



ESPE

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

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA
MECATRÓNICO PARA UN BASTÓN ROBÓTICO UNICICLO
PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN GENERATIVA
DESARROLLADO POR LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS ESPE**

AUTOR: ORTIZ COLCHA, JORGE GABRIEL

DIRECTOR: ING. ARTEAGA LÓPEZ, OSCAR BLADIMIR

LATACUNGA

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA UN BASTÓN ROBÓTICO UNICICLO PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN GENERATIVA DESARROLLADO POR LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”**, fue realizado por el señor **Ortiz Colcha, Jorge Gabriel** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 31 de Agosto de 2018

Firma:

Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir

C.C.: 180237926 - 1



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Ortiz Colcha, Jorge Gabriel**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA UN BASTÓN ROBÓTICO UNICICLO PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN GENERATIVA DESARROLLADOS POR LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 31 de Agosto de 2018

Firma

Ortiz Colcha, Jorge Gabriel

C.C.: 180437546-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Ortiz Colcha, Jorge Gabriel** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“INVESTIGACIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA UN BASTÓN ROBÓTICO UNICICLO PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN GENERATIVA DESARROLLADOS POR LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 31 de Agosto de 2018

Firma

Ortiz Colcha, Jorge Gabriel

C.C.: 180437546-5

DEDICATORIA

El Presente Proyecto va dedicado a:

Mis Padres Jorge y Sonia, a mis hermanos y a toda mi familia que con su apoyo incondicional y sus buenos deseos me supieron motivar que con perseverancia y dedicación es posible cumplir con un objetivo tan importante dentro de mi carrera profesional; a pesar de las adversidades que se presentaron dentro de este trayecto estudiantil lo más importante es la convicción de completar lo que se ha propuesto terminar.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme gozar de buena salud y bendecirme siempre en todas las actividades que me propongo. A mis Padres, por el sacrificio que han hecho económicamente para apoyarme a forjar y mejorar profesionalmente en una prestigiosa institución, además al inculcarme excelentes valores morales que me han dado la ruta necesaria para cumplir uno de mis objetivos. A mis familiares, amigos que estuvieron siempre dispuestos a ayudarme en los momentos que necesitaba algún apoyo.

Agradecerle al Ing. Víctor Andaluz, al Ing. Oscar Arteaga quienes con su guía han despejado todas mis dudas durante la realización de este proyecto, siendo un apoyo enorme para la culminación del presente proyecto. Por último, agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a todos sus docentes ya que cada uno han aportado para mi preparación tanto a nivel académico, como profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1	Antecedentes	1
1.2	Planteamiento del problema	2
1.3	Objetivo general	3
1.4	Objetivos Específicos	4
1.5	Alcance	4
1.6	Importancia.....	5
1.7	Discapacidades	6
1.7.1	Introducción	6
1.7.2	Antecedentes de Discapacidad en el Ecuador	7
1.7.3	Trastornos de la Marcha y Disfunciones	7
a.	Personas Mayores.....	7
b.	Tipos principales de marcha patológica	8
1.8	Estudio de ayudas para la movilidad.....	10
1.8.1	Dispositivos de ayuda convencionales	10
1.9	Parámetros para el uso de un bastón	11

1.9.1	Medidas antropométricas de una persona	11
1.9.2	Combinación de movimientos al caminar con bastón.....	12
1.9.3	Parámetros espacio-temporales de la marcha humana.....	13
1.9.4	Influencia de la carga aplicada sobre bastones.....	16
1.9.5	Fuerza aplicada a un bastón	17
1.10	Adaptación de dispositivos de ayuda	19
1.10.1	Dispositivo robótico tipo bastón Guide Cane	19
1.10.2	Dispositivo SMARTCANE.....	20
1.10.3	Bastón robótico omnidireccional basado en la Intención Humana	21
1.10.4	Andadores Inteligentes	22
a.	Andador Robotizado	22
b.	Caminante inteligente VA-PAMAID.....	23
c.	Sistema mecatrónico de asistencia técnica para las personas de edad avanzada ..	24
1.10.5	Diseño de un bastón robotizado para asistencia.....	25
1.10.6	Diseño de un prototipo de asistencia Walker	26
1.11	Robot paralelo	27
1.12	Plataformas Móviles.....	28
1.12.1	Plataformas móviles unicycle	28
1.12.2	Modelo cinemático del robot unicycle.....	29
1.13	Sensores.....	31
1.13.1	Definición.....	31
1.13.2	Encoders de cuadratura	31
1.13.3	Celdas de carga.....	32
1.14	Actuadores.....	33
1.14.1	Definición.....	33
1.14.2	Actuador lineal	33
1.14.3	Motorreductor de corriente continua DC	34
1.15	Controladores	34
1.15.1	Raspberry PI modelo B	34
1.15.2	Familia de microcontroladores ARM CORTEX – M.....	35
1.15.3	Microcontroladores STM32	35
1.15.4	Tarjeta Discovery STM32F407.....	36

1.15.5	STM32CubeMX.....	38
1.15.6	System Workbench para STM32	39
1.15.7	Módulo Bluetooth HC-05.....	40
1.16	App Inventor	41

CAPÍTULO II

DISEÑO MECÁNICO

2.1	Parámetros de Diseño.....	42
2.2	Determinación de Cargas	44
2.2.1	Diseño Mecánico de la plataforma móvil	45
a.	Cálculo de la potencia del motor.....	45
2.2.2	Diseño del sistema mecánico para el movimiento del bastón.....	48
a.	Articulaciones.....	48
b.	Cálculo Motores Lineales.....	49
c.	Análisis de rotación en SolidWorks.....	53
2.3	Selección de materiales	54
2.4	Selección de componentes	56
2.4.1	Selección de Motores de tracción.....	56
a.	Actuador DYNAMIXEL PRO L54-30-S500-R.....	56
b.	Motor DC RS775 con reducción planetaria PG71 de AndyMark.....	57
c.	DOGA DC Geared Motor, 24 V dc, 25 Nm, 3Nm, 70 rpm	58
d.	Motor Mount & Wheel Kit - Aluminum.....	59
2.4.2	Selección para actuadores lineales	63
a.	Actuador Firgelli L16 con retroalimentación.....	63
b.	Actuador lineal concéntrico LACT4P-12V.....	64
2.4.3	Evaluación de los motores.....	65
2.5	Construcción.....	66

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

3.1	Requerimientos funcionales	71
3.2	Módulo Fuente de alimentación	72

3.3	Módulo de Acondicionamiento de señales.....	75
3.3.1	Acondicionamiento de las Celdas de Carga.....	75
3.4	Módulo De Potencia.....	80
3.4.1	Control de posición de los motores DC	80
3.4.2	Acondicionamiento para encoder digital.....	83
3.4.3	Control de posición de los motores lineales Firgelli.....	84
3.5	Módulo de control	85
3.5.1	Método de programación del microcontrolador ARM.....	87
3.5.2	Timers.....	88
3.5.3	Puertos GPIO.....	89
3.6	Diseño de las placas	89
3.7	Interfaz de control con Android	91

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO

4.1	Pruebas de la fuente de alimentación	93
4.2	Caracterización de la celda de carga	94
4.3	Medición del desplazamiento.....	96
4.4	Pruebas de velocidad lineal y maniobrabilidad con carga	98
4.5	Autonomía.....	99
4.6	Validación de la hipótesis.	99
4.6.1	Planteamiento de la hipótesis	99
4.6.2	Validación de la hipótesis	100
4.7	Costos de los materiales	100

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	102
5.2	Recomendaciones.....	102

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
---	------------

ANEXOS	107
---------------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros espacio-temporales de la marcha humana libre y asistida	14
Tabla 2	Clasificación de IMC de acuerdo con la OMS	18
Tabla 3	Requerimientos para el diseño	43
Tabla 4	Posibles soluciones para el material de la estructura	54
Tabla 5	Parámetros del Aluminio.....	55
Tabla 6	Características motor Dynamixel.....	56
Tabla 7	Proyección estado de pérdidas y ganancias	57
Tabla 8	Características	58
Tabla 9	Comparación	59
Tabla 10	Características del motor.....	60
Tabla 11	Selección del motor.....	61
Tabla 12	Comparación	64
Tabla 13	Evaluación.....	65
Tabla 14	Valores de voltajes medidos a partir de diferentes pesos.....	78
Tabla 15	Pruebas de velocidad de motores Parallax	81
Tabla 16	Datos del ADC del microcontrolador	94
Tabla 17	Medición de celdas de carga	96
Tabla 18	Pruebas de encoder.....	97
Tabla 19	Pruebas Piso Liso	98
Tabla 20	Lista de precios	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción Humano Robot - Principales aplicaciones.....	5
Figura 2. Marcha en Tijera.....	9
Figura 3. Bastón y andador	11
Figura 4. Ilustración de medidas antropométricas	12
Figura 5. Fases de movimientos al caminar con bastón.....	12
Figura 6. Parámetros de la marcha huma.....	14
Figura 7. Secuelas musculares	16
Figura 8. Dispositivo Guide Cane.....	20
Figura 9. Dispositivo SmartCane	21
Figura 10. Bastón tipo omnidireccional.....	22
Figura 11. Andador Robotizado.....	23
Figura 12. Andador VA-PAMAID Fuente: (Rentschler & Cooper, 2016).....	24
Figura 13. Andador inteligente	25
Figura 14. Bastón robotizado para asistencia	26
Figura 15. Asistente Walker.....	26
Figura 16. Robot paralelo.....	27
Figura 17. Robot Pioneer	29
Figura 18. Robot unicycle: Configuración diferencial	30
Figura 19. Encoder de cuadratura	32
Figura 20. Celda de Carga Unipunto	32
Figura 21. Actuador lineal	33
Figura 22. Raspberry PI modelo B	34
Figura 23. Microcontrolador STM32.....	36
Figura 24. STM32F3 Discovery Fuente: (Mechatronics S. , 2015)	37
Figura 25. Módulo Bluetooth HC-05.....	41
Figura 26. Esquema del prototipo.....	42
Figura 27. Diagrama de Cuerpo Libre	46
Figura 28. Rótulas angulares.....	48
Figura 29. Trípode 3SPS.....	50

Figura 30. Movimiento y rotación del bastón robótico.....	53
Figura 31. Diseño CAD de la estructura de la plataforma	55
Figura 32. Actuadores Dynamixel PRO	56
Figura 33. Motor DC RS775.....	57
Figura 34. Motor DC Marca DOGA.....	58
Figura 35. Motor marca Parallax	60
Figura 36. Actuador Firgelli L16 con retroalimentación	63
Figura 37. Actuador Pololu.....	65
Figura 38. Diseño del Bastón Robótico	66
Figura 39. Cortes de aluminio.....	67
Figura 40. Estructura lateral de la plataforma.....	67
Figura 41. Estructura.....	68
Figura 42. Montaje de motores de tracción.....	68
Figura 43. Conexión de Elementos	69
Figura 44. Pruebas del Prototipo.....	69
Figura 45. Ajuste de Tapas	70
Figura 46. Diseño final del bastón robótico.....	70
Figura 47. Batería LIPO 4 Celdas.....	73
Figura 48. Diseño PCB de la Fuente de Alimentación	74
Figura 49. Diagrama de la Fuente de Alimentación	75
Figura 50. Aplicación de Fuerzas	76
Figura 51. Amplificador de instrumentacion para celdas de carga.....	77
Figura 52. Esquema general del proceso de adquisición	78
Figura 53. Grafica Voltaje vs Peso	79
Figura 54. Motor 12 V	81
Figura 55. Monster moto shield.....	82
Figura 56. Diagrama de Control para motores de Tracción.....	83
Figura 57. Tabla de verdad L293D.....	85
Figura 58. Diagrama de Control para Motores Lineales.....	85
Figura 59. Detalle de pines utilizados para el proyecto	86

Figura 60. Diagrama de Bloques del Sistema Electrónico.....	89
Figura 61. Diseño 3D del PCB	90
Figura 62. Placas electrónicas acopladas en la plataforma	90
Figura 63. Diseño completo del bastón Robótico	91
Figura 64. Interfaz de control con Android	91
Figura 65. Funciones de la aplicación de Android.....	92
Figura 66. Curva de reacción Celda 1	95
Figura 67. Curva de reacción Celda 2.....	95
Figura 68. Curva de reacción Celda 3.....	95
Figura 69. Pulsos medidos	98

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Velocidad Media	15
Ecuación 2 Índice de Masa.....	17
Ecuación 3 Peso en función de la masa	18
Ecuación 4 Velocidad Lineal	30
Ecuación 5 Velocidad Angular	30
Ecuación 6 Fuerzas en el eje X	46
Ecuación 7 Fórmula de Potencia.....	47
Ecuación 8 Fórmula Velocidad Angular.....	47
Ecuación 9 Velocidad lineal.....	62
Ecuación 10 Fórmula potencia eléctrica	74
Ecuación 11 Fórmula Potencia de la batería	74
Ecuación 12 Frmula de la ganancia	77
Ecuación 13 ADC Microcontrolador	79
Ecuación 14 Perímetro de la rueda.....	83

RESUMEN

El presente trabajo de titulación inicia con la investigación de un nuevo sistema mecatrónico para un bastón robótico unicycle gracias a un minucioso análisis de las nuevas tecnologías aplicadas a dispositivos convencionales de ayuda a la marcha humana como un bastón ortopédico o un andador, incluyendo de los parámetros más importantes dentro del movimiento de una persona se procede con el diseño. El bastón robótico consta de tres partes en general, una plataforma mecánica móvil dos ruedas de tracciones acopladas a motores independientes que permiten el desplazamiento del dispositivo; consta de un sistema para la movilidad del bastón conformado por tres motores lineales que dotan de un movimiento de rotación alrededor de un punto fijo. Por último, consta de la electrónica e instrumentación conformado por sensores y elementos electrónicos con el fin de captar información del robot que utiliza un algoritmo que consta de dos modos de operación, el primero automático el cual por medio de parámetros preestablecidos permiten moverse al dispositivo y el segundo manual que interpreta las intenciones de movimiento del usuario. El control del dispositivo se realiza por medio de una aplicación móvil de forma inalámbrica.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBÓTICA**
- **BASTÓN ROBÓTICO**
- **BIOMECÁNICA**
- **EXTREMIDADES INFERIORES**

ABSTRACT

The present work begins with the investigation of a new mechatronic system for a single robotic cane thanks to a meticulous analysis of the new technologies applied to conventional devices to help the human gait such as an orthopedic cane or a walker, including the parameters most important within the movement of a person proceeds with the design. The robotic cane consists of three parts in general, a mobile mechanical platform, two traction wheels with independent motors that allow the movement of the device; It consists of a system for the mobility of the stick conformed by three linear motors that provide a rotation movement around a fixed point. Finally, it consists of electronics and instrumentation consisting of sensors and electronic elements in order to capture information from the robot that uses an algorithm consisting of two modes of operation, the first automatic that by means of pre-established parameters allow the device to move and the second manual that interprets the user's movement intentions.

The control of the robotic cane have a mobile application.

KEYWORDS:

• **ROBOTICS**

• **ROBOTIC CANE**

• **BIOMECHANICS**

• **LOWER EXTREMITY**

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 Antecedentes

Según el último Informe mundial sobre la discapacidad publicado en el 2017 por la Organización Mundial de la Salud se estima que el 15% de la población mundial vive con algún tipo de Discapacidad de la cuales una de las más comunes tiene que ver con problemas en la movilidad. Además; en muchos países de nuestra sociedad la población sufre de déficit de la función motora debido a accidentes diversos, problemas neurológicos o falta de fuerza muscular; entre otras cosas existe discapacidades en las extremidades inferiores que requieren de un tiempo de descarga total o bien de descarga parcial, enfermedades que producen debilitamiento general, patologías respiratorias, envejecimiento, obesidad, o incluso problemas psicológicos o psiquiátricos como cuadros depresivos.

Por las razones anteriormente mencionadas muchas instituciones de educación superior se centran en fomentar actividades orientadas a la transferencia de experiencias y de tecnologías para mejorar la calidad de vida de aquellas personas que sufren problemas de movilidad ya sean estas permanentes o solo temporales.

Es por eso que en los últimos tiempos han ido apareciendo nuevas investigaciones que permitan mejorar la calidad de vida de estas personas, entre las cuales se destacan ayudas para la movilidad de personas no videntes y con deficiencia motriz; entre las que se puede mencionar: exoesqueletos, dispositivos basados en dispositivos comunes como: bastones o andadores con la

inclusión de nuevas tecnologías utilizando sensores y actuadores que les mucha más autonomía y funciones útiles al momento de ser utilizados.

1.2 Planteamiento del problema

A lo largo de la historia uno de los problemas físicos con el que ha tenido que lidiar el ser humano ha sido con las discapacidades, entre las cuales se puede mencionar la deficiencia motriz o algún tipo de discapacidad funcional de las extremidades, que por lo general son causadas por problemas neurológicos o falta de fuerza muscular ya sea por el pasar de los años, por mal formación o afecciones que ataquen las extremidades. Para las personas que padecen alguna de estas afectaciones se les presenta ciertas limitaciones al desplazarse ya que pueden encontrar varios inconvenientes o sufrir accidentes, para lo cual es necesario buscar alternativas que permitan brindarles un apoyo a la marcha que disminuya la incidencia de caídas y les facilite la marcha natural.

Existen diferentes tipos de afecciones del miembro inferior que requieren de un tiempo de descarga total o bien de descarga parcial como procesos postquirúrgicos, dolor que lleva a adoptar posturas antiálgicas, patologías neurológicas, amputaciones, afecciones musculoesqueléticas, enfermedades que producen debilitamiento general como cánceres, patologías respiratorias, edad, obesidad, o incluso problemas psicológicos o psiquiátricos como cuadros depresivos por lo que diversos estudios han buscado dar alternativas para ayudar de alguna manera al traslado de estas personas de un lugar a otro. Existen dispositivos mecánicos para su asistencia, siendo el más usado el bastón, el cual gracias a la inclusión de nuevas tecnologías se han convertido en dispositivos inteligentes que permitan tomar información del medio, la cual es útil para el usuario para poder trasladarse de forma segura. Cabe recalcar también que una rama muy importante como la

fisioterapia ha buscado la forma de tomar datos relevantes de pacientes con este tipo de afecciones como por ejemplo el porcentaje de peso aplicado al bastón, velocidad de la marcha; datos importantes para análisis cinemático de la marcha y para tener registros del proceso de rehabilitación del paciente por lo cual en este proyecto se tratara de abarcar los aspectos mencionados.

La robótica actualmente ha tenido un desarrollo y crecimiento cada vez más rápido en el mundo. Los problemas que suelen resolver los robots son aquellas tareas que el ser humano requiere o no puede hacer debido al riesgo que implican, en este contexto hay proyectos orientados a la Interacción Humano-Robot, lo que permite que el robot interactúe de manera amigable y segura con el humano con contacto físico. En el Ecuador la robótica no está desarrollada aún, pero hay algunas universidades y centros de investigación que están introduciendo en sus proyectos este tipo de elementos con el fin de contribuir con el desarrollo. Muchos avances tecnológicos vienen motivados por la capacidad del profesional de observar e interpretar las mediciones del movimiento humano. La promoción del estudio de la locomoción sigue dependiendo del desarrollo de nuevas herramientas para la observación, la instrumentación y las tecnologías informáticas han creado nuevas oportunidades para el adelanto del estudio de la locomoción.

1.3 Objetivo general

Investigar y diseñar un sistema mecatrónico para un bastón robótico tipo uniclo para el proyecto de investigación generativa desarrollado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

1.4 Objetivos Específicos

- a. Investigar los dispositivos de ayuda adaptados electrónicamente sobre dispositivos convencionales y seleccionar las ideas principales para utilizarlas en el bastón robótico.
- b. Diseñar un sistema que posibilite la locomoción y manipulación de un bastón robótico que garantice la estabilidad y confiabilidad en su desempeño.
- c. Realizar el diseño del sistema en software que permita seleccionar los materiales y accesorios adecuados para la implementación del sistema del bastón robótico.
- d. Construir la estructura del bastón robótico y realizar el montaje de sus componentes de acuerdo con el diseño implementado.
- e. Realizar el diseño e implementación de placas electrónicas; además de la instrumentación del dispositivo que permita adquirir y enviar información del dispositivo que permitan dar mayor autonomía al bastón para su funcionamiento.
- f. Realizar evaluaciones experimentales en entornos parcialmente estructurados ejecutando actividades básicas de movimientos y pruebas de carga.

1.5 Alcance

La ejecución de la investigación está encaminada a contribuir con el diseño de un sistema mecatrónico tipo bastón acoplado a una plataforma de tracción diferencial que facilite la movilización de las personas con deficiencia motriz dándoles un sistema de asistencia para brindar apoyo a la marcha, además que este dispositivo interactúe de manera amigable y segura con el usuario dándole la seguridad necesaria para movilizarse.

Se busca promover proyectos que beneficien a las personas más necesitadas y vulnerables por lo que nace la idea de trabajar con las personas discapacitadas, dentro de este contexto esta propuesta se enfoca en la construcción e instrumentación de un bastón robótico tipo unicycle el

mismo que sea capaz de dar una mejor calidad de vida a personas que tenga alguna deficiencia motriz que les impida moverse con libertad, al mismo tiempo ayudar en el área de rehabilitación con datos muy útiles para dar un diagnóstico y analizar la marcha del usuario y de su progreso.

Asimismo, la construcción del bastón robótico está enfocada como el primer paso de un proyecto más ambicioso que pueda ser utilizado tanto en actividades de docencia y en actividades de investigación científica las cuales están centradas en tres aspectos importantes, el primero está orientado para la guía del ser humano (no videntes) con la inclusión de un sistema de detección de obstáculos y un algoritmo de control para el seguimiento de trayectorias; el segundo aspecto para la rehabilitación dentro del área de la fisioterapia permitiendo la toma de información y datos estadísticos gracias a la inclusión de sensores con el fin de analizar la marcha asistida y optimizar el proceso de recuperación funcional de pacientes que sufren de una lesión de miembro inferior, que proporcionen datos útiles para el profesional a cargo de la recuperación. Por último, la maniobrabilidad creando un sistema de movilidad al bastón que permita comprender la intención de movimiento del usuario. (Ver Figura 1).



Figura 1. Interacción Humano Robot - Principales aplicaciones

Fuente: (Di & Huang, 2011)

1.6 Importancia

La importancia de la presente investigación se enmarca en los siguientes puntos:

- El apoyo a la marcha que un bastón robotizado puede generar a las personas.
- La confianza que podría adquirir el usuario para desplazarse con seguridad debido a que contará con el respaldo de un dispositivo.
- Crear un nuevo dispositivo de ayuda para la movilidad que tenga la suficiente autonomía e interactúe con él usuario.
- La inclusión de sensores en el bastón que permita la adquisición de información importante para una rehabilitación como: el porcentaje de peso aplicado al bastón, velocidad y datos que puedan ser analizados posteriormente y utilizados por un profesional.
- El uso inadecuado de los bastones, tanto con uno como con dos, presenta varios problemas desde el punto de vista biomecánico. Una marcha asistida ineficaz o inadecuada puede derivar en complicaciones o secuelas en miembro inferior, así como dolor en raquis, hombro y mano que, relacionadas con la discapacidad, pueden ser de significativa gravedad para el paciente retrasando su recuperación e influyendo en su independencia durante la deambulación y actividades de la vida diaria.

1.7 Discapacidades

1.7.1 Introducción

Según el Informe Mundial sobre la Discapacidad (OMS y BM, 2011): Se estima que más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad; es decir, alrededor del 15% de la población mundial. El número de personas con discapacidad está creciendo cada vez más, debido principalmente al envejecimiento de la población, las personas ancianas tienen un mayor riesgo de discapacidad y un incremento de los problemas crónicos de salud asociados a discapacidad, como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y los trastornos mentales. Se estima que las

enfermedades crónicas representan el 66,5% de todos los años vividos con discapacidad en los países con ingresos bajos y medianos.

1.7.2 Antecedentes de Discapacidad en el Ecuador

El CONADIS ha sido el ente rector de políticas en discapacidad y articulador de todos los sectores de la comunidad para desarrollar acciones sobre: prevención, atención e integración, con el propósito de prevenir las discapacidades y elevar la calidad de vida de las personas con discapacidad Plan Nacional de Discapacidades (2005).

El 25 de septiembre de 2012, se publica la Ley Orgánica de Discapacidad, normativa que asegura la prevención, detección oportuna, habilitación y rehabilitación de la discapacidad y garantizar la plena vigencia, difusión y ejercicio de los derechos de las personas con discapacidad.

En mayo de 2013, se conforma la Secretaría Técnica de Discapacidades, con la finalidad de seguir adelante con la iniciativa del ex-Vicepresidente del Ecuador Lcdo. Lenin Moreno, referente a personas con discapacidad. De acuerdo con los datos más actuales proporcionados por el CONADIS el 47,19% de personas con discapacidad registradas padecen de algún tipo de discapacidad física siendo este el de mayor porcentaje a nivel nacional. De acuerdo con el grado de discapacidad un porcentaje del 27,57% de personas tiene un grado moderado de discapacidad mientras que un 17,57% tienen un grado leve de discapacidad.

1.7.3 Trastornos de la Marcha y Disfunciones

a. Personas Mayores

Existen diversos tipos de afecciones a la movilidad humana de los cuales el más común que afecta en forma general a toda persona es el envejecimiento. La edad causa una serie de modificaciones en la capacidad física y principalmente en la marcha, actividad que realizamos

cotidianamente; entre las modificaciones tenemos la reducción de la longitud de cada paso y la velocidad de marcha. Es importante tener en cuenta las consecuencias de los trastornos de movilidad, por ejemplo, “una persona mayor con una marcha inestable tiende a limitar su actividad debido al miedo a las caídas. Esto implica un decrecimiento del tono muscular y de la fuerza que a su vez puede agravar enfermedades de fondo como la osteoporosis o la artritis.” (Neto, 2010)

El trastorno de la marcha se incrementa en la tercera edad. Los adultos mayores son especialmente sensibles a disminuir su capacidad locomotora, iniciando de esta forma un progresivo deterioro del estado de funcionalidad física, psíquica y social. A los 60 años, un 15% de los individuos presentan alteraciones en la marcha, 35% a los 70 años y aumenta hasta cerca del 50% en los mayores de 85 años.

b. Tipos principales de marcha patológica

Con frecuencia, los pacientes que sufren lesiones en algún miembro inferior requieren bastones para descargar parcialmente el peso. Estas lesiones causan dolor en la descarga de las extremidades inferiores y su progresión debe controlarse objetivamente para evitar errores significativos en la precisión y, en consecuencia, las complicaciones y los efectos posteriores en las lesiones.

Hay enfermedades ligadas a los trastornos de marcha, que puede alterarse como consecuencia de disminución de la fuerza muscular, alteración de la coordinación, causas funcionales y combinaciones entre ellas. Entre algunas de las alteraciones más comunes se puede mencionar:

- **Marcha balanceante.** - También llamada "de pato o ánade", aparece cuando existe déficit de fuerza (Paresia) de los músculos de la cintura pélvica. Al fallar la sujeción de la pelvis, que cae del lado del miembro dinámico, este tipo de marcha se caracteriza porque produce un balanceo lateral del tronco exagerado, acompañado de elevación de la cadera.

- **Marcha en stepagge.** - Se caracteriza porque el paciente muestra una dificultad para realizar la flexión dorsal del pie, por lo que para realizar la marcha la pierna se flexiona y eleva exageradamente la rodilla para evitar que la punta del pie arrastre y tropiece en el suelo. Y el apoyo no se realiza con el talón sino con la punta o la planta del pie. (Cerda, 2016).
- **Marcha atáxica.** - Aparece como consecuencia de la lesión de los cordones posteriores, es una marcha inestable y poco coordinada es decir sin orden, es un síntoma o enfermedad que se caracteriza por provocar la disminución de la capacidad de coordinar movimientos. Este tipo de marcha está presente en enfermedades como la esclerosis múltiple, las enfermedades en la columna, etc.
- **Marcha espástica.** - Es una de las manifestaciones más frecuentes del síndrome piramidal, descrita como una sensación de resistencia aumentada a la movilización pasiva, originada en diversos sitios de la vía piramidal. Hay caminar rígido, cuando ambas piernas se encuentran espásticas producen una "marcha en tijera".



Figura 2. Marcha en Tijera

- **Marcha antiálgica.** - Cuando la marcha provoca dolor en un miembro, el apoyo sobre el mismo se reduce, proyectando rápida y vigorosamente el miembro sano, que aumenta su tiempo de apoyo.

1.8 Estudio de ayudas para la movilidad

Existen elementos independientes o externos que se utilizan como apoyo y ayuda a la movilidad como pueden ser los bastones, andadores y dispositivos guía. Estos dispositivos son ideales para ayudar a personas con problemas de equilibrio y para dar estabilidad o soporte parcial al usuario que los utiliza.

De acuerdo con (Frizera, 2010) “La selección de qué dispositivo usar pasa por la evaluación por parte del profesional de salud de: las funciones cognitivas, las capacidades de visión, las funciones vestibulares, la forma física, la fuerza en los miembros superiores y el entorno en el cual se ha de utilizar entre otros factores”.

1.8.1 Dispositivos de ayuda convencionales

Los bastones son dispositivos que comúnmente son usados para brindar soporte del usuario, están recomendados ampliamente para usuarios con problemas de equilibrio y así brindarles un apoyo parcial. Tradicionalmente, estos dispositivos son usados para el aumento de estabilidad durante la marcha patológica y rehabilitación de las personas debido a que un bastón puede prevenir o reducir las caídas en pacientes con desequilibrio.

Los andadores son una buena solución para ganar autonomía e independencia, debido a que cuenta con dos puntos de apoyo que brindan seguridad y estabilidad a personas con movilidad reducida, el problema con estos dispositivos son sus grandes dimensiones que dificultan su utilidad en espacios reducidos.



Figura 3. Bastón y andador

1.9 Parámetros para el uso de un bastón

1.9.1 Medidas antropométricas de una persona

El término antropometría según (Valero, E. 2011 antropometría) proviene del griego anthropos (hombre) y metrikos (medida) y trata del estudio cuantitativo de las características físicas del hombre.

La antropometría considera la medición de características físicas y funcionales del cuerpo humano, la antropometría estática tiene como principal objetivo conocer las dimensiones estáticas, aquellas que se toman con el cuerpo en una posición fija y determinada. Estas medidas dependen del país y región del habitante, es importante tener una altura adecuada para el uso correcto de un bastón; esta medida debe estar a la altura de la muñeca de la persona flexionada entre 5 y 10°.

De acuerdo a las medidas antropométricas de la población latinoamericana según (Ávila, Prado, & Gonzalez, 2007), determinadas estadísticamente para personas ancianas con edades comprendidas entre 60 y 90 años (Ver Figura 2), se puede establecer que la altura promedio desde el piso hasta la muñeca para una mujer Latinoamericana es de 744 mm, de la misma forma para un hombre la altura promedio es de 806 mm.

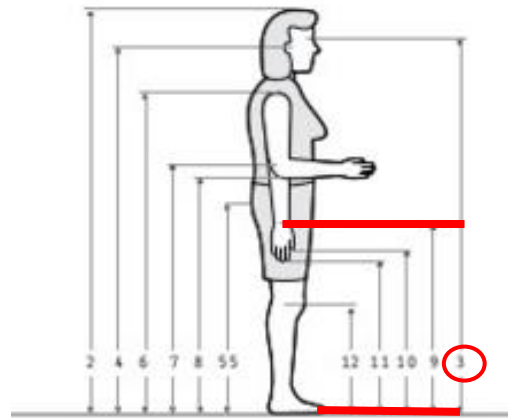


Figura 4. Ilustración de medidas antropométricas

Fuente: (Ávila, Prado, & Gonzalez, 2007)

1.9.2 Combinación de movimientos al caminar con bastón

Generalmente, una persona con una pierna afectada utiliza un bastón ordinario con el fin de reducir la carga aplicada a la pierna afectada. En este caso, cuando la persona usa el bastón correctamente, la carga aplicada a la pierna afectada se reduce de manera efectiva. (Nakagawa, 2014)

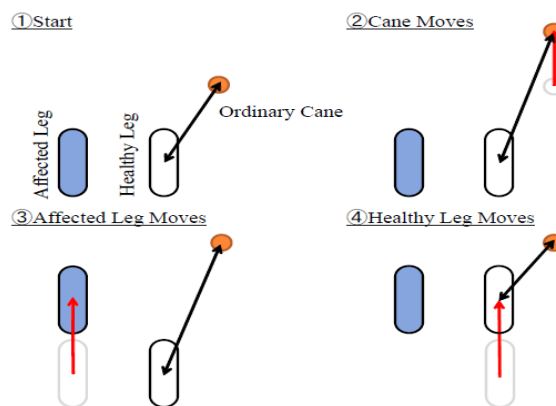


Figura 5. Fases de movimientos al caminar con bastón

Fuente: (Nakagawa, 2014)

De acuerdo con estudios relacionados con el análisis cinemático de la marcha humana, la forma de caminar de una persona con el bastón está comprendida en cuatro fases de movimiento (Ver Figura 3), en la primera fase, el usuario se coloca a la misma altura del bastón. En la segunda fase, el bastón se adelanta una distancia aproximada a un paso de la persona. En la tercera fase, la pierna afectada se mueve hacia adelante y avanza un paso; por último, en la cuarta fase, la pierna sana se mueve hacia delante un paso; y así la secuencia se repite.

Conforme a lo expuesto, la cuarta fase es la más crítica debido a que en esa posición una parte del peso de la persona se aplica al bastón, y como resultado, la carga aplicada a la pierna afectada se reduce por lo que hay que tomar mucho énfasis en esta etapa para medir la fuerza que debe soportar el dispositivo.

1.9.3 Parámetros espacio-temporales de la marcha humana

En esta sección se muestra un análisis de los parámetros de la marcha humana que son importantes para entender la forma de caminar y desplazarse de cada individuo. A continuación, se presenta algunos de los parámetros más importantes a conocer:

- Longitud de paso (LP) es la distancia horizontal en el plano de progresión desarrollada en un paso. En otras palabras, es la distancia medida en metros desde un determinado punto de un pie hasta el otro.
- Longitud de zancada (LZ) es la distancia en la dirección de avance entre el contacto inicial de un pie y el contacto inicial subsiguiente del mismo pie. Esta medida debería ser igual para los dos pies incluso en la presencia de asimetrías de marcha si el sujeto camina en línea recta.
- Cadencia (CAD). Es la medida del número de pasos por unidad de tiempo. Normalmente, es expresada en pasos por minuto [pasos/min].

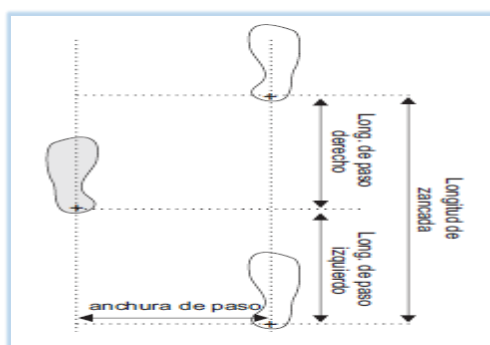


Figura 6. Parámetros de la marcha humana

Fuente: (Frizzera, 2010, pág. 45)


De acuerdo con el estudio realizado de la marcha humana (Frizzera, 2010), se presenta los datos referentes a las dos principales causas del cambio en la forma de caminar: la disminución del movimiento del centro de masas del tronco y la reducción en la velocidad de marcha al utilizar un tipo de ayuda ya sea un bastón o un andador.

La velocidad que se requiere en el sistema no puede estar en un rango muy alto ya que el robot necesita de un alto índice de precisión y que proporcione seguridad para los movimientos del usuario. Por lo tanto, el estudio mencionado se calcula la velocidad ideal estadísticamente comprobados como se muestra a continuación:

Tabla 1

Parámetros espacio-temporales de la marcha humana libre y asistida

Sujeto	Tipo Prueba	AP (altura)	LZ (altura)	CAD (pasos/min)	DAp_der (%ciclo)	DAp_izq (%ciclo)	Dpap (%ciclo)
1	Libre Andador	0,094	0,790	106,758	61,311	59,767	20,200
		0,088	0,697	84,371	63,011	62,422	24,389
2	Libre Andador	0,090	0,745	109,958	59,656	59,244	20,967
		0,085	0,666	80,453	59,856	60,567	21,656

CONTINÚA 

3	Libre Andador	0,083	0,807	103,166	59,800	61,580	21,300
		0,075	0,712	91,381	61,543	63,971	25,371
4	Libre Andador	0,121	0,799	105,036	62,160	62,560	24,380
		0,097	0,679	91,748	63,160	62,680	27,320
5	Libre Andador	0,092	0,756	101,014	61,286	60,657	22,000
		0,080	0,691	80,706	61,589	60,667	22,844
6	Libre Andador	0,084	0,773	112,030	57,711	59,400	17,744
		0,081	0,668	76,426	59,429	62,471	21,271
7	Libre Andador	0,085	0,707	101,237	60,433	61,744	21,744
		0,074	0,642	82,094	62,856	63,111	26,322
Media	Libre	0,093	0,768	105,600	60,337	60,708	21,191
		± 0,013	± 0,035	± 4,242	± 1,462	± 1,291	± 2,002
	Andador	0,083	0,679	83,883	61,635	62,270	24,168
		± 0,008	± 0,023	± 5,759	± 1,514	± 1,245	± 2,328
Relación	Andador/Libre	89,37%	88,42%	79,43%	102,15%	102,57%	114,05%

Fuente: (Frizera, 2010, pág. 23)

Utilizando la siguiente fórmula y tomando en cuenta los datos registrados (Ver Tabla 1) se puede obtener la velocidad requerida para el diseño de la plataforma de tracción.

$$V_{media} [m/s] = \frac{LZ[m] * CAD[pasos/min]}{120}$$

Ecuación 1
Velocidad Media

La velocidad media en Marcha la obtendremos con los datos más críticos mostrados en la tabla, tenemos:

$$V_{media} [m/s] = \frac{0.679[m] * 83.883[pasos/min]}{120} = 0.48 m/s$$

Debido a que el estudio actual es para personas de mediana estatura tomaremos los datos mínimos mostrados en la Tabla, lo cual nos da:

$$V_{media} [m/s] = \frac{0.656[m] * 78.124[pasos/min]}{120} = 0.42 m/s$$

Como se pudo observar tras varias mediciones y experimentos con diferentes personas se determinó que hay una clara reducción en los parámetros al caminar utilizando un andador, para el

caso de un bastón la velocidad se reduce aproximadamente un 10%, nos da un valor promedio de velocidad de 0.42 m/s para nuestra mayor facilidad de cálculo dentro de este proyecto.

1.9.4 Influencia de la carga aplicada sobre bastones

La marcha asistida es una de las áreas más importantes dentro de la Fisioterapia y biomecánica, el dispositivo más utilizado para brindar apoyo al caminar es el bastón, logrando así una marcha funcionalmente eficiente y biomecánicamente correcta.

Un parámetro esencial al utilizar un bastón es la cantidad de carga ejercida sobre él, que se lo determina según el tipo de lesión y de la evolución del usuario afectado. Sin embargo, el uso incorrecto al incumplir con el porcentaje de peso prescrito por el profesional de la salud a cargo de la rehabilitación puede provocar dolencias, modificaciones en el ritmo de caminata y la longitud del paso, alteraciones musculares, mala circulación sobre la pierna afectada, recaídas.

El mal uso del bastón puede provocar secuelas como disminución en el tono muscular, sobrecargas musculares en el miembro afectado, zona lumbar y en el trapecio superior; además de una desviación del centro de gravedad (marcha asimétrica).



Figura 7. Secuelas musculares

Fuente: (Ávila, Prado, & Gonzalez, 2007)

1.9.5 Fuerza aplicada a un bastón

Como se mencionó en el literal anterior la carga ejercida depende de la afección del usuario, pese a su importancia no existen estudios suficientes para establecer la progresión en las cargas adecuada que nos dé un valor real sobre éste parámetro..

De acuerdo con varios estudios sobre la carga óptima que se debe aplicar a un bastón, mencionan que: analizando la cinemática de la marcha asistida, al bastón se le debe aplicar como norma un 10% del total del peso corporal y como máximo este porcentaje no debe exceder una fuerza de reacción vertical de aproximadamente el 15%, una vez sobrepasado dicho valor el paciente no es capaz de mantener una marcha correcta y para ello se exige el empleo de dos bastones, es decir, una marcha bilateral.

Para analizar la carga necesaria al usar un bastón primero se necesita conocer el peso corporal del usuario, para lo cual se utiliza la siguiente expresión que se basa en el índice de masa corporal clasificando a la población por su peso:

$$\text{IMC} = \frac{W \text{ (kg)}}{L^2 \text{ (m}^2\text{)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Índice de Masa

Donde:

IMC = Índice de masa corporal [Kg/m²]

W = Peso del usuario

L = Longitud de la persona

De acuerdo con la Clasificación de la Organización mundial de la salud, tenemos la siguiente tabla para obtener el índice de masa corporal:

Tabla 2
Clasificación de IMC de acuerdo con la OMS

ÍNDICE MASA CORPORAL	CLASIFICACIÓN
<16.00	Infrapeso: Delgadez Severa
16.00 - 16.99	Infrapeso: Delgadez moderada
17.00 - 18.49	Infrapeso: Delgadez aceptable
18.50 - 24.99	Peso Normal
25.00 - 29.99	Sobrepeso
30.00 - 34.99	Obeso: Tipo I
35.00 - 40.00	Obeso: Tipo II
>40.00	Obeso: Tipo III

De acuerdo con datos estadísticos un gran porcentaje de la población en nuestro país se encuentran con sobrepeso por lo que usaremos un dato intermedio dentro de este rango para realizar los cálculos.

En un estudio realizado por la revista de investigación E-life, en conjunto con la Organización Mundial de la Salud (OMS), se investigó el crecimiento de la altura de la población mundial durante el último siglo. El Ecuador se ubica en el tercer lugar de los más pequeños de Sudamérica, tanto en hombres y mujeres. El sexo masculino tiene una altura promedio de 167,1 cm y el femenino de 154,2 cm. (Tiempo, 2016)

$$W = IMC * L^2$$

Ecuación 3

Peso en función de la masa

$$W = (27.5) * (1.67)^2 = 76.7 \text{ kgf} \approx 77 \text{ kg}$$

Obteniendo el 15 % del valor calculado, tenemos: $W_{\text{usuario}} = 11.56 \text{ kg}$

1.10 Adaptación de dispositivos de ayuda

Actualmente se han acoplado ayudas electrónicas a los dispositivos convencionales para la marcha asistida; utilizan sensores externos para la percepción del medio que los rodea, como por ejemplo sensores ultrasónicos y sensores láser para la detección de obstáculos, sensores de posicionamiento por medio de GPS para la ubicación del usuario, giroscopios para ver inclinación, sensores de fuerza para medir el peso aplicado; en fin varias alternativas que permitan brindar datos útiles para enviar al usuario algún tipo de señal de advertencia utilizando señales sonoras o táctiles; o con el fin de analizar y obtener datos respecto a la marcha para estudios dentro de áreas como la fisioterapia, biomecánica, ortopedia que buscan comprender de mejor manera al cuerpo humano.

1.10.1 Dispositivo robótico tipo bastón Guide Cane

En este trabajo se presenta un “dispositivo diseñado para ayudar a personas con deficiencia visual para navegar de forma segura y rápida entre obstáculos y otros peligros que enfrentan al momento de caminar”. (Borenstein, 1997)

Este dispositivo está en desarrollo por la Universidad de Michigan en el laboratorio de robótica móvil; el sistema cuenta con varios sensores ultrasónicos instalados alrededor del dispositivo y controlados por un computador, cuenta con servomotores y encoders en las dos ruedas. El dispositivo cuenta además con un joystick colocado en la empuñadura del bastión el cual se utilizará para indicar la intención del movimiento que tiene el usuario. Sin embargo, el dispositivo es semi-autónomo, ya que necesita la entrada del joystick de usuario para la planificación de trayectoria, además el dispositivo puede ser equipado con un sistema de navegación global GPS para el guiado en exteriores. Se debe mencionar que este dispositivo está

proyectado únicamente para ayudar en la navegación, de forma que no ofrece al usuario apoyo a la movilidad.



Figura 8. Dispositivo Guide Cane

Fuente: (Borenstein, 1997)

1.10.2 Dispositivo SMARTCANE

Este dispositivo fue creado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, que ayuda a guiar y apoyar al usuario, “Robotic personal aids for mobility and monitoring for the elderly” es un proyecto que posee un sensor de fuerza - par de tres dimensiones, capaz de medir los esfuerzos aplicados por el usuario en el plano de tres dimensiones (x, y, z); cuenta con un bastón convencional montado sobre un robot móvil.

Estas señales de entrada de fuerza son transformadas en información de velocidad y dirección por un sistema de control de impedancia implementado en un ordenador portátil. El controlador de impedancia permite que el sistema sea programado para tener una sensación distinta de guiado personalizada para cada usuario, y tener comportamientos distintos para situaciones diversas. El dispositivo incluye una cámara para localización en entornos estructurados y un sistema sonar para la detección de obstáculos.

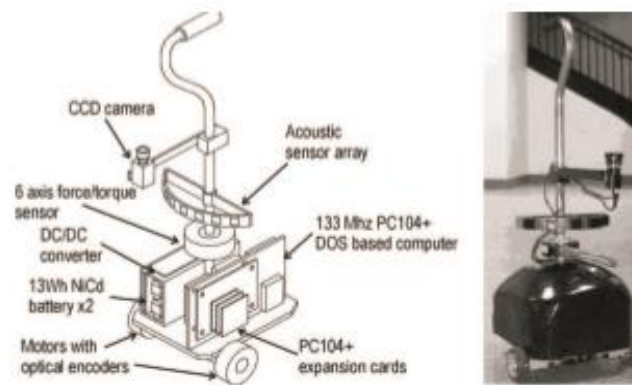


Figura 9. Dispositivo SmartCane

Fuente: (Matthew, Haoyong, & Dubowsky, 2006, pág. 345)

1.10.3 Bastón robótico omnidireccional basado en la Intención Humana

Este dispositivo consta de un robot omnidireccional de tres ruedas diseñado para ayudar a los ancianos a caminar, consta de tres ruedas omnidireccionales y actuadores que están especialmente diseñados para sistemas de andadores motrices. “A pesar de su reducido tamaño, la capacidad de carga de esta base móvil es de hasta 50 kilogramos”. (Huang, Fukuda, & Matsuno, 2008). Posee un telémetro láser que toma la distancia entre bastón y la rodilla del usuario, consta de un sensor de fuerza – par de seis ejes conectado como la interfaz de entrada para el control principal. En este proyecto se investiga diferentes modos de movimiento, se analizan y se construye un modelo híbrido para describir el comportamiento de la marcha humana. Un concepto llamado intención de dirección se presenta para denotar la intención de movimiento basados en experimentos y algunas suposiciones dinámicas.

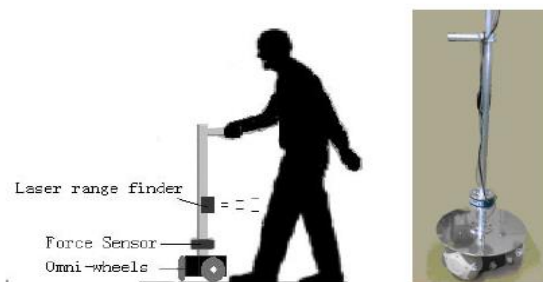


Figura 10. Bastón tipo omnidireccional

Fuente: (Huang, Fukuda, & Matsuno, 2008)

1.10.4 Andadores Inteligentes

Un andador es un dispositivo de ayuda física que busca brindar soporte al usuario a través de soluciones activas o pasivas. Pueden tener patas o ruedas y son empujadas por el usuario utilizando las manos o los antebrazos para guiar el dispositivo.

Estos aparatos son utilizados principalmente para la ayuda de personas mayores que padecen enfermedades que pueden ser físicas, cognitivas o sensoriales; por este motivo se han realizado varios proyectos de investigación con dichos dispositivos que posean nuevas características.

a. Andador Robotizado

Es un proyecto desarrollado por el Instituto de Automática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Juan destinado a la ayuda de personas con problemas de movilidad.

"El andador robotizado utiliza una luz láser y detectores de fuerza para registrar los movimientos de las piernas de la persona. Esto hace que el andador se anticipe a la intención de la persona para ayudarla en sus movimientos" (Valadao, 2015).

Este andador consta de varios sensores, un sistema de control y un sistema de tracción, posee un sensor láser, un sensor de fuerza para adquirir información, además muestra parámetros como la cadencia, velocidad, tiempo, fuerza utilizada, longitud de paso que son enviados a un software. La persona ejerce un poco de fuerza que le permite interactuar con el andador como soporte físico para desplazarse.



Figura 11. Andador Robotizado

Fuente: (Valadao, 2015, pág. 340)

b. Caminante inteligente VA-PAMAID

El VA-PAMAID fue desarrollado por el Dr. Gerard Lacey que realizó el prototipo de un andador, sus siglas quieren decir “Ayuda para la movilidad adaptativa personal de Veteranos”, este dispositivo está diseñado para proporcionar apoyo físico y asistencia a la navegación a personas con discapacidad visual.

Está basado en un andador convencional, un computador que controla los motores que guían las ruedas delanteras del andador. Además, cuenta con sensores láser y ultrasónicos montados alrededor del andador, estos sensores permiten identificar obstáculos tales como uniones y pasillos. El usuario controla el andador a través de un conjunto de manillas de resorte que están equipados con un codificador que detecta la dirección en la que el usuario desea viajar. Un segundo conjunto de codificadores ópticos se monta en las ruedas traseras y mide la distancia total recorrida por el dispositivo. (JRRD, 2003).

Consta de dos modos de control: manual, automático. En el modo manual, el usuario tiene el control del andador, la información detectada por los sensores se emite como mensajes de voz, describiendo puntos de referencia y detectando obstáculos. El usuario y el control accionan el andador en modo automático. El equipo utiliza motores conectados a las ruedas delanteras para dirigir el dispositivo.



Figura 12. Andador VA-PAMAID

Fuente: (Rentschler & Cooper, 2016)

c. Sistema mecatrónico de asistencia técnica para las personas de edad avanzada

En la Pontificia Universidad Católica de Perú se realizó un sistema mecatrónico de asistencia técnica para personas de edad avanzada que consiste básicamente en un andador inteligente que consta de varios subsistemas: alimentación, interfaz, control general, sensado de frecuencia cardiaca y posicionamiento, detección de desniveles, control de motor Tri-star y control de motor de frenado. (Lavado, 2015)

El subsistema está conformado por cuatro pulsadores cuya función es la de controlar la dirección de movimientos accionando las ruedas delanteras, ruedas posteriores, freno y giro del sistema en base al orden en que fueron presionados. Además, cuenta con interesante juego de ruedas que permite subir escaleras, veredas para mayor facilidad de movilidad.

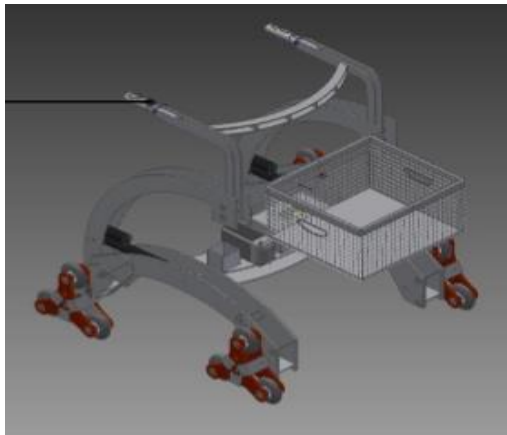


Figura 13. Andador inteligente

Fuente: (Lavado, 2015)

1.10.5 Diseño de un bastón robotizado para asistencia

Este dispositivo fue desarrollado por el Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan en Argentina. Este bastón robotizado se compone de tres partes principales, la parte superior la cual consta de una empuñadura y un sistema sensorial con sensores de fuerza flex para determinar la fuerza ejercida por el usuario; la parte media consta de la etapa de adaptación de señales de los sensores de fuerza, de un sensor de posición angular y de un sensor laser que serán utilizados para el control; la última parte consta de la plataforma móvil y del computador a bordo.

El sistema gracias a los sensores ubicados en la empuñadura puede medir las fuerzas tanto verticales como horizontales con el fin de determinar las intenciones de movimiento del usuario indicando al bastón cuando avanzar, cuando frenar o la dirección a la que se desea desplazar.

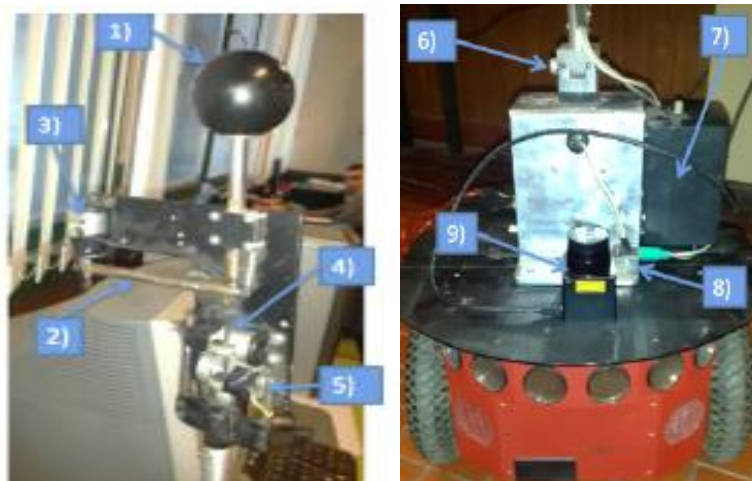


Figura 14. Bastón robotizado para asistencia

Fuente: (Monllor, 2015)

1.10.6 Diseño de un prototipo de asistencia Walker

El propósito de esta investigación fue desarrollar un dispositivo de asistencia Walker utilizando la información háptica de la mano. A fin de que realizar el reconocimiento medioambiental activa del usuario, la propuesta sistema tiene actuadores pasivos, el sistema es algo así como un bastón, y tiene una pequeña plataforma móvil que está equipado con algunas ruedas y genera fuerzas de frenado. Y la fuerza generada es transmitida a la mano del usuario a través de la empuñadura unida al caminante.



Figura 15. Asistente Walker

1.11 Robot paralelo

“Un robot paralelo generalizado es un mecanismo de cadenas cinemáticas en lazo cerrado, cuyo efector final es unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes” (Merlet, 2006). Por el simple hecho de ser mecanismos de cadena cerrada, los manipuladores paralelos tienen un elemento móvil unido a un elemento fijo por varias cadenas cinemáticas. Esto hace que este tipo de robots posean unas características considerablemente diferentes a las de los robots serie, de las cuales se puede mencionar:

- Presentan espacios de trabajo bastante más reducidos que los robots serie de dimensiones semejantes, debido a su propia estructura cinemática.
- Sometidos a una determinada carga sobre su elemento terminal, este tipo de robots son considerablemente rígidos, incluso a pesar de poseer una masa considerablemente inferior debido a que la carga será soportada por varias cadenas simultáneamente.
- Debido a que pueden soportar cargas relativamente grandes con masas relativamente pequeñas, podrán realizar movimientos a velocidades y aceleraciones elevadas.

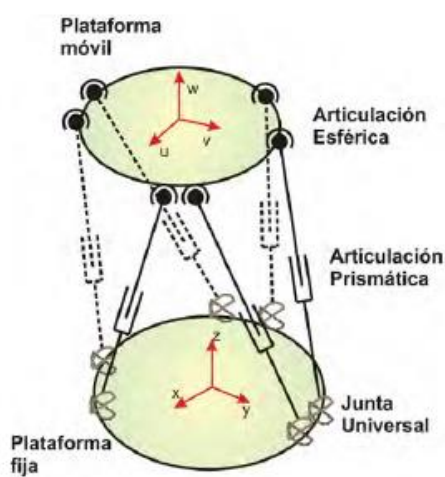


Figura 16. Robot paralelo

1.12 Plataformas Móviles

Un robot móvil es un robot que contiene todo lo necesario para su pilotaje y movimiento (potencia, control y sistema de navegación). (Barrientos, Penín, Balaguer, & Aracil, 2007). La plataforma debe cumplir con la función del desplazamiento, debe trasladarse a la posición que se asigna. Por lo tanto, tiene que trazar el camino, que lleve a la plataforma móvil a la postura que permita cumplir con la tarea.

Se desplazan generalmente mediante ruedas que tienen aplicaciones en rastreo y traslado de objetos, la combinación de diversos tipos de ruedas lleva a tener una gran variedad de robots móviles que se diferencian por su grado de maniobrabilidad. “Los robots móviles son uno de los objetos de investigación más comunes dentro de la comunidad científica, debido a la versatilidad y utilidad para diferentes aplicaciones”. (Jones, Flynn, & Seiger, 2010).

Se puede mencionar dentro de las plataformas aspectos como cinemática, percepción, localización en un ambiente, entre otros. Por tal motivo, un robot móvil es considerado como un autómatas capaz de desplazarse en un ambiente al que se le puede adquirir las características mencionadas. Un robot móvil debe poseer además la habilidad de navegar en el espacio establecido evitando situaciones de colisión con objetos estáticos o móviles.

1.12.1 Plataformas móviles unicycle

Una plataforma móvil unicycle se constituye básicamente por una estructura mecánica con dos ruedas fijas convencionales sobre el mismo eje, acopladas a motores independientes y una rueda de estabilización (rueda loca) que mantienen el balance del robot, permitiéndole navegar a través de un determinado ambiente de trabajo de forma autónoma. Dicha autonomía se refiere a la

capacidad de percibir, planificar y actuar sin la intervención del operador humano para alcanzar determinados objetivos.

Este tipo de plataformas son elegidas generalmente por los investigadores a la hora de probar nuevas estrategias de control por tener cinemática sencilla. (Andaluz, 2011)

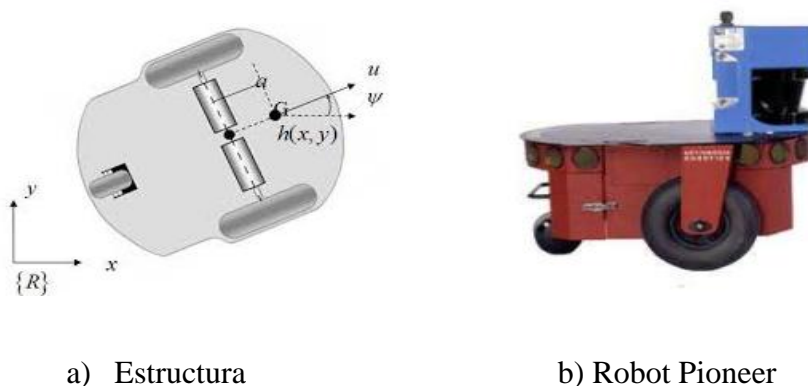


Figura 17. Robot Pioneer

Fuente: (Pioneer, 2015)

1.12.2 Modelo cinemático del robot unicycle

Un robot unicycle es un robot móvil dirigido diferencialmente. Estos robots poseen la ventaja de una alta movilidad, alta tracción al usar dos llantas neumáticas. El movimiento de un robot unicycle a lo largo de una superficie plana es descrito con el vector de postura que consiste en las coordenadas de su posición (x, y) y la posición angular (Θ) .

En este tipo de locomoción no existe la presencia de ruedas directrices y el cambio de dirección se logra al modificar la velocidad relativa de las ruedas izquierda y derecha del robot móvil. La rotación del robot se da alrededor del punto de contacto del eje común de las ruedas de tracción, en donde su trayectoria estará dada por las velocidades relativas de cada una de las ruedas.

La configuración de tracción diferencial de la que dispone el robot unicycle se refiere al uso de velocidades independientes en cada llanta, izquierda y derecha (v_L y v_R) respectivamente, para moverse en un plano a un punto en específico (x, y) y una orientación específica (θ). Como se muestra en la figura.

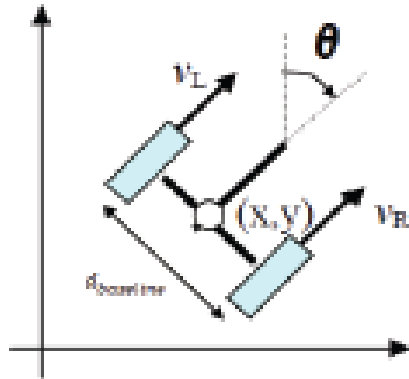


Figura 18. Robot unicycle: Configuración diferencial

Para esta configuración ω_L y ω_R corresponden a las velocidades angulares tanto de la rueda izquierda como de la derecha. Dado el radio de las ruedas (r), la correspondiente velocidad lineal (v) y velocidad angular (ω) del robot están dadas por:

$$\mathbf{v} = \frac{\omega_R + \omega_L}{2} * r \quad \text{Ecuación 4}$$

Velocidad Lineal

$$\omega = \frac{\omega_R - \omega_L}{d_{baseline}} * r \quad \text{Ecuación 5}$$

Velocidad Angular

Donde el $d_{baseline}$ es la separación entre las dos ruedas. De igual forma, si se tiene tanto la velocidad lineal como la velocidad angular del robot, la velocidad angular de cada una de sus ruedas se las puede calcular usando las ecuaciones.

1.13 Sensores

1.13.1 Definición

Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, magnetismo, presión, etc.) en valores medibles de dicha magnitud. Esto se realiza en tres fases: Un fenómeno físico a ser medido es captado por un sensor, y muestra en su salida una señal eléctrica, la señal eléctrica es modificada por un sistema de acondicionamiento de señal y por último se amplifica la tensión de salida.

Según (Angulo, 2005) los sensores o también considerados como captadores de estímulos, estos son necesarios ya que proporcionan la información necesaria acerca del estado en que se encuentran, también brindan la facilidad para que un robot pueda cumplir con sus tareas determinadas puesto que permiten realizar el control de posición, velocidad e inteligencia según el caso.

1.13.2 Encoders de cuadratura

Un encoder es un sensor capaz de convertir el movimiento de un dispositivo en trenes de pulso a fin de medir las siguientes variables: desplazamiento, dirección y posición de acuerdo con las capacidades de su tecnología.

Los encoder se clasifican en dos categorías: encoders incrementales que detectan cambios en la rotación a partir de una posición de datos y encoders absolutos que proporcionan la posición angular real.

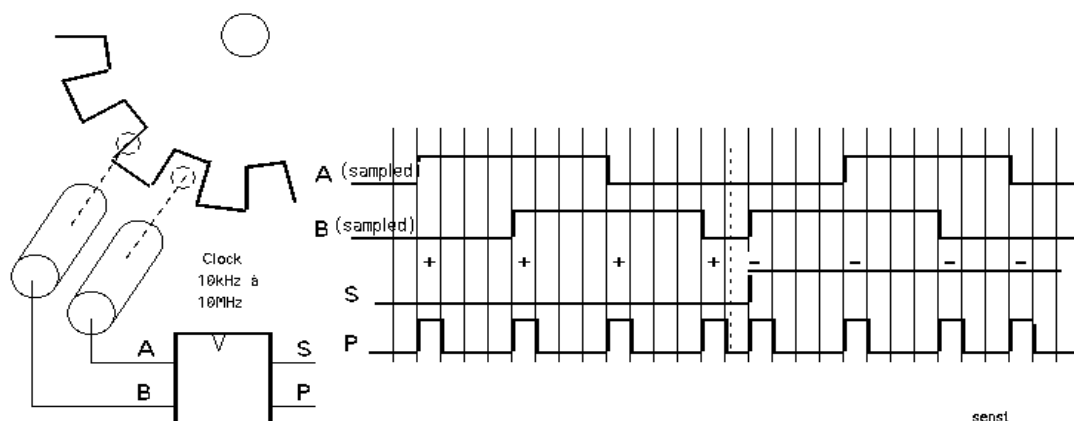


Figura 19. Encoder de cuadratura

Fuente: (DIDEL, 2015)

1.13.3 Celdas de carga

Una celda o célula de carga, es un transductor que convierte la fuerza mecánica en señales eléctricas. Existen tipos diferentes de células de carga que operan de formas diferentes, pero la célula de carga más comúnmente utilizada es la galga extensométrica. Como su nombre implica, las celdas de carga, mediante galgas extensométricas utilizan una matriz de galgas para medir la deformación de un componente de una estructura y convertirla en una señal eléctrica.



Figura 20. Celda de Carga Unipunto

Fuente: (TotalWeight, 2018)

Celda de carga tipo unipunto Las celdas de carga tipo un punto están diseñadas para soportar cargas a compresión, puede manejar capacidades desde los 2 kg, su diseño otorga un mejor pesaje, ya que permite colocar una plataforma de peso que puede ser fijada a la celda de carga directamente, dando lugar a un pesaje directo, este tipo de celdas son muy utilizadas en el campo

industrial por su versatilidad y la gran gama de capacidades que este ofrece, su señal de salida es mV por lo que se requiere de una etapa amplificadora.

1.14 Actuadores

1.14.1 Definición

Actuadores son elementos de un sistema que lo conectan con su entorno físico, excluido el usuario. La función de los actuadores es realizar una acción mecánica en respuesta a una señal de entrada, que en el caso de los actuadores eléctricos es eléctrica, pero que puede ser también neumática (Pallas, 1993).

1.14.2 Actuador lineal

Un actuador lineal eléctrico es un dispositivo que convierte el movimiento de rotación de un motor de corriente continua de baja tensión en movimiento lineal, es decir, los movimientos de empuje y halado. (LINAK, 2016)

El L16-P es una versión a escala de la L12-P con un motor más grande para una mayor velocidad y cargas más pesadas. Las opciones estándar incluyen: tres longitudes de carrera y tres combinaciones de velocidad / fuerza (relaciones de transmisión). Cada actuador tiene un potenciómetro lineal interno que proporciona retroalimentación de posición.



Figura 21. Actuador lineal

Fuente: (Actuonix, 2018)

1.14.3 Motorreductor de corriente continua DC

El principio de funcionamiento de los motores eléctricos de corriente directa o continua se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán permanente cuando, de acuerdo con la Ley de Lorentz, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje. Este electroimán se denomina “rotor” y su eje le permite girar libremente entre los polos magnéticos norte y sur del imán permanente situado dentro de la carcasa o cuerpo del motor.

1.15 Controladores

1.15.1 Raspberry PI modelo B

Es un ordenador de placa reducida, computador de placa única o computador de placa simple (SBC) de bajo coste desarrollado en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas. Su bajo coste

Es muy fácil de usar, Está basado en código abierto de Linux, lo que significa que puede tener acceso a software y descargas gratuitas que le ayudarán con su proyecto.



Figura 22. Raspberry PI modelo B

1.15.2 Familia de microcontroladores ARM CORTEX – M

Son microcontroladores diseñados por ARM Holdings los cuales ofrecen características de alto desempeño., esta empresa vende licencias para fabricación de circuitos integrados a empresas tales como ST, Atmel, Texas Instruments entre otras.

Los microcontroladores de este tipo tienen una arquitectura de 32 bit RISC (Reduced Instruction Set Computing) la cual se basa en emplear pocas instrucciones.

Existen varias ventajas de los microcontroladores ARM Cortex respecto a los de 16 bits como PIC o Atmega de todas las gamas, entre las cuales se puede mencionar;

- ARM Cortex es de 32 bits permitiendo el manejo de datos de mayor longitud como el entero corto y largo, números flotantes de simple precisión y doble precisión.
- Una arquitectura de 32 bits puede realizar operaciones lógicas y aritméticas ya sea de 8, 16 o 30 bits de manera directa que le permite tener mayor velocidad de procesamiento respecto a microcontroladores de 8 bits.

1.15.3 Microcontroladores STM32

La familia STM32 de microcontroladores flash de 32 bits basado en el procesador ARM ® Cortex® -M está diseñado para ofrecer nuevos grados de libertad para los usuarios de MCU. Ofrece una gama de productos de 32 bits que combina muy alto rendimiento, capacidades en tiempo real, procesamiento de señales digitales, y bajo consumo de energía, operación de baja tensión, mientras se mantiene la plena integración y facilidad de desarrollo.

La gama sin igual y gran cantidad de dispositivos STM32, basado en un núcleo estándar de la industria y acompañada de una amplia selección de herramientas y software, hace que esta familia de productos de la elección ideal, tanto para pequeños proyectos y grandes aplicaciones.



Figura 23. Microcontrolador STM32

Fuente: (MouserElectronics, 2018)

1.15.4 Tarjeta Discovery STM32F407

STM32F3DISCOVERY es una tarjeta de desarrollo construida con el microcontrolador stm32F303VCT6 de 32 bits ARM Cortex M4, cuenta con una gran cantidad de pines disponibles al usuario. Sobre la base de la tarjeta cuenta a más del microcontrolador con la herramienta de depuración incrustado ST-LINK / V2, acelerómetro, giroscopio y brújula electrónica ST MEMS, conexión USB, LEDs y pulsadores.

Características principales

- Microcontrolador STM32F407VCT6 con 256 KB Flash, 48 KB de RAM en un paquete LQFP100.
- A bordo ST-LINK / V2 con interruptor de modo de selección para utilizar el kit como autónomo ST-LINK / V2 (con conector SWD para la programación y depuración).
- Fuente de alimentación de tarjeta: a través del bus USB o desde una tensión externa 3 V o 5 V de alimentación.
- L3GD20 ST MEMS sensor de movimiento de 3 ejes de salida digital giroscopio.
- LSM303DLHC, ST MEMS sistema-en paquete que ofrece un sensor lineal digital en 3D

aceleración y un sensor magnético digital en 3D.

- Dos pulsadores (Usuario y Reajuste).
- USB de usuario con conector Mini-B.
- Diez LEDs: LD1 (rojo) de 3,3 V de encendido, LD2 (rojo/verde) para la comunicación USB. Ocho, LEDs de usuario de varios colores.

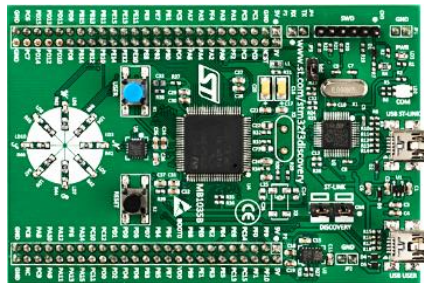


Figura 24. STM32F3 Discovery
Fuente: (Mechatronics S. , 2015)

Se considera de mucha importancia difundir en el ámbito académico y profesional las tecnologías RISC de última generación como lo es la familia de Microcontroladores Cortex-M de 32 bits, creados por ARM.

VENTAJAS

- Mayor capacidad de cómputo.
- Mayor capacidad de memoria.
- Mayor velocidad de operación.
- Amplio rango de periféricos.
- Herramientas de desarrollo flexibles y modernas.

- Bibliotecas de funciones que pueden operar entre diferentes procesadores.
- Costos de implementación similares, en comparación con procesadores de 8 o 16 bits

1.15.5 STM32CubeMX

STM32CubeMX es original de STMicroelectronicsSTMCube™ iniciativa que se origina para facilitar la vida a los desarrolladores mediante la reducción de esfuerzos de desarrollo, tiempo y costo.

STM32Cube incluye el STM32CubeMX que es una herramienta de configuración de software gráfico que permite la generación de código C de inicialización utilizando asistentes gráficos.

También incorpora una plataforma de software completa, entregado por serie (como STM32CubeF4 para la serie STM32F4). Esta plataforma incluye la STM32Cube HAL (un software integrado STM32 capa de abstracción, lo que garantiza la portabilidad maximizada a través del portafolio STM32), además de un conjunto coherente de componentes de middleware (RTOS, USB, TCP / IP y gráficos). Todos los servicios de software embebido vienen con un conjunto completo de ejemplos.

STM32CubeMX es una extensión de la herramienta MicroXplorer existente. Es una herramienta gráfica que permite configurar los microcontroladores STM32 muy fácilmente y generar el código de inicialización C correspondiente a través de un proceso paso a paso.

El primer paso consiste en seleccionar el microcontrolador STMicroelectronics STM32 que coincide con el conjunto necesario de los periféricos.

El usuario debe configurar el controlador de cada integrado y gracias a un programa de solución Pinout se facilita el proceso, tiene un entorno ayudante reloj-árbol, una calculadora de consumo de energía, y una utilidad para realizar la configuración de la periférica (GPIO, USART,) y las pilas

de middleware (USB, TCP / IP).

Finalmente, el usuario inicia la generación del código de inicialización C basado en la configuración seleccionada. Este código está listo para ser utilizado dentro de varios entornos de desarrollo. El código de usuario se mantiene en la próxima generación de código.

Características principales

- Selección intuitiva del microcontrolador STM32
- Configuración gráfica del microcontrolador:
- Pinout con resolución automática de conflictos
- Árbol de reloj con validación dinámica de configuración
- Modalidades funcionales de periféricos y middleware e inicialización con validación dinámica de restricciones de parámetros
- Generación de proyectos de código C que cubre la inicialización del microcontrolador STM32 que cumple con los compiladores IAR TM, Keil® y GCC.
- Disponible como un software independiente que se ejecuta en los sistemas operativos Windows, Linux y macOS mediante el complemento Eclipse.

1.15.6 System Workbench para STM32

Se trata de un entorno de desarrollo de software multi-OS gratuito basado en Eclipse, que admite toda la gama de microcontroladores STM32 y placas asociadas.

Características principales

- Soporte completo para microcontroladores STM32, placas Nucleo STM32, kits de descubrimiento y placas de evaluación, así como firmware STM32.
- Compilador GCC C / C ++

- Depurador basado en GDB.
- Eclipse IDE con gestión de trabajo en equipo
- Compatible con los complementos de Eclipse
- Soporte ST-LINK
- Compatibilidad con varios sistemas operativos: Windows®, Linux y OS^{X®}

1.15.7 Módulo Bluetooth HC-05

Bluetooth es una conexión inalámbrica muy aceptada dentro de la comunidad científica que permite la transferencia de archivos y la comunicación entre dispositivos, es muy adaptable en la mayoría de las aplicaciones por lo que incluso casi todos los teléfonos celulares de gama media en adelante cuentan con un periférico de este tipo.

Es una pequeña tarjeta que sirve para comunicarse por medio de Bluetooth con otro dispositivo, el HC05 tiene la particularidad de ser máster/esclavo, el módulo viene configurado de fábrica para trabajar en modo maestro, algunos modelos cuentan con un botón, el cual al mantenerlo presionado por un pequeño lapso nos permite comunicarnos con el módulo por comando AT para poder cambiar los parámetros que deseemos.

El módulo Bluetooth HC-05 utiliza el protocolo UART RS 232 serial.

Características

- Compatible con el protocolo Bluetooth V2.0.
- Voltaje de alimentación: 3.3VDC – 6VDC.
- Voltaje de operación: 3.3VDC.
- Baudrate ajustable: 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200.

- Tamaño: 1.73 in x 0.63 in x 0.28 in (4.4 cm x 1.6 cm x 0.7 cm)
- Corriente de operación: < 40 mA
- Corriente modo sleep: < 1mA



Figura 25. Módulo Bluetooth HC-05

Fuente: (Mechatronics, 2017)

1.16 App Inventor

Es un entorno de desarrollo de software desarrollado por Google Labs para con el objetivo de elaborar aplicaciones dentro del sistema operativo Android. El usuario puede, de forma visual y a partir de un conjunto de herramientas básicas y avanzadas ir creando bloques y enlazarlos para crear una determinada aplicación. El sistema es gratuito y se puede descargar fácilmente de la web, permitiendo obtener una forma fácil de realizar HMI aplicadas dentro de la electrónica o robótica como un método de control.

Gracias a App Inventor ahora es una realidad que cualquiera programe sus propias funcionalidades en su smartphone e incluso como ya hemos mencionado en su propia computadora gracias a Android para computadores. (Moviles, 2017)

CAPÍTULO II

DISEÑO MECANICO

2.1 Parámetros de Diseño

En este capítulo se detallará el diseño mecánico del bastón robótico que se lo realiza utilizando el software de diseño asistido por computador Solidworks, para su posterior construcción; para iniciar el diseño se establece los requisitos de diseño y condiciones que el usuario necesita para aplicarlas al dispositivo móvil, posteriormente se realiza un análisis de las principales fuerzas y cargas que intervienen en el sistema lo que permitirá una adecuada selección de los materiales y componentes, utilizando una evaluación de parámetros y cálculos matemáticos que permitan asegurar un diseño válido. Por último, se corrigen los posibles errores se establece el diseño final y se procede con la construcción y ensamblaje.

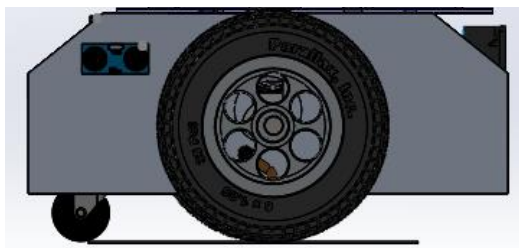


Figura 26. Esquema del prototipo

Para que el dispositivo actúe de la manera deseada existen varias consideraciones que se deben tomar en cuenta para que su funcionamiento sea óptimo y que no cause problemas al usuario.

Para considerar la seguridad de los usuarios, la mayoría de los dispositivos tipo andador robóticos que se mostraron en el capítulo 1 son de gran tamaño y sus funciones se limitan para ambientes interiores, es decir está restringido dentro de lugares limitados; el tamaño de los

dispositivos hace que sea imposible utilizarlos en espacios estrechos, además su peso dificulta la capacidad de movimiento que pueda tener el usuario al usar el dispositivo.


De acuerdo con (Monllor, 2015) en su publicación establece que “Los dispositivos más comúnmente usados como apoyo a la marcha debido entre otras cosas a su mayor aceptación psicológica, son los bastones”., además, gran parte de las personas solo requieren asistencia moderada y un apoyo mínimo con un bastón.

Por las razones antes mencionadas se pone a consideración los principales requerimientos q necesitará tener el dispositivo y atender a cada uno de ellos al momento de la construcción del prototipo que permita mejorar la calidad de vida y acelerar la rehabilitación de personas con discapacidad motriz moderada que usen el bastón.

Tabla 3

Requerimientos para el diseño

Requerimiento	Definición
Peso Máximo de la Plataforma	Los materiales utilizados deben ser resistentes y de un peso relativamente bajo. El peso total debe ser menor a 15 kg.
Modular	Los elementos que conforman el prototipo deben ser desmontables y fáciles de colocar.
Estabilidad	En este trabajo se busca una forma de asegurar la estabilidad del bastón y dotarlo de una gran movilidad.

CONTINÚA 

Capacidad de Carga	Debe soportar máximo el 15% del peso corporal del usuario al aplicar fuerza en el bastón. El bastón puede ser utilizado para personas de 77 kg que nos da una carga máxima de 11.56 kg.
Velocidad	Tracción diferencial, debe constar con motores con la potencia suficiente para dar el movimiento a la plataforma con una velocidad de 0.48 m/s.
Sensorización	Debe contar con Sensores internos y externos que ayuden a darle autonomía al dispositivo. Deben ser sensores pequeños y compatibles.
Altura máxima	Es de suma importancia una buena postura para caminar con el bastón; debido a la amplia gama de alturas en los individuos. El rango mínimo es 744 mm al máximo de 806 mm.
Dimensiones máximas	El dispositivo debe medir como máximo 50 cm de largo y 40 cm de ancho.
Control	El control debe ser lo más practico posible y reducido ya que el espacio del dispositivo es muy pequeño por lo cual se necesita la mayor simplicidad posible. Dimensiones máximas de 20*20 cm

2.2 Determinación de Cargas

El bastón robótico unicycle debe permitir la locomoción a una determinada velocidad, además la estructura debe ser capaz de soportar su propio peso y el peso extra de la persona la cual se apoya para caminar. Además, el bastón debe poseer movimiento para la maniobrabilidad del usuario. Debido a lo anteriormente expuesto el diseño lo dividiremos en dos partes para su mejor

análisis, ya que cada uno de ellos actuará de forma independiente, estos son: la plataforma móvil y el sistema mecánico para el movimiento del bastón.

2.2.1 Diseño Mecánico de la plataforma móvil

El objetivo principal de la plataforma móvil es permitir el desplazamiento del dispositivo junto al usuario que se encuentra caminando de forma activa, para lo cual se contará con un vehículo unicycle con tracción diferencial que permita el desplazamiento por medio de dos ruedas acopladas a motores DC ya que son los más adecuados en robótica por su bajo costo y buenas prestaciones para el control.

a. Cálculo de la potencia del motor

Es necesario realizar conocer todas las fuerzas que intervienen para el movimiento para la plataforma. La potencia requerida de los motores está determinada por la carga a la que estará sometida la plataforma, por lo que debe tomar en cuenta el peso de la estructura, la carga externa que en este caso sería el peso que ejerce la persona al apoyarse al dispositivo. Se muestra un análisis de fuerzas en las condiciones más críticas que deberá soportar el motor y requerirá de mayor potencia, esto se tendría en superficies inclinadas tomando un ángulo de 15 grados como máximo.

Factor de carga: Este factor asegura que el diseño soporte cargas que no fueron consideradas o cargas que se puedan presentar por cualquier circunstancia ajena a las que ya fueron asumidas. El valor considerado será del 10%.

Masa plataforma: $M_p = 6 \text{ kg}$

Masa extra (usuario): $M_{ex} = 10 \text{ kg}$

Masa bastón: $M_b = 0.8 \text{ kg}$

Masa sensores: $M_s = 0.2 \text{ kg}$

Masa Total: $M_{Total} = M_p + M_{ex} + M_b + M_s + 10\%M_{Total}$

$M_{Total} = M_p + M_{ex} + M_b + M_s + 10\%M_{Total}$

$M_{Total} = 17 \text{ kg} + 1.7 \text{ kg}$

$M_{Total} = 18.7 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 183.3 \text{ [N]}$

Coefficiente de fricción caucho-concreto

μ_s : Coeficiente de fricción estático = 1.0 (Anexo B)

μ_k : Coeficiente de fricción dinámico = 0.80 (Anexo B)

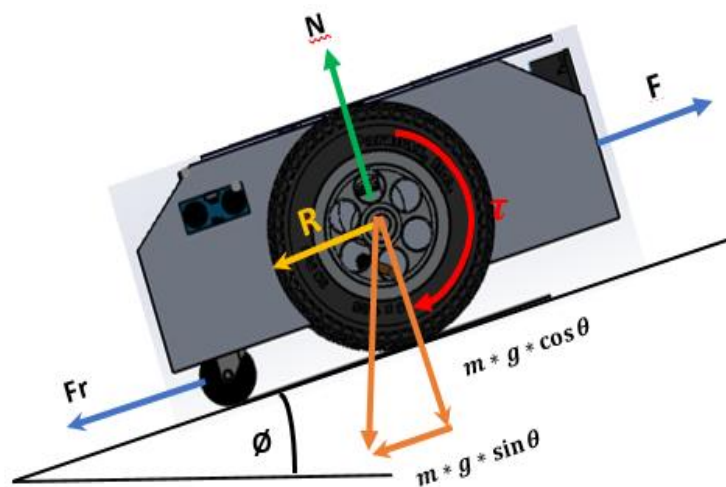


Figura 27. Diagrama de Cuerpo Libre

$$F = F_r + m_{TOTAL} * g * \sin \theta$$

Ecuación 6
Fuerzas en el eje X

$$F = \mu * F_N + m_{TOTAL} * g * \sin \theta$$

$$F = m_{TOTAL} * g * \cos \theta * \mu + m_{TOTAL} * g * \sin \theta$$

$$F = m_{TOTAL} * g * (\cos \theta * \mu + \sin \theta)$$

$$F = 18.7[kg] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * (\cos 15 * 1 + \sin 15)$$

$$F = 224.5 [N]$$

Velocidad

$$P = F * v$$

Ecuación 7
Fórmula de Potencia

$$P = 224.5 [N] * 0.42 \left[\frac{m}{s} \right] = 94.3 [W]$$

$$P_{Motor} = \frac{P}{2} = 47.2 [W]$$

$$\phi_{llanta} = 6 \text{ in} = 0.153 \text{ m}$$

Cálculo de torque de la Plataforma

$$\tau_{motor} = \frac{F * \phi_{llanta}}{2} = \frac{(224.5N)(0.153m)}{2} = 17.18N * m$$

En dónde el torque en cada rueda viene dado por

$$T_{rueda} = \frac{T_{motor}}{2} = \frac{17.18 N * m}{2} = 8.6 N * m$$

Potencia requerida

$$v_{deseada} = 0.42 [m/s]$$

$$P = T_{rueda} * \omega_{requerido}$$

$$\omega_{requerida} = \frac{V_{requerida}}{R_{llanta}}$$

$$\omega_{requerida} = \frac{0.42 \text{ m/s}}{0.0762\text{m}} = 6.56 \text{ rad/s}$$

Ecuación 8
Fórmula Velocidad Angular

$$P = 8.6 \text{ N m} * 6.56 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 56.42 \text{ W}$$

El motor que se requiere para el diseño debe entregar una potencia mínima de 56.42 W.

2.2.2 Diseño del sistema mecánico para el movimiento del bastón

Para proporcionar movimientos rotatorios al bastón que permita estabilizarlo y dar apoyo al usuario se ha pensado en la posibilidad de aplicar los principios de un robot paralelo, el cual es básicamente un sistema mecánico de posicionamiento XYZ capaz de ubicarse en cualquier punto del espacio dentro de su rango de trabajo.

Los actuadores están unidos a una base fija y una base móvil ambas bases siguiendo un diseño concreto y con ellos se consigue el control, tanto su posición final como su inclinación.

a. Articulaciones

Debido a que para el movimiento del bastón se requiere de una base móvil que tenga cierto grado de inclinación es necesario el uso de articulaciones para acoplar los actuadores. La combinación de estas articulaciones permite dar movimiento adecuado a los motores en un amplio rango de ángulos permitiendo la libertad necesaria a la base móvil.

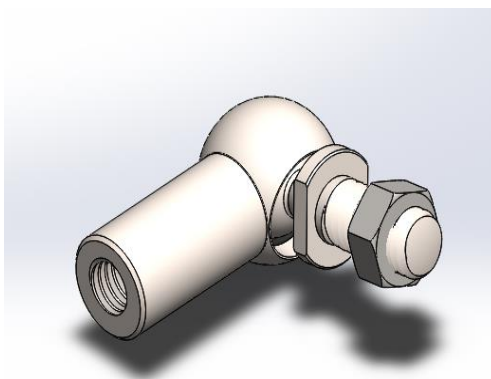


Figura 28. Rótulas angulares

Las rotulas son componentes mecánicos estandarizados y listos para ser montados que se auto alinean y permiten la ejecución de movimientos de alineación multi-direccional, las rotulas mecánicas empleadas en este caso cuentan con una junta simple y su ángulo máximo de funcionamiento es de 45°. Se escoge las Junta Esférica CS DIN 71802 (Ver Anexo).

b. Cálculo Motores Lineales

Se necesita calcular la fuerza que soportarán los actuadores y de esta manera poder escoger uno con la capacidad adecuada.

Por lo expuesto anteriormente se procede a realizar el diagrama de cuerpo libre para calcular la fuerza requerida por cada actuador asumiendo una carga máxima del 15% del total del peso de la persona, de acuerdo con la disposición que tendrán los tres actuadores de acuerdo con el diseño geométrico propuesto, como se muestra en la figura 32.

La carga total transmitida por el usuario del bastón considerando un porcentaje de imprevistos el 10%.

$$W_{us} = (11.56 \text{ kg} + 1 \text{ kg} + 0.1 \text{ kg}) * 1.1 * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_{us} = 136,5 \text{ N}$$

Tomando como referencia el sistema de coordenadas mostrado en la figura 29, las coordenadas en mm de cada uno de los puntos son:

$$P_0(0; 0; 0)$$

$$P_1(-65; 0; 0)$$

$$P_2(32.5; 0; 56.292)$$

$$P_3(32.5; 0; -56.292)$$

$$P_4(-95; -150; 0)$$

$$P_5(47.5; -150; 82.272)$$

$$P_6(47.5; -150; -82.272)$$

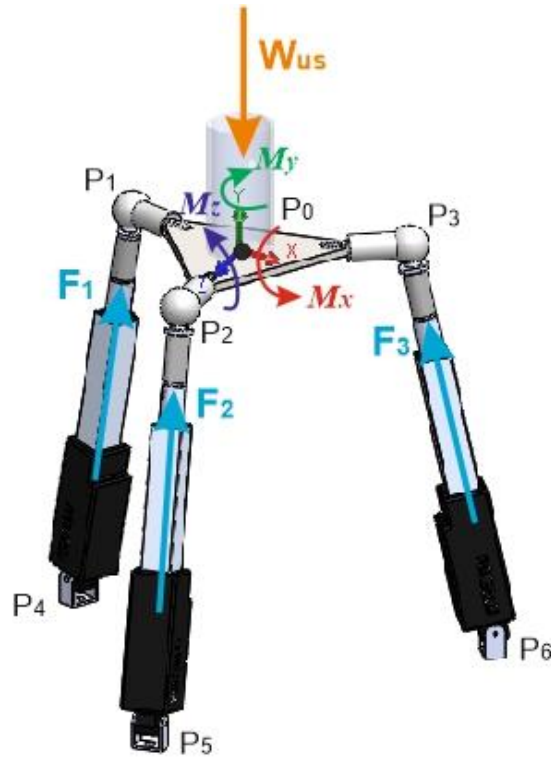


Figura 29. Trípode 3SPS

A partir de las coordenadas de los puntos se obtienen los vectores posición entre los diferentes puntos de interés:

$$\vec{r}_{01} = -65\hat{i}$$

$$\vec{r}_{02} = 32,5\hat{i} + 56,292\hat{k}$$

$$\vec{r}_{03} = 32,5\hat{i} - 56,292\hat{k}$$

$$\vec{r}_{41} = 30\hat{i} - 150\hat{k}$$

$$r_{41} = 152,971 \text{ mm}$$

$$\vec{r}_{52} = -15\hat{i} + 150\hat{j} - 25,98\hat{k}$$

$$r_{52} = 152,97 \text{ mm}$$

$$\vec{r}_{63} = -15\hat{i} + 150\hat{j} + 25,98\hat{k}$$

$$r_{63} = 152,97 \text{ mm}$$

Por lo tanto, las vectores fuerzas del sistema mostrado en la figura son:

$$\vec{F}_1 = F_1 \frac{\vec{r}_{41}}{r_{41}} = F_1 \frac{30\hat{i} - 150\hat{k}}{152,97}$$

$$\vec{F}_1 = 0,196F_1\hat{i} + 0,981 F_1\hat{j}$$

$$\vec{F}_2 = F_2 \frac{\vec{r}_{52}}{r_{52}} = F_2 \frac{-15\hat{i} + 150\hat{j} - 25,98\hat{k}}{152,97}$$

$$\vec{F}_2 = -0,098F_2\hat{i} + 0,981 F_2\hat{j} - 0,17 F_2\hat{k}$$

$$\vec{F}_3 = F_3 \frac{\vec{r}_{63}}{r_{63}} = F_3 \frac{-15\hat{i} + 150\hat{j} + 25,98\hat{k}}{152,97}$$

$$\vec{F}_3 = -0,098F_3\hat{i} + 0,981 F_3\hat{j} + 0,17 F_3\hat{k}$$

$$\vec{W}_{us} = -136,5\hat{j}$$

Aplicando las ecuaciones de equilibrio al sistema de fuerzas de la figura se obtiene:

$$\sum F = 0$$

$$0,196F_1\hat{i} + 0,981 F_1\hat{j} - 0,098F_2\hat{i} + 0,981 F_2\hat{j} - 0,17 F_2\hat{k} - 0,098F_3\hat{i} + 0,981 F_3\hat{j} + 0,17 F_3\hat{k} = 0$$

$$(\hat{i}) \quad 0,196F_1 - 0,098F_2 - 0,098F_3 = 0$$

$$(j) \quad 0,981F_1 + 0,981F_2 - 0,981F_3 = 136,5$$

$$(\hat{k}) \quad -0,17F_2 + 0,17F_3 = 0$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$F_2 = F_3$$

$$F_1 = 46,3812$$

$$F_2 = 46,3812 = F_3$$

Por lo tanto, las fuerzas requeridas en cada actuador lineal son:

$$\vec{F}_1 = 9,091\hat{i} + 45,5\hat{j}$$

$$\vec{F}_2 = -4,545\hat{i} + 45,5\hat{j} - 7,885\hat{k}$$

$$\vec{F}_3 = -4,545\hat{i} + 45,5\hat{j} + 7,885\hat{k}$$

De forma semejante se obtienen los momentos de reacción que se puede generar en la placa que soporta al bastón:

$$\vec{M}_{01} = \vec{r}_{01} * \vec{F}_1$$

$$\vec{M}_{01} = -65\hat{i} * (9,091\hat{i} + 45,5\hat{j})$$

$$\vec{M}_{01} = -2,9575\hat{k}$$

$$\vec{M}_{02} = \vec{r}_{02} * \vec{F}_2$$

$$\vec{M}_{02} = (-4,545\hat{i} + 45,5\hat{j} - 7,885\hat{k}) * (32,5\hat{i} + 56,292\hat{k})$$

$$\vec{M}_{02} = 1,4788\hat{k} + 0,2563\hat{j} - 0,2558\hat{j} - 2,5613\hat{i}$$

$$\vec{M}_{02} = -2,5613\hat{i} + 1,4788\hat{k}$$

$$\vec{M}_{03} = \vec{r}_{03} * \vec{F}_3$$

$$\vec{M}_{03} = (32,5\hat{i} - 56,292\hat{k}) * (-4,545\hat{i} + 4,55\hat{j} + 7,885\hat{k})$$

$$\vec{M}_{03} = 1,4788\hat{k} - 0,256\hat{j} + 0,256\hat{j} + 2,5613\hat{i}$$

$$\vec{M}_{03} = -2,5613\hat{i} - 1,4788\hat{k}$$

$$\sum M = 0$$

$$-2,9575\hat{k} - 2,5613\hat{i} + 1,4788\hat{k} - 2,5613\hat{i} - 1,4788\hat{k}$$

$$\vec{M}_x = -5,123 \text{ Nm} \quad ; \vec{M}_y = 0 \quad ; \vec{M}_z = -2,9575 \text{ Nm}$$

c. Análisis de rotación en SolidWorks.

En esta sección se muestra la simulación del movimiento del bastón con un máximo permisible de 30 grados.

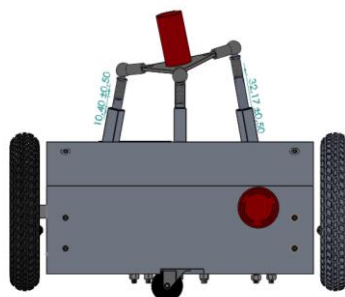


Figura 30. Movimiento y rotación del bastón robótico

2.3 Selección de materiales

El material para la estructura del robot debe ser lo más ligero y resistente posible para disminuir el peso del bastón robótico. Para lo cual se analiza las diferentes opciones que pueden ser utilizadas para este propósito:

SOLUCIONES				
ESTRUCTURA	Hierro	Duralón	Aluminio	Acero Galvanizado
	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4

Para la selección del material más idóneo es necesario establecer algunos criterios de selección y un factor de ponderación de la siguiente manera: Si la opción cumple satisfactoriamente el criterio se le otorgará un puntaje de 10 y si no cumple satisfactoriamente se podrá calificar hasta un valor de 0 siendo el puntaje más bajo. CALIFICACIÓN 1 (MIN) – 10 (MAX)

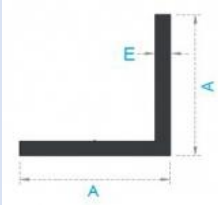
Tabla 4
Posibles soluciones para el material de la estructura

Parámetros	ALT1		ALT2		ALT3		ALT4	
Maquinabilidad	6	20%	5	20%	8	20%	5	20%
Ligero	4	30%	6	30%	6	30%	8	30%
Costo	5	15%	6	15%	6	15%	8	15%
Duración	8	10%	8	10%	7	10%	4	10%
Resistencia	9	15%	5	15%	7	15%	4	15%
Adaptable	2	10%	4	10%	8	10%	5	10%
TOTAL	5.5		5,65		6.85		6.1	

La mejor opción para la construcción de la estructura es el aluminio debido principalmente a su bajo peso y su facilidad de maquinabilidad. Posee una resistencia adecuada para los fines para los cuales utilizaremos la plataforma ya que no estará sometido a grandes cargas. Las características del perfil de aluminio escogido se muestran a continuación:

Tabla 5

Parámetros del Aluminio

Parámetros del Aluminio	
Referencia	2033
Cantidad	2
Peso	0.48
Kg/m	
Dimensión (A)	31 mm
Imagen	
Espesor (E)	3 mm

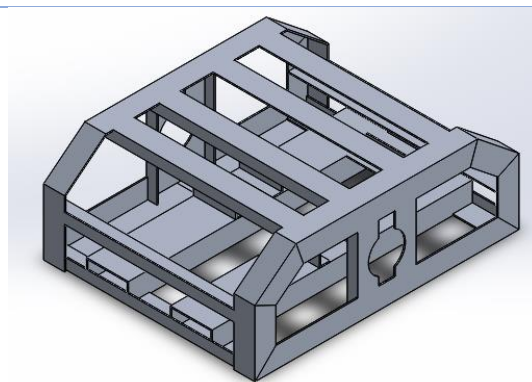


Figura 31. Diseño CAD de la estructura de la plataforma

2.4 Selección de componentes

2.4.1 Selección de Motores de tracción

a. Actuador DYNAMIXEL PRO L54-30-S500-R

Los actuadores Dynamixel son utilizados comúnmente para diseñar su propio robot debido a que se caracterizan por tener alta precisión, alta calidad y las características de gran alcance que ofrece retroalimentación para mediciones de posición, velocidad, temperatura, entrada de tensión. Estos nuevos actuadores tienen alta potencia y precisión, lo que es ideal para múltiples aplicaciones, desde la robótica avanzada hasta las aplicaciones industriales. (Robotnik, 2016)




Figura 32. Actuadores Dynamixel PRO

Fuente: (Robotics, 2017)

Tabla 6

Características motor Dynamixel

Característica	Unidad	Datos
Tensión nominal	V	24
Velocidad de operación	RPM	21
Corriente de operación	A	1,6

CONTINÚA 

Corriente	A	1,95
Torque	N-m	5,4
Relación de Transmisión	-	500
Peso	gramos	591
Dimensiones	mm	54x54x108

$$\omega_{motor} = 21 \frac{rev}{min} * \frac{2 * \pi * rad}{1 rev} * \frac{1 min}{60 s} = 2.2 \frac{rad}{s}$$

$$P_M = \omega * T_{motor} = 2.2 \frac{rad}{s} * 5.4 N * m = 11.87 W$$

b. Motor DC RS775 con reducción planetaria PG71 de AndyMark




Figura 33. Motor DC RS775

Tabla 7

Proyección estado de pérdidas y ganancias

Característica	Unidad	Datos
Peso	kg	0.8482
Voltaje nominal	V	12

CONTINÚA 

Velocidad de operación	RPM	75
Corriente de operación (sin carga)	A	0,6
Corriente	A	1,95
Par a rotor bloqueado	N-m	22,514
Reducción	-	75:1
Dimensiones	mm	6.26*

c. DOGA DC Geared Motor, 24 V dc, 25 Nm, 3Nm, 70 rpm




Figura 34. Motor DC Marca DOGA

Tabla 8

Características

Característica	Unidad	Datos
Tensión nominal	V	24
Velocidad de salida	RPM	70
Corriente nominal	A	3

CONTINÚA 

Corriente	A	1,95
Torque	N-m	3, 25
Relación de Reducción	-	62:1
Peso	Kg	1.25
Dimensiones:	Mm	178 x 60 x 100,6

Tabla 9
Comparación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Voltajes de operación de 12 a 24 voltios • Velocidad adecuada sin necesidad de transmisión. • Potencia nominal de 3 Nm • Mantiene el torque cuando está en reposo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificil adquisición • Requiere de sensores para medir la velocidad de rotación.

d. Motor Mount & Wheel Kit - Aluminum

Este kit cuenta con motores de alto torque ya que viene incluido con reductor. Posee un montaje de aluminio para el motor y un juego de ruedas es un sistema de accionamiento mecánico de precisión diseñado exclusivamente para plataformas robóticas móviles, ideal para aplicaciones como plataforma robótica móvil autónomas, sistema de accionamiento del robot tele-operados o por control remoto.



Figura 35. Motor marca Parallax

Tabla 10
Características del motor

Característica	Unidad	Datos
Tensión nominal	V	12
Velocidad de salida	RPM	95
Corriente nominal	A	3
Corriente	A	2.5 a 8
Torque	N-m	9.6
Rango de temperatura operativa	°C	0 a +49
Peso por ensamble	Kg	1.36
Dimensiones:	Mm	161 x 35 x 100
Capacidad de carga	Lb	60

$$\omega_{motor} = 95 \frac{rev}{min} * \frac{2 * \pi * rad}{1 rev} * \frac{1 min}{60 s} = 9.94 \frac{rad}{s}$$

$$T_{motor} = 9,6 N * m$$

$$P = \omega * T_{motor} = 9.94 \frac{rad}{s} * 9,6 N * m = 96 W$$

De acuerdo con las características de cada una de las alternativas anteriormente mencionadas se procederá a la selección del actuador óptimo para la aplicación a partir de varios parámetros (Ver Tabla 11). Para la selección del material más idóneo es necesario establecer algunos criterios de selección y un factor de ponderación de la siguiente manera: Si la opción cumple satisfactoriamente se le otorgará un puntaje de 10 y si no cumple se lo podrá ponderar hasta una calificación de 0 siendo el puntaje más bajo.

Tabla 11
Selección del motor

Parámetros	ALT a		ALT b		ALT c		ALT d		ALT e	
Tamaño Adecuado	8	25%	5	20%	0.8	20%	0.5	20%	0.5	20%
Velocidad (50-80rpm)	5	25%	6	30%	0.5	30%	0.8	30%	0.8	30%
Potencia	8	30%	6	15%	0.7	15%	0.8	15%	0.8	15%
Costo	6	10%	8	10%	0.9	10%	0.4	10%	0.4	10%
Consumo energético	8	10%	5	15%	0.6	15%	0.4	15%	0.4	15%
TOTAL	6.8					16				

De acuerdo con las especificaciones anteriormente mostradas de cada una de las alternativas para motores, se escoge el KIT Motor Mount & Wheel Kit – Aluminum marca Parrallax debido a que el torque que proporciona es suficiente para la movilidad de todo el sistema incluyendo el peso del usuario, además de que la velocidad que genera el motor es adecuada para obtener la velocidad deseada para el desplazamiento de la plataforma. Por último, se escoge este motor debido a que viene incluido encoder de posición y las ruedas lo que facilitaría el ensamblaje.

Cálculo del diámetro de la llanta

$$R_{llanta} = \frac{V_{requerida}}{\omega_{motor}}$$

$$\phi_{llanta} = \frac{2 * V_{requerida}}{\omega_{motor}}$$

$$\phi_{llanta} = \frac{2 * 0.48m/s}{9.94 rad/s} = 0.14 m$$

Esta medida transformando a pulgadas es igual a 5.5 in; en el mercado no existen llantas de esta medida; así que se aproxima a 6 pulgadas las llantas que de todas maneras se aproxima lo suficiente a los requerimientos que se necesita para la plataforma.

Velocidad lineal real

Se utilizarán llantas de 6 pulgadas de diámetro, adecuadas para poder dimensionar la estructura. La rueda neumática de 6 pulgadas de diámetro es apropiada para aplicaciones en baja velocidad. Tiene un funcionamiento silencioso, es de peso ligero, anda suavemente sobre terreno irregular. De la Ecuación se pueden relacionar las velocidades angulares como sigue

$$V_{real} = \frac{\omega_{motor} * \phi_{llanta}}{2}$$

Ecuación 9
Velocidad lineal

$$V_{real} = \frac{9.94 \frac{rad}{s} * 0.1524 m}{2}$$

$$V_{real} = 0.76 m/s$$

2.4.2 Selección para actuadores lineales

A continuación, se enumerarán las opciones posibles para los actuadores que permitan el movimiento del bastón y que tengan la fuerza necesaria para soportar el peso del brazo del usuario que caminara junto al dispositivo, por lo cual se procede a un análisis de cada una de ellas.

a. Actuador Firgelli L16 con retroalimentación

La línea de actuadores lineales Firgelli Technologies miniatura permite la generación de diseños con capacidades que nunca se han combinado en un dispositivo de este tamaño.

La ventaja de estos motores lineales es que tienen incorporado un potenciómetro cuyo cursor es solidario con la parte móvil del actuador, lo que nos proporciona la información necesaria para realizar el control del sistema, transformando la señal de voltaje de dicho potenciómetro en su valor de posición en cada momento.



Figura 36. Actuador Firgelli L16 con retroalimentación

Fuente: (Actuonix, 2018)

Características:

- Engranaje 35:1
- Velocidad máxima: 32mm/s
- Alimentación: 12 V
- Carrera: 50 mm

- Fuerza máxima: 50 N
- Peso: 56 gramos
- Potenciómetro de realimentación: $6\text{ K}\Omega \pm 50\%$

Tabla 12
Comparación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Posee realimentación de posición ya que viene incorporado un potenciómetro. • Bajo costo y fácil control 	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de carga baja. • Material hecho de plástico
<ul style="list-style-type: none"> • Pequeñas dimensiones a diferencia de la mayoría de los actuadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere importación

b. Actuador lineal concéntrico LACT4P-12V

Este actuador lineal 12 V se puede utilizar en una variedad de aplicaciones de servicio pesado. El motor tiene 20: 1 caja de engranajes de reducción que le da al actuador una capacidad de carga dinámica de 110 libras (50 kg) y una velocidad máxima de 0,5 pulgadas / s (1,3 cm / s), y que está clasificado para soportar hasta 500 libras cuando no se mueve. Los finales de carrera en cada extremo hacen que el actuador fácil de controlar en toda su amplitud de movimiento y la unidad de gusano asegura que el eje llevará a cabo su posición incluso cuando no encendido. Esta versión cuenta con una carrera de 2 pulgadas y un potenciómetro incorporado para la realimentación de posición.



Figura 37. Actuador Pololu

Características:


- Relación de transmisión: 5:1
- Alimentación: 12 V
- Corriente: 2x5A (10A máx.)
- Carrera: 50 mm
- Velocidad: 0.5 in/s = 43.18 mm/s
- Peso 45 onzas = 1275,73 gramos

2.4.3 Evaluación de los motores

Para evaluar las diferentes alternativas de motores se ponderará el precio y la disponibilidad de estos dispositivos de acuerdo con los siguientes criterios:

Tabla 13
Evaluación

Parámetros	ALT A		ALT B	
Dificultad de adquisición	8	25%	8	25%
Pequeñas Dimensiones	9	30%	4	30%

CONTINÚA 

Capacidad de Carga	5	20%	8	20%
Bajo Costo	6	10%	5	10%
Velocidad	8	15%	4	15%
TOTAL		7.5		5.9

De acuerdo con la tabla anterior se escoge la opción de utilizar los actuadores Firgelli L16 de 50mm principalmente por sus pequeñas dimensiones y peso reducido que permitirá reducir considerablemente las dimensiones del dispositivo que es una de los principales parámetros para el bastón robótico, además que la velocidad del actuador es muy superior a otro tipo de actuadores lineales.

2.5 Construcción

Se procede a realizar la construcción del prototipo de acuerdo con las especificaciones establecidas en el diseño CAD (Ver Figura 34).

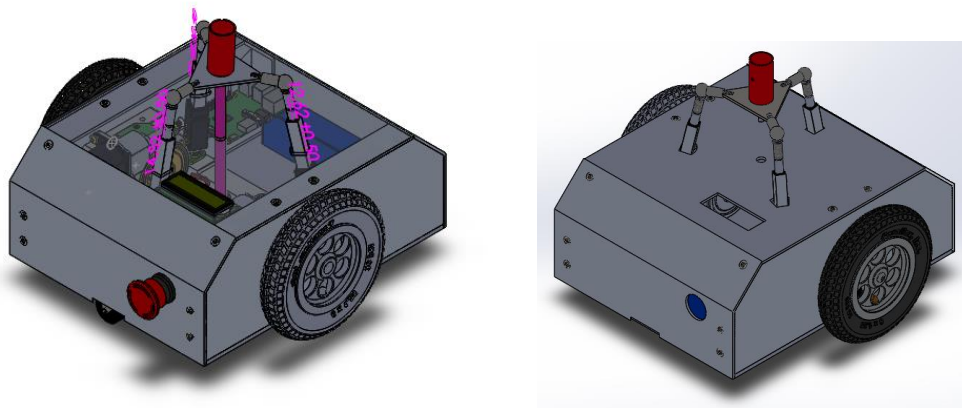


Figura 38. Diseño del Bastón Robótico

Se comienza con la construcción de las dos estructuras laterales en aluminio estructural, para lo cual se realiza el corte del perfil en L de aluminio 6061-T6 que se consigue en el mercado en perfiles de 6 metros de longitud, se muestra el material cortado (Ver Figura 35).



Figura 39. Cortes de aluminio

Se alinean las piezas de tal manera que encajen adecuadamente de acuerdo a las especificaciones del plano y luego proceder con la soldadura, para lo cual es necesario sujetar firmemente a una base toda la estructura. La soldadora MIG requiere la calibración tanto en corriente como en voltaje para el material (aluminio), por otra parte, es importante verificar todos los parámetros de seguridad para realizar la suelda.



Figura 40. Estructura lateral de la plataforma

Luego de la soldadura se procede a quitar los excesos, para lo cual se usa una pulidora para la parte externa y para la parte interna una fresadora de tal manera que la estructura quede más estético.



Figura 41. Estructura

Una vez soldado los laterales se la une a una base de aluminio de 3mm de espesor que le dé mayor firmeza a la estructura, posteriormente con la estructura armada se procede a acoplar los motores de tracción, gracias a que ya viene incluida la chumacera junto a los motores se procede a asegurarlos y acoplarlos directamente.



Figura 42. Montaje de motores de tracción

Se procede a verificar que todo se encuentre adecuadamente dimensionado para poder analizar la posición adecuada de las tarjetas electrónicas y el espacio que se cuenta para dicho propósito y la posición más idónea para colocarlas.

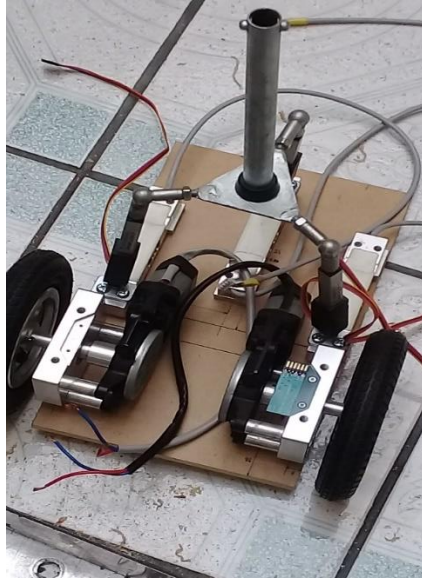


Figura 43. Conexión de Elementos

Una vez que se tiene la estructura base se procede a cortar las tapas laterales, frontales y superior que recubren la plataforma.

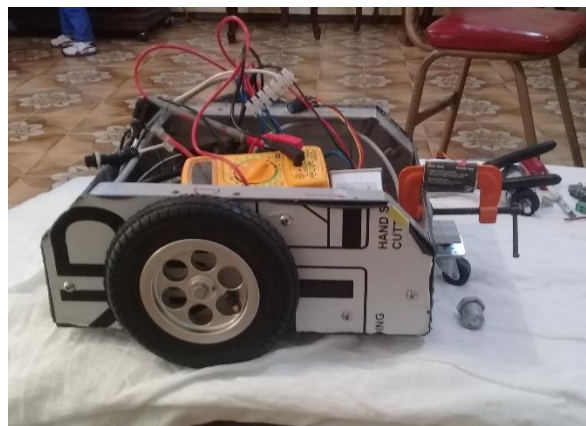


Figura 44. Pruebas del Prototipo



Figura 45. Ajuste de Tapas

Se presenta el diseño final de la estructura ensamblado cada uno de sus componentes.



Figura 46. Diseño final del bastón robótico

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

3.1 Requerimientos funcionales

Para el correcto funcionamiento del bastón robótico es necesario implementar un sistema de control adecuado para cada uno de los componentes que conforman el bastón robótico como son actuadores eléctricos, sensores y tarjeta electrónica. Dentro de los requerimientos se puede mencionar:

Control de posición de motores de Tracción

Control de posición de motores Lineales

Adquisición de datos de encoder, celdas de carga

Adquisición de datos de los encoder

De acuerdo con estas circunstancias y luego de un análisis minucioso se llega a dividir en tres módulos la parte electrónica para explicarlo de mejor manera. Un módulo que conlleva la fuente de alimentación muy importante debido a que se cuenta con elementos que trabajan con distintos voltajes y diferente consumo de corriente.

Un segundo módulo de control en el cual se encuentra el microcontrolador de la Tarjeta Discovery STM32F407 y el acondicionamiento de Señales para las galgas extensométricas. Por último, el módulo de potencia encargado del accionamiento tanto de los dos motores DC de tracción de la plataforma como los tres motores lineales encargados del movimiento en tres ejes del bastón.

3.2 Módulo Fuente de alimentación

Como se mostró en el Capítulo 2 el bastón tiene como componentes varios actuadores tales como: motores lineales, motorreductores, además cuenta con sensores internos y externos, circuitos integrados sin olvidar el microcontrolador (Tarjeta Discovery STM32) que poseen necesidades bien definidas en cuanto a niveles de tensión y corriente de consumo, y deben estar aisladas con el fin de proteger los equipos y al usuario que utiliza el dispositivo.

Para proporcionar los voltajes de alimentación necesarios para todo el sistema es necesario del diseño y construcción de una fuente, conociendo cada uno de los componentes que se utilizaran y los niveles de tensión. Se diseñaron dos fuentes independientes que deben cumplir ciertas especificaciones como se explica a continuación:

- a) La primera fuente, trabaja con la etapa digital para la alimentación de las placas y circuitos de control, debe tener una salida de tensión de + 5V con su respectiva tierra; con esta fuente se alimenta el Microcontrolador y los diferentes sensores internos y externos que posteriormente se pueda incluir en el proyecto.
- b) La segunda fuente dual posee una salida con tensiones de +5V y -5 V con su respectiva tierra, para la alimentación de los componentes electrónicos como amplificadores operacionales, la fuente debe poseer una capacidad de corriente de al menos 200 mA.
- c) Para alimentar los motores se lo hará directamente con el voltaje de la batería. Se utilizará Baterías de polímero de litio (Li-Po) que permiten una mayor conservación de energía, así como una tasa de descarga muy superior. Estas baterías tienen un tamaño muy reducido respecto a otros tipos de baterías, lo que las hace ideales para este tipo de proyectos. Cada celda tiene un voltaje

nominal de 3,7 V, voltaje máximo 4,2 y mínimo 3,0. Las baterías Li-Po se venden generalmente de 1S a 4S lo que significa:

Li-PO 1S: una celda, 3,7 V. Li-PO 2S: dos celdas, 7,4 V.

Li-PO 3S: tres celdas, 11,1 V Li-PO 4S: cuatro celdas, 14,8 V.

Características:

- Liviana y tamaño reducido
- No tienen bajadas de potencia como se pueden apreciar en las de Ni-Cd o Ni-Mh y mantiene la carga constante hasta casi el final de la carga.
- No es mala para el ambiente en su composición química

La batería que utilizaremos será una Lipo de 4 celdas de 14.8 V a 3000mAh, que a plena carga llega a un voltaje máximo de 16.8 V.



Figura 47. Batería LIPO 4 Celdas

Fuente: (Hobbyking, s.f.)

Capacidad: 3000mAh

Configuración: 4S1P / 14.8v

Constante de Descarga: 40C

Peso: 330g

Dimensiones: 137 x 44 x 26mm

La capacidad de una batería está determinada por la intensidad de corriente capaz de suministrar en un tiempo establecido. La ecuación nos muestra la magnitud correspondiente a la capacidad de la batería.

$$P_{motor} = V_{motor} * I_{motor}$$

Ecuación 10
Fórmula potencia eléctrica

$$P_{motor} = (12 V) * (2.5A) = 30 W$$

$$P_{motor} = (12 V) * (2.5A) = 30 W$$

El número de baterías requeridas viene dado por el cociente entre la Potencia total y la Potencia de la Batería.

$$P_{bat} = V_{bat} * I_{bat}$$

Ecuación 11
Fórmula Potencia de la batería

$$P_{bat} = 16.8 V * 3A = 44.4 W$$

$$Num_{bat} = \frac{P_T}{P_{bat}}$$

$$Num_{bat} = \frac{40 W}{44.4 W} = 0.9$$

El número de baterías necesarias para la alimentación de nuestro dispositivo es de una sola batería para tener una autonomía de una hora aproximadamente, suficiente para una rehabilitación.

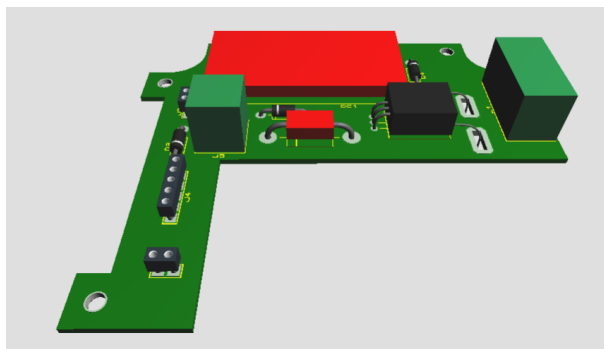


Figura 48. Diseño PCB de la Fuente de Alimentación

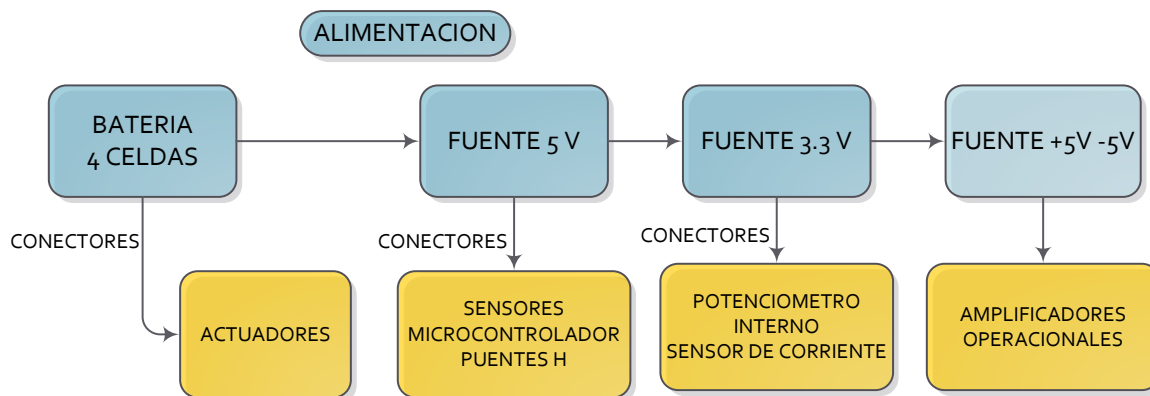


Figura 49. Diagrama de la Fuente de Alimentación

3.3 Módulo de Acondicionamiento de señales

El dispositivo en este trabajo está basado en un bastón adaptado para ofrecer un mayor soporte físico al usuario. Para la caracterización de la interacción hombre-máquina se lo hace a través del intercambio de fuerzas en el bastón; para ello se requiere realizar un sistema de medida basado en sensores de fuerza; debido al alto costo de los sensores de fuerza de tres dimensiones utilizados en algunos proyectos mostrados en el capítulo 1, se propone incorporar celdas de carga disponibles en el mercado a precios accesibles con la finalidad de conocer la intención de movimiento del usuario a partir de puntos específicos en los cuales se aplicará la fuerza más significativamente y nos proporcione una idea de la dirección a la cual la persona desea moverse.

3.3.1 Acondicionamiento de las Celdas de Carga

El principio de una celda de carga se basa en la conformación de cuatro galgas extensiométricas conectadas en una configuración de tipo puente Wheatstone.

Su principio de medición se basa en la aplicación de una fuerza sobre la celda (Ver Figura 44), provocando una deformación milimétrica que se mide mediante las galgas extensiométricas dispuestas en la viga.

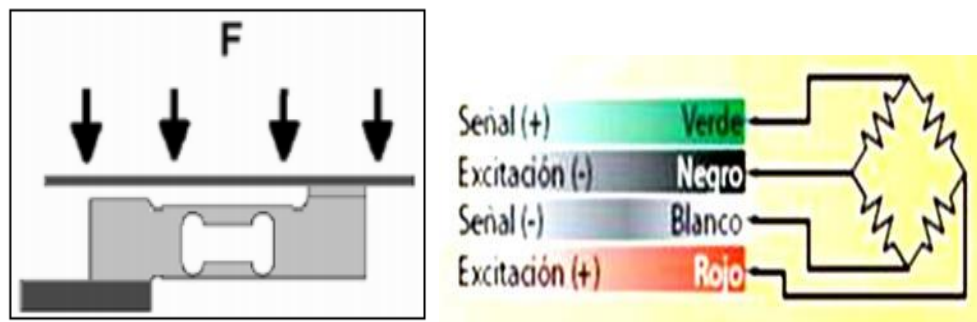


Figura 50. Aplicación de Fuerzas

Fuente: (Urbina, 2016)

Se utiliza Celdas de Carga unipunto con capacidad de 20 kg de la Marca Keli, utilizadas ampliamente en la industria en el control de procesos de pesaje electrónico; ya que presentan una buena deformación y una buena linealidad permitiendo tener una buena medida del peso ejercido. Las celdas trabajan con voltajes del orden de los milivoltios, por lo que se hace necesario la utilización de amplificadores operaciones, y de otros dispositivos para eliminar posibles ruidos y acondicionar esta señal.

Como primer paso se procede a realizar pruebas con la celda se necesita identificar y distinguir excitaciones y señales, los fabricantes utilizan un código de color en el cableado de la celda. Se puede usar el método de las impedancias que consiste en medir cada combinación de cables posible con su compañero y anotarlas. Aplicando los siguientes criterios:

- El par de cables con mayor impedancia son la excitación.
- El par de cables que quedan son las señales
- Entre la excitación positiva y cada señal debe haber la misma impedancia $\pm 2\Omega$; de la misma forma la medida entre la excitación negativa y la señal.

Para la primera etapa de amplificación se usa un amplificador de instrumentación AD620 en la cual se coloca un potenciómetro RG y de esta manera poder ir variando la ganancia hasta obtener la salida de voltaje deseada.

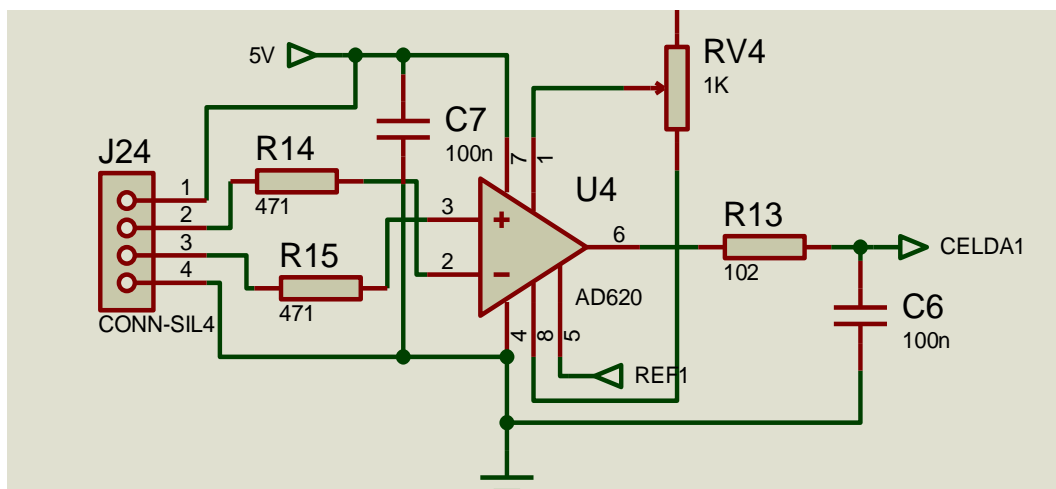


Figura 51. Amplificador de instrumentacion para celdas de carga

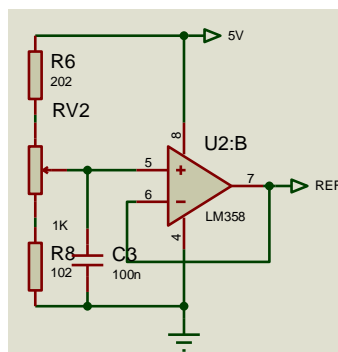
Para el Cálculo de la ganancia se utiliza la siguiente expresión

$$G = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_G}$$

Ecuación 12
Fórmula de la ganancia

$$G = 1 + \frac{49.4k\Omega}{100\Omega} = 494$$

En el diagrama anterior se observa REF1 que se trata de amplificador seguidor para bajar la impedancia que nos permite tener una mejor salida sin ruido.



La resolución de los ADC (Conversor Análogo Digital) del microcontrolador se configura a 12 bits; es decir tendremos un rango de valores entre 0 y 4096. Finalmente se envía este dato al controlador en donde se convierte los bits a un valor proporcional al peso medido.



Figura 52. Esquema general del proceso de adquisición

Luego de la etapa de amplificación y de la conversión ADC en el microcontrolador, se procede a encontrar la ecuación de caracterización de cada celda que nos permitirá realizar la transformación del voltaje a peso.

Tabla 14

Valores de voltajes medidos a partir de diferentes pesos

PESO	CELDA 1	CELDA 2	CELDA 3	VOLTAJE
(Kg)	VOLTAJE1	VOLTAJE2	VOLTAJE3	IDEAL
0	0,0126	0,0216	0,0103	0
2	0,24	0,24	0,25	0,2
4	0,47	0,46	0,45	0,4
6	0,67	0,66	0,65	0,6
8	0,84	0,85	0,87	0,8
10	1	1	1,04	1

Debido a que las celdas estarán sometidas a compresión y extensión vamos a tener valores positivos y negativos; por lo que para el análisis solo tomaremos en cuenta los valores positivos y los negativos se asumirán como valor 0V para tener un mejor control.

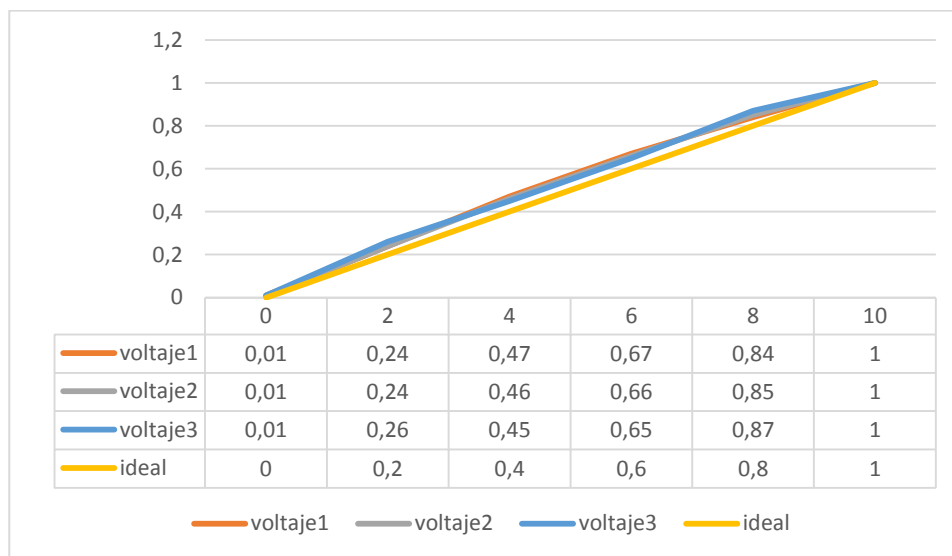


Figura 53. Grafica Voltaje vs Peso

En la figura se puede observar que las gráficas de las celdas de carga no son totalmente lineales sino más bien son polinómicas por lo que se requiere obtener una ecuación que defina el comportamiento de cada una de ellas; para ello con la ayuda de Excel se obtiene una ecuación la cual se la ingresa en la programación del microcontrolador para obtener como salida el PESO.

Luego de tener amplificadas las señales provenientes de las celdas de carga se debe convertir estos valores a un lenguaje que el microcontrolador pueda comprender, Para el cálculo del ADC se utiliza la siguiente formula:

$$\frac{\text{Resolución}}{\text{Voltaje de Excitación}} = \frac{\text{ADC}}{\text{Voltaje medido}}$$

Ecuación 13
ADC Microcontrolador

$$ADC = \frac{V_{medido} * Resolución}{V_{excitación}}$$

El microcontrolador cuenta con un conversor analógico digital ADC de 12 bits el cual utilizaremos para convertir las señales analógicas a digitales, por lo que el valor de la resolución para este caso sería de 4096. El voltaje de alimentación es de 5V a partir de esta fórmula podemos obtener el valor que entrega el ADC. Los resultados del cálculo del ADC aplicando la ecuación 10 se los realiza en una tabla de Excel, los resultados se muestran en las Tablas siguientes para cada sensor.

3.4 Módulo De Potencia

3.4.1 Control de posición de los motores DC

Como se describió en la sección 2.1.2, la fase importante en la serie de movimientos al caminar es la cuarta fase en la que la pierna se mueve hacia adelante y no está colocado en el piso. Por lo tanto, en este punto es cuando el bastón robótico debe detenerse y apoyar al usuario para reducir la incidencia de algún tipo de caída.

Después el bastón se mueve hacia delante en la segunda fase y mantener una distancia estable. Por lo cual es necesario poder tener el control de los motores de manera variable, es decir, atenuando o incrementando su régimen de trabajo recurriendo a la modulación por ancho de pulsos PWM.

Si conmutamos la tensión de alimentación con una frecuencia baja, en el caso de motores se tiene un accionar muy irregular que pueden generar problemas mecánicos a largo plazo y entregar una marcha incorrecta. Por el contrario, si elevamos la frecuencia de conmutación en exceso, caeremos en el problema de comenzar a generar sonidos audibles provocados por el bobinado del motor. Debido a esto para obtener un funcionamiento suave debemos trabajar con frecuencias superiores

a las que un bobinado de motor pueda resonar, por lo que estas frecuencias se ubican entre los 10 Khz y 20 Khz con las cuales trabajemos para el proyecto.




Figura 54. Motor 12 V

En cuanto a los motores se realizan pruebas de velocidad con el motor sin carga para conocer las revoluciones que podemos obtener y realizar el control.

Tabla 15

Pruebas de velocidad de motores Parallax

Voltaje	Tiempo en dar 10 Vueltas	Segunda medición
2 V	57.72 s	60 s
3 V	30.69 s	30 s
4 V	21 s	19 s
5 V	13.25 s	13.22 s
6 V	10.93 s	10.78 s
7 V	9,90 s	9,11 s
8 V	7,83 s	8, 55
9 V	6,95 s	7, 20 s

CONTINÚA 

10 V	6,41 s	6,35 s
11 V	5,12 s	5,15 s

Un componente importante para el funcionamiento del sistema es el MONSTER MOTO SHIELD, componente que cuenta con 2 puentes H y soporta corrientes de hasta 30 A suficiente para el control de los dos motores de tracción, un puente H permite controlar la dirección y velocidad de un motor modificando su señal de voltaje de alimentación, empleando para ello, señales lógicas. El cambio de dirección se consigue cambiando las señales lógicas enviadas a cuatro puertas lógicas controladas de dos en dos por una única señal.

Características

- Tensión máxima: 16 V
- Corriente máxima: 30 Amperios
- Corriente continua: 14 A
- Detección de corriente disponible pin analógico (A2 y A3)
- Máxima frecuencia PWM: 20 KHz
- Apagado térmico
- Apagado por sobre tensión.



Figura 55. Monster moto shield

3.4.2 Acondicionamiento para encoder digital

Los encoder de cuadratura entregan dos señales tipo tren de pulsos A y B por cada uno de sus dos canales desfasadas 90°. Los discos de encoder son de 36 posiciones. Es necesario utilizar un timer del microcontrolador que vaya contando el número de pulsos que nos permita determinar la distancia. Para ello es necesario calcular el número de pulsos que da en una vuelta completa; para ello se utiliza el perímetro de la rueda con la siguiente formula:

$$P = 2 * \pi * R$$

Ecuación 14
Perímetro de la rueda

$$P = 2 * \pi * (0.079)$$

$$P = 0.496 \text{ m}$$

De acuerdo con experimentación se determina que el encoder da 72 pulsos al desplazarse un metro de distancia.

$$1 \text{ pulso} = \frac{0.496}{72} = 0.0068 \text{ m}$$

Para los encoder se configura dentro del microcontrolador gracias al STM Cube utilizando un Timer en modo de operación Encoder y combinando dos canales necesarios para tomar las medidas en ambas direcciones.

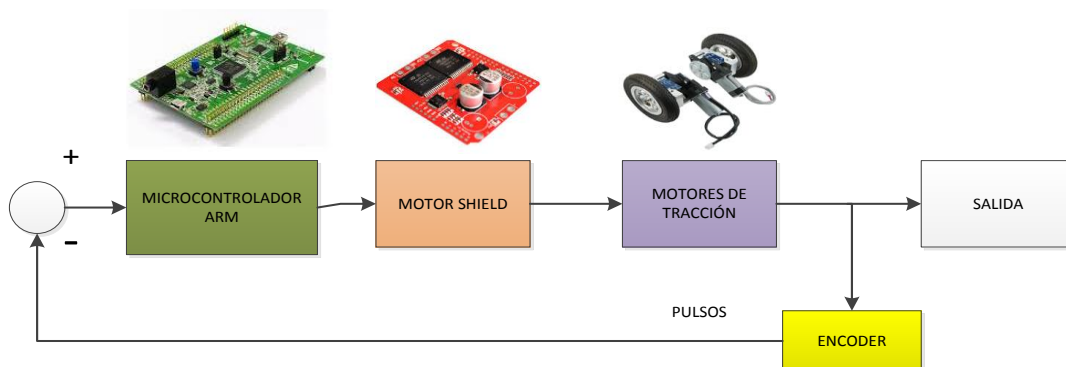


Figura 56. Diagrama de Control para motores de Tracción

3.4.3 Control de posición de los motores lineales Firgelli.

Para realizar el control de los actuadores es necesario conocer su posición a la hora de enviar la señal de control. Los motores cuentan con un potenciómetro incorporado cuya resistencia medida varía en función de la distancia que se expande su parte móvil. Al aplicar una diferencia de voltaje de 5V al potenciómetro sabemos que el voltaje medido correspondería con 0V al vástago completamente retraído y cuando este extendido completamente corresponderá un voltaje de 5V.

Las señales necesarias que se deben aportar o se deben recibir de los motores se han centralizado en 3 filas una por motor de 5 pines cada una, con el fin de facilitar la conexión de estos. Los conectores de los motores cuentan con 5 cables que tienen las siguientes funciones:

- Naranja: Referencia negativa del potenciómetro incluido (conectado a tierra).
- Morado: Cursor del potenciómetro. Este cable nos proporcionará la información necesaria para saber la posición del motor.
- Rojo: Alimentación (máx. 15V voltaje de la batería).
- Negro: Tierra.
- Amarillo: Referencia positiva del potenciómetro (en este caso, 5V)

El microcontrolador cuenta con ciertos pines capaces de leer voltajes analógicos. A pesar de esto, estas señales analógicas deben ser transformadas en señales digitales. Para ello cuenta con un conversor analógico-digital en el cual tomaremos los datos de voltaje medidos por la variación del potenciómetro.

Se utiliza el integrado L293B que se lo usa en la mayoría de las aplicaciones orientadas a Robótica que necesitan controlar y generar movimientos. En la siguiente tabla de verdad se muestra

que sucede al variar el nivel de tensión (alto y bajo) en los pines Enable permitiendo controlar el sentido de giro de los motores.

Enable Pin1	Pin 2	Pin 7	Sentido de Giro
1	0	0	Freno Libre
1	0	1	Derecha
1	1	0	Izquierda
1	1	1	Freno Brusco

Figura 57. Tabla de verdad L293D

Fuente: (Veloso, 2016)

Para controlar la velocidad del motor nos basamos en la técnica PWM (Modulación por ancho de pulso), que básicamente consiste en “apagar” y “encender” la señal de entrada de manera de reducir la potencia suministrada al motor.

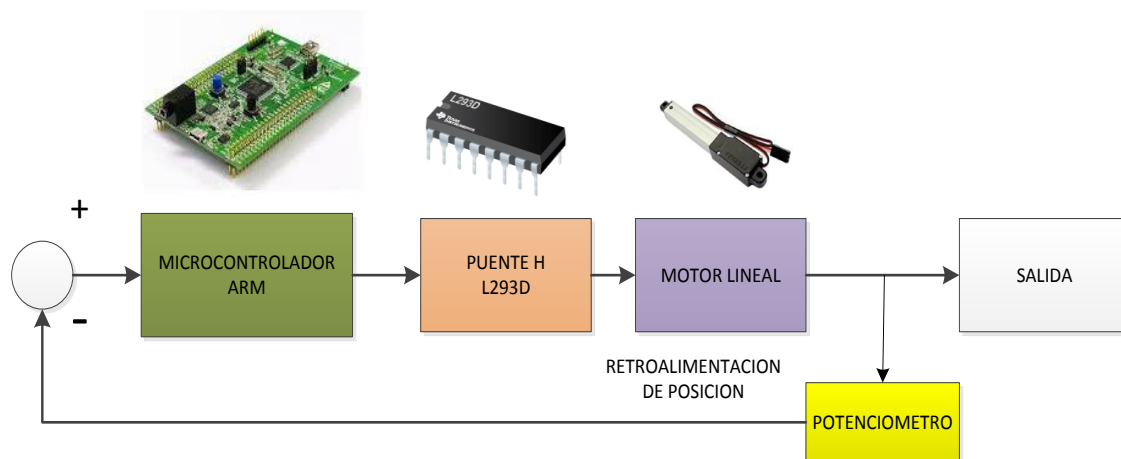


Figura 58. Diagrama de Control para Motores Lineales

3.5 Módulo de control

En esta etapa debe se debe contar con los microcontroladores que se encarguen de tomar decisiones y activar el sistema completo. Un microcontrolador ARM STM32F407 cuenta con las características más que suficientes para poder llevar a cabo la función de controlar el sistema completo, ya que las lecturas de las conversiones de analógico a digital lo hacen en 12 bits lo cual

mucho es mejor a lo ofrecido por otros microcontroladores como AVR o PIC. Además, tiene mayor capacidad y velocidad de transmisión haciéndolo ideal para esta aplicación.

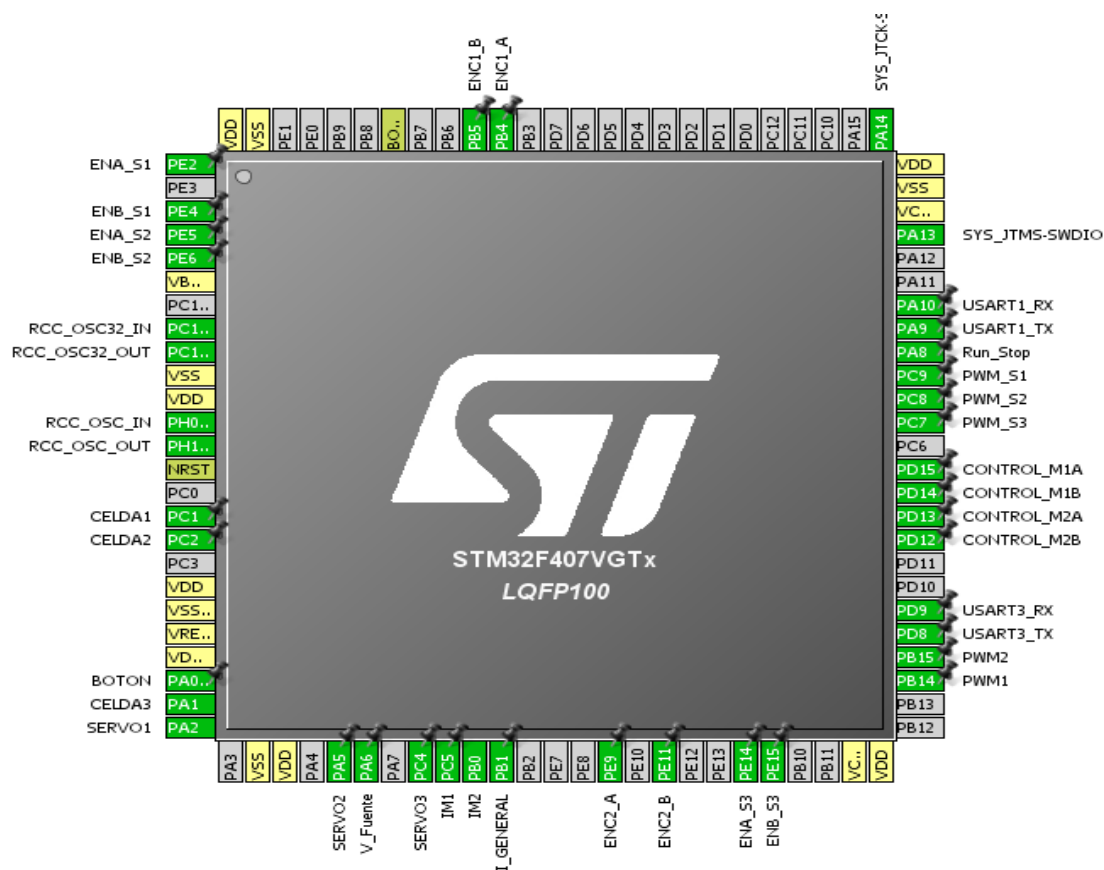


Figura 59. Detalle de pines utilizados para el proyecto

En este esquema se puede observar la configuración y distribución de pines que se añadió en STM Cube en la cual se coloca las entradas y salidas analógicas y digitales que se requieren para el control del robot.

En la imagen se puede observar los pines utilizado para la programación configurados de acuerdo a las necesidades. Primero se selecciona las entradas analógicas que permitirán recibir la información de:

Las tres celdas de Carga (CELDA 1, CELDA 2, CELDA 3), Voltaje de la batería, corriente

general, corriente motor izquierdo y derecho, realimentación del potenciómetro de los tres servomotores lineales. En total tenemos 10 entradas analógicas las cuales se configuran en STM Cube. Para la lectura de los potenciómetros internos de cada motor lineal tenemos que utilizar entradas análogas del microcontrolador.

3.5.1 Método de programación del microcontrolador ARM

Existen tres métodos o tipos de programación más conocidos como lo son por sondeo, por interrupciones y por DMA.

Programación por Pulling. - Consiste en programar instrucciones de tal forma que la secuencia se la haga en orden de arriba hacia abajo. Método que complica en ciertas aplicaciones que requieran de varios eventos que sucedan al mismo tiempo.

Programación por Interrupciones. - Es una herramienta interesante a la hora de programar debido a que permite interrumpir el programa principal para atender una sub rutina generada por una interrupción interna o externa, permitiendo atender la interrupción con prioridad y luego regresar a donde se dejó el programa principal para continuar con su ejecución.

En ARM tiene una característica muy particular de un sistema Operativo que es el manejo de prioridades de las interrupciones el cual está disponible en un vector llamado NVIC.

Programación por DMA. - Siglas de Acceso Directo a la Memoria y permite el manejo de los periféricos de la tarjeta, la característica principal de este periférico es que puede hacer transferencias llevando información directamente entre un periférico como USART, ADC, Memorias o incluso con el CPU principal sin que el programa principal sea interrumpido.

Se lo usa para acelerar ciertas operaciones de transferencia de datos ya que el DMA aunque consume bus, no consume CPU.

Este método puede ser utilizado juntamente con el método de interrupciones dando un

mejor manejo de las variables y facilitar el procesamiento, por lo que para el control del proyecto se utilizará los tres métodos para optimizar los recursos que ofrece el microcontrolador dando la ventaja de ayudar a proteger las tareas críticas y los datos del sistema operativo.

Cortex-M3 posee interrupciones y excepciones externas del sistema hasta 240 a través de los periféricos. Cortex-M3 soporta la inclusión de prioridades en las excepciones y el anidamiento por lo que una interrupción de mayor prioridad puede quitar el uso de la CPU a una interrupción de menor prioridad. Algunas excepciones incluyen el manejo de fallos en el sistema.

3.5.2 Timers

Se cuenta con 14 Timer de los cuales se tienen varios modos de operación, exclusivamente para el proyecto se usa el Timer 4 y 5, uno para verificar el número de pulsos para los encoder y realizar el control on off. El timer 5 verifica cada 5ms si llego a la posición deseada.

Para comenzar a trabajar con nuestro Timer solo basta con indicar la fuente del reloj interna, como se muestra en la imagen 5. Una vez seleccionado el Timer, el nombre debe de cambiar a color verde, indicando que está en uso.

Tras esto pasamos a la pestaña “Configuración” y ahí configuramos el control del TIM4. Dentro de la pestaña de “Parameter Settings” hay 3 parámetros numéricos que debemos entender para configurarlos correctamente.

Prescaler (PSC – 16 bits value)

Con este valor podemos fijar la frecuencia del reloj asociado al Timer dividiendo la frecuencia del reloj de sistema.

Counter Period (AutoReload Register – 16 bits value)

Será el valor en el cual nuestro Timer saltará y nos avisará de alguna forma, ya sea reiniciándose o lanzando una interrupción, etc.

3.5.3 Puertos GPIO

Es necesario configurar los pines de entrada y salida de la tarjeta, para el proyecto como entrada tendremos un botón paro de emergencia para detener el movimiento; necesitaremos asignar como salidas los pines Enable de los drivers para el funcionamiento tanto de los motores tracción como los tres motores lineales, estos pines permiten dar el sentido de giro de los motores, a cada uno se los designa como se muestra a continuación: CONTROL_M2B, CONTROL_M2A, CONTROL_M1B, CONTROL_M1A, ENA_S1, ENB_S1, ENA_S2, ENB_S2, ENA_S3, ENB_S3.

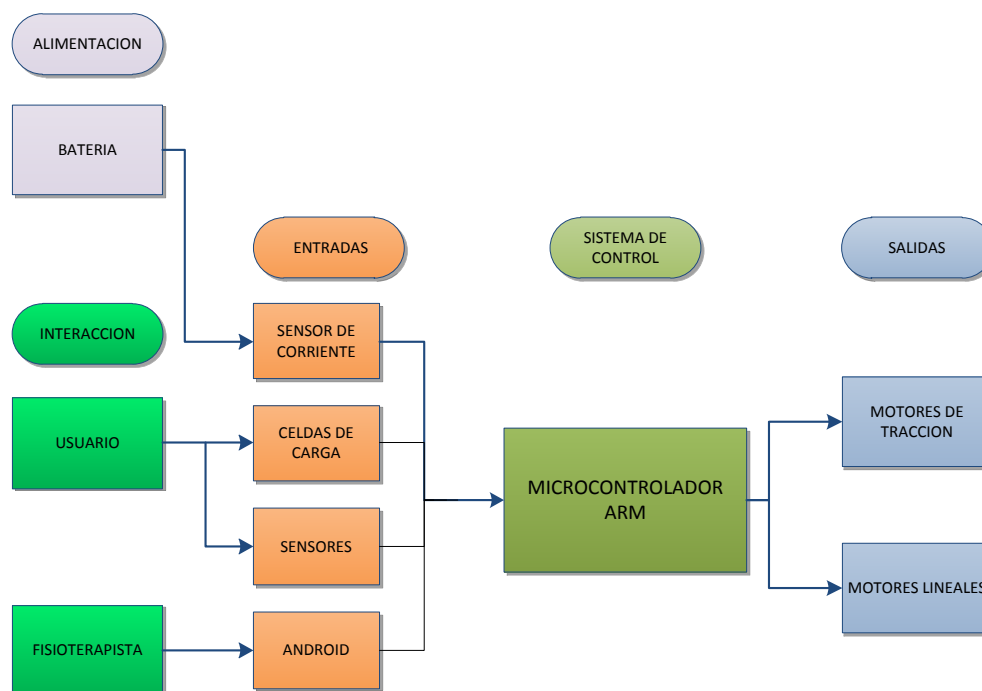


Figura 60. Diagrama de Bloques del Sistema Electrónico

3.6 Diseño de las placas

El dispositivo debe ser de pequeñas dimensiones por lo cual las placas deben ser lo más reducidas posibles, lo más compacto posible y que cumpla con las tres etapas mencionadas anteriormente,

fuente de alimentación, módulo de potencia y control. El Diseño de las placas fue realizado en el software ISIS 8.1 SP1, en la cual las tarjetas tienen por medidas de 130 mm x 110 mm. El diseño se muestra en el Anexo 2.

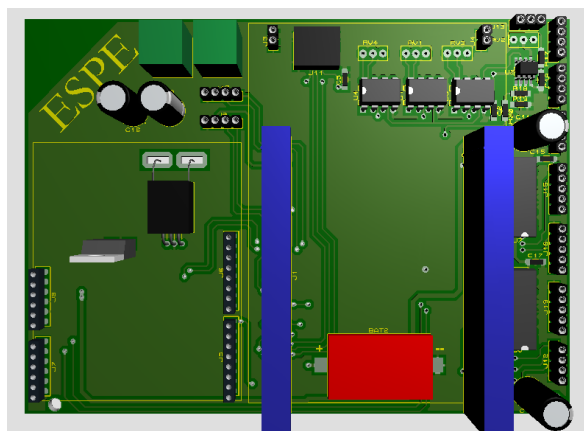


Figura 61. Diseño 3D del PCB

Luego del Diseño se procede a la elaboración de la Placa PCB en baquelita, se realiza las perforaciones necesarias para los pines y por último se suelda cada uno de los componentes, el resultado final se detalla (Ver Figura 57).

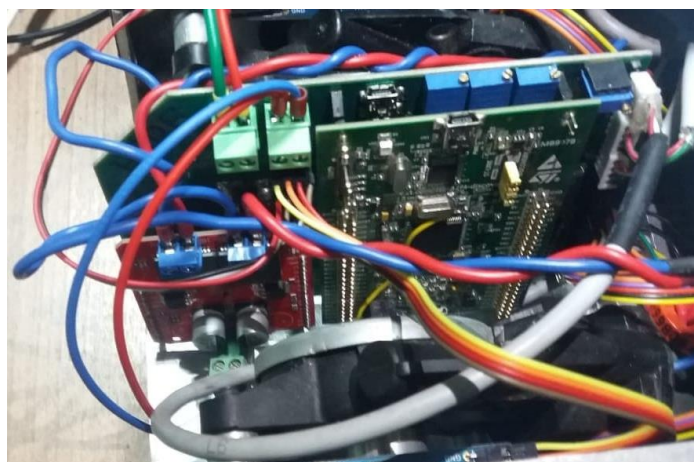


Figura 62. Placas electrónicas acopladas en la plataforma



Figura 63. Diseño completo del bastón Robótico

3.7 Interfaz de control con Android

Para interactuar con el sistema podríamos usar un Smartphone con su respectiva aplicación lo cual nos puede obviar del uso de controles remotos extras, teclados extras y principalmente tener un control remoto del robot sin necesidad de conexiones.



Figura 64. Interfaz de control con Android

La aplicación fue desarrollada en APP Inventor, es una aplicación personalizada para el sistema ya que se usa un módulo Bluetooth en el código fuente para conectarse al dispositivo desde un Smartphone, teniendo así botones que permitan la interacción con el robot, además la aplicación

cuenta con la opción de ingresar Datos necesarios para el funcionamiento del robot como: Peso de la persona, % de peso a aplicar, distancia a recorrer.

Además, en la aplicación se recibe datos como Pesos medidos de las Galgas Extensiométricas, Voltaje de la batería para realizar la respectiva carga.

Para interactuar con el robot se implementó una aplicación para Android debido a que esta gama de celulares es la más utilizada que se encargará de comunicarse por UART ya que es el protocolo el cual entiende el módulo y que se lo ha determinado como persistente ya que está a la espera o se detiene hasta que el módulo le responda.



Figura 65. Funciones de la aplicación de Android

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO

4.1 Pruebas de la fuente de alimentación

Es muy importante luego de que las placas sean fabricadas sean probadas de tal manera que se pueda comprobar su correcto funcionamiento. La fuente es de vital importancia y debe ser comprobada ya que debe cumplir con los voltajes y corrientes requeridos ya que un exceso podría provocar daños en los dispositivos conectados a las placas.

Se realizan pruebas de la corriente consumida por todo el prototipo la cual alcanza los 3 A, lo cual indica que la batería utilizada en este proyecto nos proporcionara una autonomía de una hora más que suficiente para realizar las pruebas.

La batería nos da un voltaje de 14.8 V nominalmente, por lo cual la tarjeta de la fuente debe ser capaz de soportar este voltaje y reducirlo a cada valor de voltaje que se requiere como se explicó en la sección 3.

Se verifica que los voltajes generados por la fuente mantienen niveles adecuados

- La batería a plena carga nos da un máximo de 16.8 V a la entrada por lo que hay que tener muy en cuenta para no tener problemas.
- La fuente de 5V genera 5.03 Voltios.
- La fuente de 3V la obtenemos directamente de la tarjeta de control, la cual nos da 3.3V exactos.

4.2 Caracterización de la celda de carga

Para caracterizar las celdas de carga se utilizan pesos conocidos previamente para calibrar la salida, para la primera prueba la celda de carga estaba libre de peso y fijada en una posición. A continuación, se procede a colocar los pesos y tomar los voltajes de salida obtenidos luego del acondicionamiento de señal, los resultados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 16
Datos del ADC del microcontrolador

PESO	extrapolación	ADC1	ADC2	ADC3
(Kg)				
0	0	2	4	2
2	8000	49	49	51
4	16000	96	94	92
6	24000	137	135	132
8	32000	171	173	178
10	40000	204	204	212

A partir de estos datos obtenidos se procede a realizar la gráfica de la curva producida para encontrar la ecuación característica de cada celda; ya que no es una curva lineal por lo que se debe ingresar esta ecuación en la programación del Microcontrolador con el fin de que se muestre el PESO medido correctamente en la LCD.

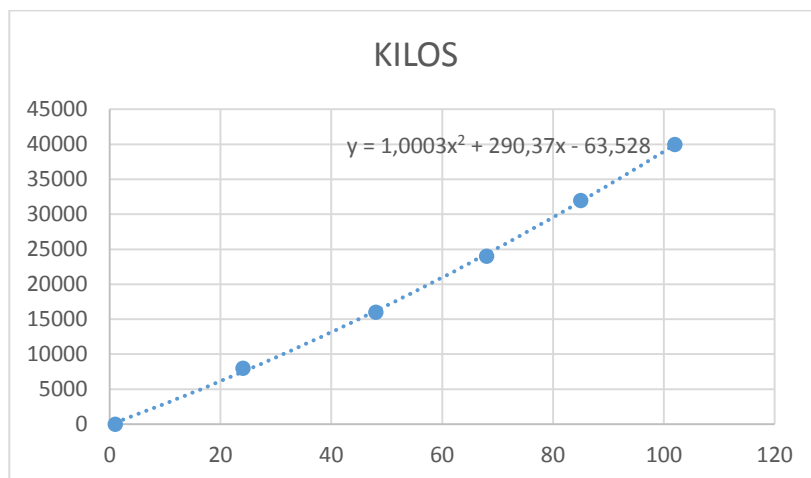


Figura 66. Curva de reacción Celda 1

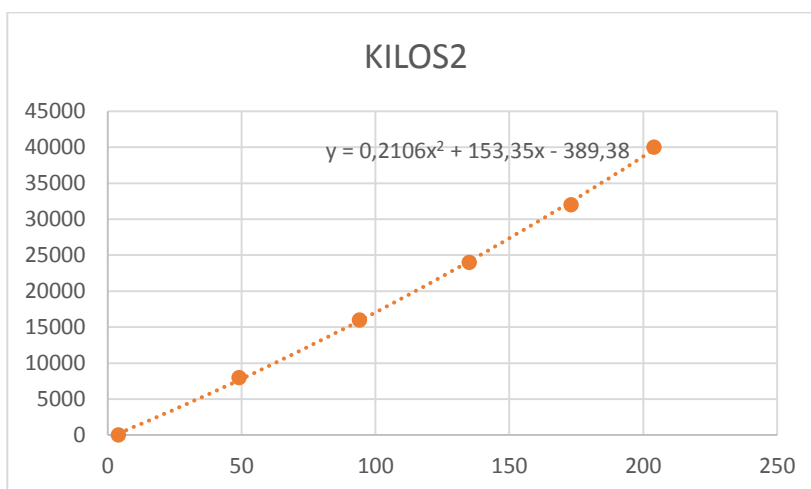


Figura 67. Curva de reacción Celda 2

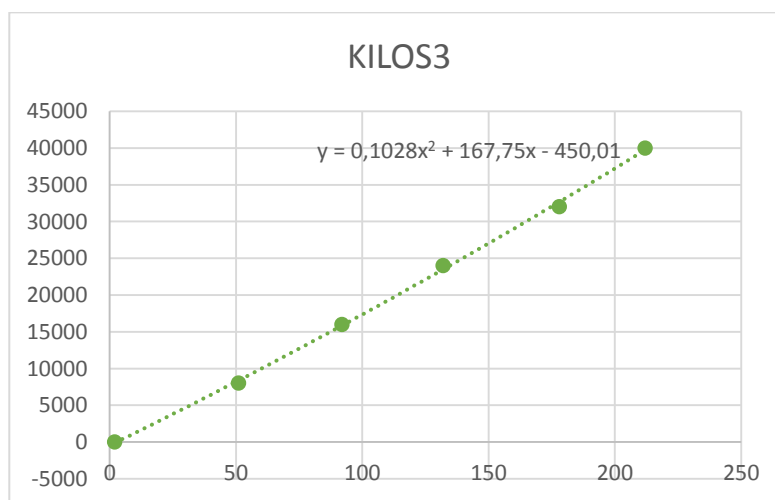


Figura 68. Curva de reacción Celda 3

Debido a que las tres celdas están distribuidas mecánicamente a distancias iguales y el peso se aplica en centro de estas, el peso total aplicado se distribuye uniformemente a las tres celdas.

Tabla 17

Medición de celdas de carga

PESO gr (Real)	Peso 1 (Celda Central)	Peso 2 (Celda Izquierda)	Peso 3 (Celda Derecha)	Peso Total	%Error
0	0	0	0	0	0
2000	8000	7684	3241	18925	0,89
4000	0	11929	11726	23655	0,83
6000	0	21333	13366	34699	0,82
8000	2666	2666	2666	7998	0,1
10000	1757	1251	1322	4330	1,31

4.3 Medición del desplazamiento

La resolución de los encoders utilizados por la plataforma es 36 posiciones, el perímetro de las ruedas se calcula con la fórmula:

$$P = 2\pi * R$$

$$P = 2\pi * (0.0762m) = 0.48 m$$

Una regla de tres simple revela que los encoders deben contar 72 pulsos por cada metro desplazado. Para verificar la resolución, precisión y exactitud de los encoders se miden los pulsos entregados para diferentes desplazamientos de la plataforma sobre una superficie plana de concreto.

1 pulso = 0.006894 m

Para el control de los motores de tracción se requiere que el dispositivo avance en línea recta para lo cual se tiene los encoder en donde cuenta el número de pulsos, se realiza un Control ON OFF con una potencia variable que puede ser fijada por el usuario. Se produce un pulso cada 5ms.

Tabla 18
Pruebas de encoder

Desplazamiento (m)	Ciclo de Trabajo	Pulsos Reales	Pulsos Experimentales	Error (%)
1	20	148	145,05	2,03
2	20	293	290,11	1,00
3	20	437	435,16	0,42
4	20	582	580,21	0,31
5	20	727	725,27	0,24
6	20	871	870,32	0,08
7	20	1017	1015,4	0,16
8	20	1162	1160,4	0,14
9	20	1307	1305,5	0,12
10	20	1452	1450,5	0,10

Al realizar las Pruebas para diferentes ciclos de trabajo y velocidad el número de pulsos experimentales se obtiene el mismo valor por lo que los porcentajes de error se mantienen para

cada velocidad. En la figura 68 se puede ver que los datos no varían significativamente y en error es mínimo.

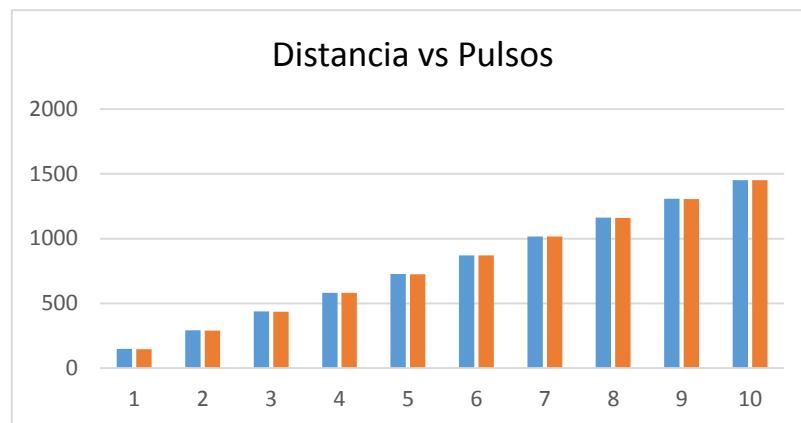


Figura 69. Pulsos medidos


Pruebas de velocidad lineal y maniobrabilidad con carga

Para verificar el comportamiento del dispositivo, se ubican diferentes valores de ciclo de trabajo, tal como se observa en la Tabla

Tabla 19

Pruebas Piso Liso

Superficie: Piso Liso – Distancia (3 m)							
Peso (kg)	Ciclo de Trabajo	Tiempo (s)	Velocidad Real (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad Real (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad Real (m/s)
0	20	18,55	0,162	18,86	0,159	18,82	0,159
0	30	10,55	0,284	10,59	0,283	10,69	0,281

CONTINÚA 

0	40	7,64	0,393	7,87	0,381	7,59	0,395
0	50	6,25	0,480	5,99	0,501	5,93	0,506
0	60	5,14	0,584	5,06	0,593	5,02	0,598
0	70	4,68	0,641	4,6	0,652	4,49	0,668
0	80	4,72	0,636	5,06	0,593	4,68	0,641
0	90	3,6	0,833	4,08	0,735	4,07	0,737
0	100	3,1	0,968	3,12	0,962	3,15	0,952
4	30	11,31	0,265	11,12	0,270	0,25	12
8	30	13,63	0,220	13,46	0,223	13,5	0,22
12	30	15,37	0,195	15,5	0,19	15,73	0,19

4.4 Autonomía

Se puede evaluar la autonomía del dispositivo por medio del tiempo que se mantenga en funcionamiento continuo para el caso se probó el traslado con diferentes pesos a distintas velocidades como se ve en la tabla. Es importante verificar que las baterías estén completamente cargadas.

4.5 Validación de la hipótesis.

4.5.1 Planteamiento de la hipótesis

El bastón robótico permite leer la intención de movimiento del usuario

4.5.2 Validación de la hipótesis


De acuerdo con los resultados presentados en las tablas 15, 16, 17, la hipótesis es aceptada como cierta validando la maniobrabilidad de la plataforma móvil al realizarse pruebas satisfactorias en varias direcciones de movimiento.

4.6 Costos de los materiales

Para la elaboración del prototipo demostrativo del sistema de seguridad se incurrió en gastos para la adquisición de módulos y componentes electrónicos, herramientas, servicios, etc.

Tabla 20
Lista de precios

LISTA DE PRECIOS DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE SEGURIDAD			
Componentes Electrónicos			
MATERIALES	CAN	P.U.	TOTAL
	T.		
Tarjeta STM32F407VCT Discovery F4	1	50,00	50,00
LM358	2	4,00	8,00
L293D	3	1.50	4.50
Amplificador operacional AD620	3	8,50	25,50
Tarjeta de Memoria microSD 16 GB (Pruebas)	1	20,00	20,00
Potenciómetros	8	1,00	8,00
Sócalos	6	1,00	6,00
Espadines	4	0,50	2,00
30 resistencias SMD	1	0,10	3,00

CONTINÚA 

Capacitores electrolíticos	7	2,00	14,00
Capacitores cerámicos	14	0,50	7,00
Reguladores a 3,3 V	2	2,50	5,00
Reguladores a 5 V	4	0,80	3,20
Modulo Bluetooth HC-05	1	30,00	30,00
Batería Lipo 4S	1	85,00	85,00
Potenciómetros lineales	3	1,50	4,50
Motores lineales	3	100,00	300,00
1 kit Motor a 12 V a 5 A	1	400,00	400,00
Costo importación componentes	1	500,00	500,00
Impresión placas	1	65,00	65,00
Sub Total 1			1538,70
Componentes Mecánicos			
Electrodos para aluminio	12	1	12
Perfil de aluminio (6 m cada uno)	2	15,00	30,00
Alucobond	1	70,00	70,00
Eje de acero	1	1,00	1,00
Costo por hora uso Maquinado en torno	1	80,00	80,00
Costo por hora uso Soldadura MIG	1	50,00	50,00
Plancha de hierro 3 mm	1	5,00	5,00
Sub Total 2			248,00
TOTAL			1786,70

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La importancia del proyecto es de provocar en el usuario una sensación de inmersión y de proporcionarle la posibilidad de interactuar con el dispositivo, pudiendo establecer entre el usuario y el bastón robótico una transferencia bidireccional y en tiempo real de información.
- La configuración de las entradas analógicas con el periférico DMA permiten reducir el código permitiendo añadir varias funciones de control automático ya que habilitar la funcionalidad una sola vez al inicio en el microcontrolador hacen que sea casi instantánea la disponibilidad de los datos en cualquier punto del programa principal.
- Se comprobó que el diseño soporta el peso máximo establecido en los parámetros de 11.56 kg incluso hasta 14kg con lo que se puede demostrar que el bastón puede ser utilizada con personas de hasta un peso de 93 kg.

5.2 Recomendaciones

- Después de un análisis y tras las pruebas realizadas se recomienda para las nuevas aplicaciones que el robot tenga ruedas omnidireccionales que le permita tener mayor maniobrabilidad y pueda girar con mayor fluidez.
- Se puede considerar un material más resistente para la fabricación de la estructura base, de tal modo, que sea capaz de soportar una mayor carga y, por lo tanto, su deformación sea menor.
- Como recomendación se puede establecer que para el uso del bastón pueda funcionar para cargas mucho mayores y para que lo usen personas con peso excesivo, es necesario el

cambio de los motores lineales por unos con una caja reductora con relación más grande de 100 a 1 que permita soportar cargas más pesadas y el bastón no ceda.

- Para futuras aplicaciones se recomienda incorporar un algoritmo de control mucho más avanzado que permita la navegación autónoma del dispositivo para desplazarse de forma automática hacia un punto específico a través de una trayectoria definida incluyendo sensores que le permita detectar obstáculos y corregir su movimiento sin la necesidad de la intervención de un operador externo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Actuonix. (12 de febrero de 2018). *Actuadores*. Recuperado el 14 de Marzo de 2018, de Actuadores: <https://www.actuonix.com/L16-Linear-Actuators-p/116-p.htm>
- Andaluz, G. (2011). *Modelación, identificación y control de Robots Móviles*. Quito: Politecnica Nacional.
- Angulo, R. (2005). *Introducción a la Robótica*. Madrid: Thomson. Recuperado el 2016 de Abril de 25
- ARDUINO. (10 de Septiembre de 2015). *Arduino Mega 2560*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2017, de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- Ávila, R., Prado, L., & Gonzalez, E. (2007). *Dimensiones Antropométricas de población latinoamericana*. Guadalajara: Centro de Investigaciones en Ergonomía.
- Barrientos, A., Penín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGRAW-HILL.
- Borenstein, U. J. (1997). *The GuideCane — A Computerized Travel Aid for the Active Guidance of Blind Pedestrians*. Albuquerque: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de <http://www.cs.cmu.edu/~iwan/papers/guidecane.pdf>
- Cerda, L. (20 de Febrero de 2016). *RedClinica*. Recuperado el 14 de Octubre de 2017, de Evaluación del paciente con trastorno de la marcha: https://www.redclinica.cl/Portals/0/Users/014/14/14/Publicaciones/Revista/evaluacion_paciente_con_trastorno_marcha.pdf
- Chao, F.-L., & Tsai, C.-C. (2011). *Ergonomic Consideration of Walking Guidance Design*. Taiwan: International Conference on Service and Interactive Robots.
- Di, P., & Huang, J. (2011). *Motion Control of Intelligent Cane Robot under Normal and Abnormal Walking Condition*. Atlanta.
- DIDEL. (10 de Febrero de 2015). *Optical encoder*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2017, de DIDEL: <http://www.didel.com/microkit/encoder/Encoder.html>
- Dimension Engineering. (12 de Enero de 2015). *A beginner's guide to accelerometers*. Recuperado el 10 de Enero de 2018, de Dimension Engineering: <http://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>
- Electronilab. (Febrero de 2015). *Electronilab Ingenieria y diseño electrónico*. Recuperado el 12 de Octubre de 2016, de Electronilab Ingenieria y diseño electrónico: <http://electronilab.co/tienda/sensor-de-distancia-de-ultrasonido-hc-sr04/>
- ELECTRONILAB. (8 de Diciembre de 2016). *Tutorial: Uso de driver L298N para motores DC y paso a paso con Arduino*. Obtenido de ELECTRONILAB:

<http://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>

FRITZING. (8 de Mayo de 2015). *Parts*. Obtenido de Fritzing: <http://fritzing.org/parts/>

Frizera, N. (2010). *Interfaz multimodal para modelado, estudio y asistencia a la marcha humana*. Alcalá: Universidad de Alcalá.

Gómez, J., Ollero, A., & García, A. (2006). *Teleoperación y Telerrobótica*. Madrid: Pearson Education.

Hobbyking. (s.f.). *HOBBY WORLD*. Recuperado el 16 de Marzo de 2017, de HOBBY WORLD: https://hobbyking.com/en_us

Huang, J., Fukuda, T., & Matsuno, T. (22 de Septiembre de 2008). Motion Control of Omni-Directional Type Cane Robot Based on. *Intelligent Robots and Systems*, 273-278.

Intelitek. (1995). *SCORBOT-ER III, User's manual*. Manchester, NH: Intelitek.

Jones, J., Flynn, A., & Seiger, B. (2010). *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*. AK.

JRRD. (5 de Octubre de 2003). Intelligent walkers for the elderly: Performance and safety testing of VA-PAMAID robotic walker. *Research Development*, págs. 423-432.

Kyaserv. (2016). *KYASERV Balanzas y Servicios*. Obtenido de KYASERV Balanzas y Servicios: <http://kyaserv.com.ar/web/celdas-de-carga-keli/>

Lavado, J. J. (2015). *Sistema mecatrónico de asistencia técnica para las personas de edad avanzada*. Lima, Perú: Universidad Católica.

Lawrence, A. (2008). *Demonstration of Active Guidance with SmartCane*. Los Angeles: ASCENT Lab, Electrical Engineering Department.

LINAK. (20 de Agosto de 2016). Obtenido de LINAK: <http://www.linak.es/about/?id3=4283>

Matthew, S., Haoyong, Y., & Dubowsky, S. (2006). *Robotic Personal Aids for Mobility and Monitoring for the Elderly*. IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING.

Monllor, M. (2015). *Diseño de un bastón robotizado para asistencia a personas con discapacidades*. San Juan, Argentina: IEEE.

MouserElectronics. (6 de Agosto de 2018). *Industria Embebida Hoy*. Obtenido de Industria Embebida Hoy: <https://www.industriaembebidahoy.com/microcontroladores-con-usb-2-0-y-can/>

Moviles, A. (12 de Junio de 2017). *Apps*. Obtenido de Apps: <http://appmoviles.net/que-es-el-app-inventor-para-que-sirve/>

Najarro, C. d. (2011). *Puesta en marcha del sensor fuerza/par JR3*. Madrid.

- Nakagawa, S. (2014). *Intelligent cane control based on estimation of the human states*. Chicago, USA, Korea: IEEE.
- Neto, A. F. (2010). *Interfaz multimodal para modelado, estudio y asistencia a la marcha humana*. Alcalá: Unica.
- Pallas, A. (1993). *Adquisición y distribución de señales*. Barcelona España: Marcombo.
- Parallax. (15 de Febrero de 2015). *Memsic 2125 Dual-axis Accelerometer*. Obtenido de Parallax: <http://learn.parallax.com/KickStart/28017>
- Pioneer. (12 de Mayo de 2015). *www.movilerobots.com*. Recuperado el 2016 de Mayo de 12, de *www.movilerobots.com*: <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/P3AT.aspx>
- Rentschler, A. J., & Cooper, R. A. (25 de Marzo de 2016). *Journal of Rehabilitation Research Development*. Obtenido de Journal of Rehabilitation Research Development: <http://www.rehab.research.va.gov/jour/03/40/5/rentschler.html>
- Robotnik. (16 de Febrero de 2016). *Robotnik*. Obtenido de Robotnik: <http://www.robotnik.es/articulos-robotica/actuadores-dynamixel-pro/>
- Tiempo, P. E. (27 de Julio de 2016). Ecuador está en el tercer puesto de los países con menor estatura en Sudamérica. *Periodico El Tiempo*.
- TotalWeight. (2018). *www.totalweight.com*. Obtenido de *www.totalweight.com*: https://www.totalweight.com/celdas_carga.php
- Urbina, R. (24 de Marzo de 2016). *Dokumen.com*. Recuperado el 14 de Abril de 2018, de *Dokumen.com*: <https://dokumen.tips/documents/celdas-de-carga-567fdb842ec02.html>
- Valadao, C. (2 de Diciembre de 2015). Obtenido de preTexto: <http://www.pretexto.unsj.edu.ar/2012/23-11-2012-01.php>
- Veloso, C. (09 de Marzo de 2016). *Como funciona el puente H L293B*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2017, de ETools.

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue realizado por el señor **Jorge Gabriel Ortiz Colcha**

En la ciudad de Latacunga, a los 06 días del mes de septiembre del 2018.

Aprobado por.

Ing. Oscar B. Arteaga L.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo C.

DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO