C., Martín, E., Campana, F., Annicchiarico, R., & Caltagirone, C. (2008). Towards an Intelligent Service to Elders Mobility Using the i-Walker. *AAAI Fall Symposium: AI in Eldercare: New Solutions to Old Problems*, 32-38.

Costa, N., & Caldwell, D. G. (2006). Control of a biomimetic" soft-actuated" 10dof lower body exoskeleton. *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*, 495-501.

DALI. (2013). *Andador inteligente para personas mayores*. Barcelona, España. Obtenido de <https://www.inforesidencias.com/contenidos/noticias/nacional/andador-inteligente-para-personas-mayores>

Dra. Muñoz, M. (Julio de 2008). *Visión en el adulto mayor*. Recuperado el 14 de Agosto de 2016, Obtenido de

http://www.msp.gub.uy/sites/default/files/archivos_adjuntos/Ve_adulto.pdf
 .pdf

Duxbury, A. S. (2000). Gait disorders and fall risk: detection and prevention. *Comprehensive therapy*, 238-245.

EcuRed. (8 de Julio de 2016). *Caidas en el adulto mayor*. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, Obtenido de http://www.ecured.cu/Ca%C3%ADdas_en_el_adulto_mayor

Frizera, A., Abellanas, A., Ceres, R., Pons, J., & Raya, R. (2009). Study and characterization of feet kinematics in walker assisted gait. *Revista Iberoamericana de automatica e informática industrial*, 69-+.

Frizera, A., Ceres, R., Pons, J. L., Abellanas, A., & Raya, R. (2008). The smart walkers as geriatric assistive device. the symbiosis purpose. *Proceedings of the 6th International Conference of the International Society for Gerontechnology*, 1-6.

Gallardo, J., & Gaona, A. (2015). *Diseño y construcción de una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar slam (simultaneous localization and mapping)*. Quito: Repositorio Espe.

Glover, J., Holstius, D., Manojlovich, M., Montgomery, K., Powers, A., Wu, J., . . . Thrun, S. (2003). A robotically-augmented walker for older adults. *Technical Report CMU-CS-03-170*.

Graf, B. (2001). Reactive navigation of an intelligent robotic walking aid. *Robot and Human Interactive Communication, 2001. Proceedings. 10th IEEE International Workshop on*, 353-358.

IndraCompany. (9 de Diciembre de 2014). *Indra prueba un andador inteligente para facilitar la movilidad de las personas mayores*. Obtenido de <https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-prueba-andador-inteligente-facilitar-movilidad-personas-mayores>

- Lacey, G., & Dawson-Howe, K. (1997). Evaluation of robot mobility aid for the elderly blind. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Intelligent Robotic Systems*.
- Lacey, G., & Rodriguez-Losada, D. (2008). The evolution of guido. *IEEE robotics & automation magazine*.
- Lopez, J. (24 de Abril de 2015). *Andador inteligente para personas de la tercera edad*. Obtenido de <http://es.euronews.com/2015/04/24/un-andador-inteligente-para-las-personas-de-la-tercera-edad/>
- MacNamara, S., & Lacey, G. (2000). A smart walker for the frail visually impaired. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, 1354-1359.
- Martins, M. M. (2011). *Online control of a mobility assistance Smart walker*.
- Matinez, D. L. (2013). *Sistemas Operativos*. Argentina.
- Micropik. (2 de Enero de 2016). *Micropik*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, Obtenido de <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- Montesalud. (3 de Febrero de 2016). *Ayudas técnicas para adultos mayores*. Obtenido de <http://www.montesalud.com/blog/ayudas-tecnicas-para-personas-mayores/>
- Morris, A., Donamukkala, R., Kapuria, A., Steinfeld, A., Matthews, J. T., Dunbar-Jacob, J., & Thrun, S. (2003). A robotic walker that provides guidance. *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*, 25-30.
- Neto, A. F. (2010). Interfaz multimodal para modelado, estudio y asistencia a la marcha humana mediante andadores robóticos.
- Ollero, A. (2007). *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. España: Marcombo.

- OMS. (diciembre de 2016). *La actividad física en los adultos mayores*. Recuperado el 1 de Febrero de 2017, Obtenido de http://www.who.int/dietphysicalactivity/factsheet_olderadults/es/
- OpenCV. (13 de Abril de 2016). *Open Source Computer Vision*. Recuperado el 19 de Julio de 2017, Obtenido de <http://opencv.org/>
- Raspberry Pi. (12 de Febrero de 2016). *Raspberry Pi*. Recuperado el 18 de Marzo de 2017, de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- Raspberry Pi. (28 de Febrero de 2016). *Raspberry Pi*. Recuperado el 14 de Abril de 2017, Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-touch-display/>
- Rentschler, A. J., Cooper, R. A., Blasch, B., & Boninger, M. L. (2003). Intelligent walkers for the elderly: Performance and safety testing of VA-PAMAID robotic walker. *Journal of rehabilitation research and development*, 423.
- Rivera, J. (2 de Mayo de 2011). *Prueba Chi-Cuadrado*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/armando310388/prueba>
- Rosebrock, A. (26 de Octubre de 2015). *pyimagesearch*. Recuperado el 21 de Agosto de 2017, de [be awesome at building image search engines: https://www.pyimagesearch.com/2015/10/26/how-to-install-opencv-3-on-raspbian-jessie/](https://www.pyimagesearch.com/2015/10/26/how-to-install-opencv-3-on-raspbian-jessie/)
- Spenko, M., Yu, H., & Dubowsky, S. (2006). Robotic personal aids for mobility and monitoring for the elderly. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 344-351.
- Tagawa, Y., Shiba, N., Matsuo, S., & Yamashita, T. (2000). Analysis of human abnormal walking using a multi-body model: joint models for abnormal walking and walking aids to reduce compensatory action. *Journal of biomechanics*, 1405-1414.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta ed.). México: McGraw-Hill.

Veiga, I. V., Zymler, R., Shayani, R. A., Viana, D. M., & Orrico, M. V. (2012). Sizing of motor and battery pack for an automotive electric vehicle given a specific route. *Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)* (págs. 1-8). Montevideo: IEEE.

World Health Organization. (7 de Marzo de 2007). *WHO global report on falls prevention in older age*. Recuperado el 25 de Agosto de 2016, Obtenido de http://www.who.int/ageing/publications/Falls_prevention7March.pdf

XBOX. (5 de Enero de 2016). *Microsoft*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2017, Obtenido de <https://support.xbox.com/es-MX/xbox-360/accessories/kinect-sensor-components>

ANEXOS



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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el siguiente trabajo fue desarrollado por los señores: **JOSÉ LUIS GUAMUSHIG LAICA** y **MIGUEL ANGEL JEREZ GAVILÁNEZ**, bajo nuestra supervisión.

Aprobado por:

