



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA
ROBÓTICA MÓVIL INALÁMBRICA CON TRACCIÓN
INTERCAMBIABLE PARA EL LABORATORIO DE
MECATRÓNICA DE LA ESPE-L**

AUTOR: PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO

DIRECTOR: ING. ERNESTO SANTILLÁN

CODIRECTOR: ING. MARCO SINGAÑA

LATACUNGA

2016




DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN


Certificamos que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL INALÁMBRICA CON TRACCIÓN INTERCAMBIABLE PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA ESPE-L**” realizado por el señor **PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto permitimos acreditarlo y autorizar al señor **PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO** para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 11 de enero de 2016



Ing. Ernesto Santillán

DIRECTOR



Ing. Marco Singaña

CODIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO**, con cédula de identidad N° 1719201772, declaro que este trabajo de titulación **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL INALÁMBRICA CON TRACCIÓN INTERCAMBIABLE PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA ESPE-L”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 11 de enero de 2016

PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO

C.C.: 1719201772



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MÓVIL INALÁMBRICA CON TRACCIÓN INTERCAMBIABLE PARA EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA ESPE-L**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Latacunga, 11 de enero de 2016

PAÚL ISAÍAS TINIZARAY ROMERO

C.C.: 1719201772

DEDICATORIA

v

Dejada intencionalmente en blanco

AGRADECIMIENTO

vi

Dejado intencionalmente en blanco

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE	1
1.1 Robot móvil.....	1
1.2 Escaladores de gradas	1
1.2.1 Escaladores de gradas con ruedas	1
1.2.2 Escaladores de gradas con orugas	2
1.2.3 Escaladores de gradas con patas.....	3
1.3 Actuadores para robots móviles	3
1.4 Sensores para robots móviles	5
1.4.1 Encoder	6
1.4.2 Magnetómetro.....	7
1.4.3 Acelerómetro	8
1.5 Dispositivos de control para robots móviles.....	8
1.5.1 Microcontroladores	8
1.5.2 Tarjetas de desarrollo	9

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL MÓDULO MECÁNICO	11
2.1 Requisitos de diseño del módulo mecánico	11
2.2 Entornos de trabajo	11
2.3 Escaladores de gradas comerciales	12
2.4 Selección de la morfología	13
2.5 Análisis dinámico de la plataforma	14
2.5.1 Fase 1	16
2.5.2 Fase 2	21
2.5.3 Fase 3	25
2.5.4 Fase 4	25
2.5.5 Fase 5	26
2.5.6 Fase 6	27
2.6 Selección de los actuadores	30
2.7 Cálculo de la reducción mecánica	32
2.8 Cálculo del diámetro mínimo de los ejes	34
2.9 Selección de las chumaceras	38
2.10 Selección de las ruedas	38
2.11 Diseño de las orugas	39
2.12 Análisis de esfuerzos	40
2.12.1 Análisis de esfuerzos sobre el eje motriz	40
2.12.2 Análisis de esfuerzos del soporte del motor	41
2.12.3 Análisis de esfuerzos del chasis inferior	42
CAPÍTULO III	
CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO MECÁNICO	45

3.1	Mapas de fabricación y ensamblaje.....	45
-----	--	----

CAPÍTULO IV

	DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL	53
4.1	Requisitos de diseño del módulo de control	53
4.2	Hardware de control	53
4.2.1	Tarjeta de control.....	53
4.2.2	Controlador para motor.....	54
4.2.3	Dispositivo de comunicación.....	54
4.2.4	Encoders.....	55
4.2.5	Circuito de distribución de voltaje	55
4.2.6	Baterías	56
4.3	Software de control.....	56

CAPÍTULO V

	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL	58
5.1	Asignación de pines en la Arduino Mega.....	58
5.2	Configuración de los Xbee.....	58
5.3	Construcción de los encoders.....	59
5.4	Construcción del circuito de distribución.....	59
5.5	Comunicación Arduino – Python.....	59
5.5.1	Instalación de la IDE de Arduino.....	59
5.5.2	Instalación de Python.....	60
5.5.3	Instalación de VPython	60
5.5.4	Instalación de PiP	60
5.5.5	Instalación de PyFirmata	60
5.5.6	Instalación del protocolo Firmata en Arduino.....	61

5.5.7	Creación de programas para Arduino en Python	61 ^x
-------	--	-----------------

CAPÍTULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS	63	
6.1	Carga útil	63
6.2	Velocidad	63
6.3	Autonomía	64
6.4	Corrección del coeficiente de rodadura	65
6.5	Corrección del coeficiente de rozamiento	65
6.6	Altura máxima del obstáculo	66
6.7	Brecha máxima	67
6.8	Medición del desplazamiento	68
6.9	Medición de la velocidad	69
6.10	Distancia máxima de conexión	70
6.11	Verificación de la hipótesis	70

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73	
7.1	Conclusiones	73
7.2	Recomendaciones	74

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
---	-----------

ANEXOS	79
---------------------	-----------

Anexo 1. Resolución del sistema de ecuaciones correspondiente a la fase 1 del análisis dinámico

Anexo 2. Resolución del sistema de ecuaciones correspondiente a la fase 2 del análisis dinámico

Anexo 3. Características del motor MY1018 de 24V y 250W

Anexo 4. Características de las chumaceras NBR tipo brida de dos agujeros

Anexo 5. Características de los neumáticos IMSA

Anexo 6. Características del material de las orugas

Anexo 7. Planos del módulo mecánico

Anexo 8. Disipador de calor para Monster Moto Shield

Anexo 9. Hoja de datos de la batería FAMMA modelo SW12120

Anexo 10. Encoder de 30 ppr para la plataforma robótica

Anexo 11. Importación de librerías adicionales en la IDE de Arduino

Anexo 12. Circuito distribuidor de voltajes

Anexo 13. Soporte del módulo de control

Anexo 14. Enlaces para instalación de software

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los motores de corriente continua.	4
Tabla 2. Controladores para motores de corriente continua.	5
Tabla 3. Sensores para robots móviles.....	6
Tabla 4. Características del entorno de trabajo de la plataforma robótica.	12
Tabla 5. Características de plataformas robóticas comerciales.....	12
Tabla 6. Constantes del entorno para el análisis dinámico.....	17
Tabla 7. Constantes de la plataforma para el análisis dinámico.	18
Tabla 8. Aceleraciones de la plataforma durante la fase 1.	20
Tabla 9. Aceleraciones de la plataforma para la fase 2.	24
Tabla 10. Valores necesarios para el cálculo de las fuerzas generadas en la plataforma durante la rotación.....	28
Tabla 11. Características de motores eléctricos utilizados en aplicaciones móviles.	31
Tabla 12. Cálculo de la fuerza tangencial máxima soportada por la reducción mecánica.	33
Tabla 13. Parámetros necesarios para calcular la tensión inicial de la oruga.....	35
Tabla 14. Cálculo del diámetro mínimo de los ejes de la plataforma.	36
Tabla 15. Parámetros básicos requeridos por Solidworks para realizar análisis de esfuerzos.....	40
Tabla 16. Análisis de esfuerzos del eje motriz utilizando Simulation de Solidworks.....	41
Tabla 17. Análisis de esfuerzos del soporte de motor utilizando Simulation de Solidworks.	42
Tabla 18. Análisis de esfuerzos del chasis inferior utilizando Simulation de Solidworks.	43
Tabla 19. Mapa de flujo de procesos para la fabricación de los eslabones del chasis.....	45
Tabla 20. Mapa de flujo de procesos para la fabricación de los ejes.	46
Tabla 21. Mapa de flujo de procesos para la fabricación de los componentes del soporte de motor.....	47
Tabla 22. Mapa de flujo de procesos para la fabricación del engranaje	

de 60 dientes.	48
Tabla 23. Mapa de flujo de procesos para la fabricación del soporte de baterías.	49
Tabla 24. Mapa de flujo de procesos para la fabricación del chasis.	50
Tabla 25. Mapa de flujo de procesos para la fabricación del soporte de motor.	51
Tabla 26. Mapa de flujo de procesos para el ensamblaje del módulo mecánico.	52
Tabla 27. Requerimiento de voltaje de los componentes del módulo de control.	56
Tabla 28. Distribución de pines de los componentes electrónicos.	58
Tabla 29. Valores de los parámetros de identificación de los módulos Xbee.	59
Tabla 30. Códigos para enlazar Arduino y Python a través del protocolo Firmata.	62
Tabla 31. Cálculo de la velocidad máxima de la plataforma con orugas.	63
Tabla 32. Cálculo de la velocidad máxima de la plataforma con ruedas.	64
Tabla 33. Corriente absorbida por cada motor de la plataforma para ejecutar diferentes actividades.	64
Tabla 34. Pulsos entregados por los encoders para diferentes desplazamientos de la plataforma.	69
Tabla 35. Pulsos entregados por los encoders para diferentes ciclos de trabajo de la señal PWM.	70
Tabla 36. Datos utilizados para la verificación de la hipótesis.	71
Tabla 37. Cálculos realizados para la verificación de la hipótesis.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escalador de gradas con ruedas.	2
Figura 2. Escalador de gradas con orugas.	2
Figura 3. Escalador de gradas con patas.	3
Figura 4. Encoder típico.	7
Figura 5. Microcontrolador Motorola utilizado en un robot sumo.	9
Figura 6. Tarjeta Arduino MEGA utilizada en un robot para navegación autónoma.	10
Figura 7. Escalador de gradas de geometría fija clásico.	13
Figura 8. Escalador de gradas de geometría fija compacto.	13
Figura 9. Dimensiones relevantes de un escalador de gradas de geometría fija.	15
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 1 del escalamiento.	16
Figura 11. Fuerzas generadas en la plataforma durante la fase 1.	21
Figura 12. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 2 del escalamiento.	22
Figura 13. Diagrama de cuerpo de la plataforma durante la fase 3 del escalamiento.	25
Figura 14. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma mientras se desplaza sobre superficies planas.	26
Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma cuando desciende escaleras.	26
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la rotación. ..	27
Figura 17. Valores que intervienen en el cálculo de la altura máxima del obstáculo.	66
Figura 18. Cálculo de la altura máxima del obstáculo que la plataforma puede superar.	67
Figura 19. Valores que intervienen en el cálculo de la brecha máxima.	68

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue desarrollar un robot móvil capaz de desplazarse eficientemente en ambientes interiores y exteriores gracias a la integración de dos sistemas de locomoción: ruedas y orugas. El pilar fundamental del diseño del robot fue el modelado cinético del robot en diferentes escenarios, que aportó los datos de entrada para el dimensionamiento de los actuadores, el diseño del módulo mecánico y el módulo de control. En el módulo mecánico destaca la implementación del sistema de orugas como una transmisión de banda plana a diferencia de los sistemas tradicionales basados en bandas dentadas. La característica más relevante del módulo de control es la implementación de la HMI sobre Python; esto permite que el robot sea operado libremente desde cualquier computadora y desde diferentes sistemas operativos. Como resultado de las pruebas realizadas se concluyó que la configuración de orugas desarrollada es superior a la configuración de ruedas en interiores y exteriores

PALABRAS CLAVE:

- **MECATRÓNICA**
- **ROBOT MÓVIL DE ORUGAS**
- **ANÁLISIS CINÉTICO**
- **PYTHON**

ABSTRACT

The aim of this project was to develop a mobile robot capable of moving efficiently through outdoors and indoors thanks to the integration of two locomotion systems: wheels and tracks. The main of the project was the development of robot's kinetic model in different stages which contributed input data for actuators sizing, mechanical module design and control module design. The conducted test allowed to conclude that the tracks configuration was better than wheels configuration in both indoors and outdoors

KEYWORDS:

- **MECHATRONICS**
- **TRACKED MOBILE ROBOT**
- **KINETIC ANALISYS**
- **PYTHON**

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 Robot móvil

Un robot móvil es un sistema conformado por hardware y software capaz de desplazarse y ejecutar tareas en un entorno definido. Dudek y Jenkin (2010, pág. 31) mencionan que los componentes de este sistema pueden agruparse en las siguientes categorías:

- Locomoción: Componentes que permiten el movimiento del robot.
- Sensorización: Componentes que obtienen información del robot y del exterior.
- Razonamiento: Componentes que convierten la información en acciones.
- Comunicación: Componentes que permiten la comunicación con un operador externo.

1.2 Escaladores de gradas

Los escaladores de gradas constituyen una categoría especial de robots móviles utilizados principalmente en edificios. Estos robots pueden agruparse bajo tres modelos: escaladores con ruedas, escaladores con orugas y escaladores con patas.

1.2.1 Escaladores de gradas con ruedas

Los escaladores con ruedas se caracterizan por ser rápidos, livianos, silenciosos y tener mecanismos sencillos. Como desventaja de este modelo puede indicarse que tienen una pobre capacidad de adaptación al terreno (Woo, 2007, pág. 357). La Figura 1 muestra un escalador de gradas con ruedas.

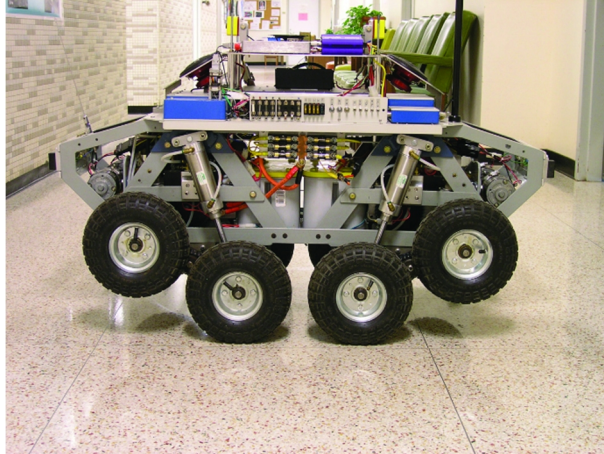


Figura 1. Escalador de gradas con ruedas.

Fuente: (Boucher & Sanchez, 2009, pág. 56)

1.2.2 Escaladores de gradas con orugas

Los escaladores con orugas tienen buen desempeño en ambientes exteriores, alcanzan velocidades aceptables y sus mecanismos no son en extremo complejos. Como desventaja puede mencionarse que son pesados y requieren una elevada cantidad de energía para rotar (Woo, 2007, pág. 357). La Figura 2 muestra un escalador de gradas con orugas.

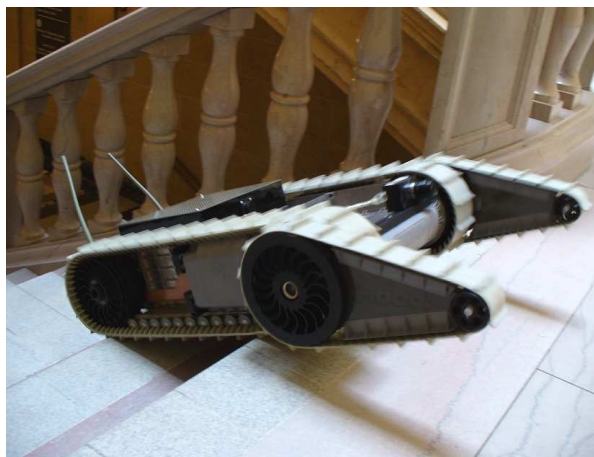


Figura 2. Escalador de gradas con orugas.

Fuente: (Mourikis, 2007, pág. 1)

1.2.3 Escaladores de gradas con patas

Los escaladores con patas son máquinas definitivas para terrenos difíciles donde las demás categorías de robots fallan. Como desventaja puede mencionarse que estos modelos tienen mecanismos de locomoción y control complejos. La Figura 3 muestra un escalador de gradas con patas.

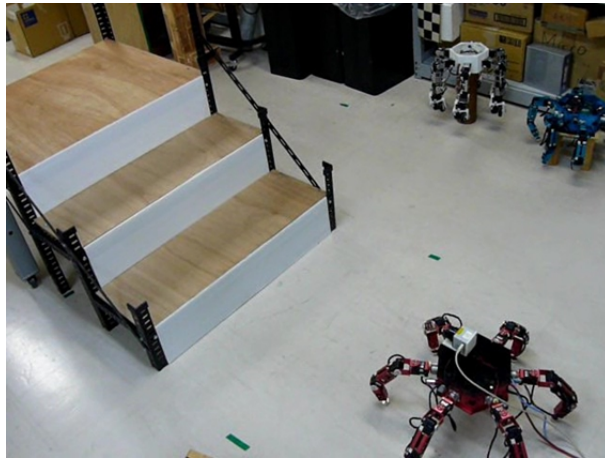


Figura 3. Escalador de gradas con patas.

Fuente: (Arai Laboratory, s.f.)

1.3 Actuadores para robots móviles

De todos los actuadores disponibles para robots móviles, los de mayor utilización son los motores de corriente continua. La Tabla 1 muestra algunas características de estos motores.

Tabla 1

Características de los motores de corriente continua.

Característica	Motor de imanes permanentes	Motor sin escobillas	Motor a pasos
Potencia máxima disponible	Inferior a 1 KW	Superior a 1 KW	Inferior a 1 KW
Potencia de salida/peso	Buena	Mejor que la relación de los motores de imanes permanentes	Buena
Curva Torque/velocidad	Decae rápidamente a altas velocidades	Torque casi constante a altas velocidades	Decae rápidamente a altas velocidades
Eficiencia	Buena	Mejor que la eficiencia de los motores de imanes permanentes	Buena
Circuito mínimo de funcionamiento	No requiere circuito electrónico	Requiere circuito electrónico	Requiere circuito electrónico
Control posición/ velocidad/ sentido de giro	Requiere circuito electrónico simple	Requiere circuito electrónico complejo	No requiere circuito electrónico
Ruido electrónico	Moderado	Bajo	Moderado
Ruido mecánico	Moderado	Bajo	Alto
Mantenimiento	Periódico	Mínimo	Depende de la configuración

Fuente: (Voss, 2007)

Para operar un motor eléctrico de corriente continua es necesario utilizar un circuito controlador. La Tabla 2 muestra circuitos controladores utilizados en diferentes modelos estudiados en la Tabla 1.

Tabla 2

Controladores para motores de corriente continua.

Tipo de motor	Control requerido	Circuito de control
Imanes permanentes	Rotación en un solo sentido	Ninguno
	Inversión de giro	Puente H
	Control de velocidad	PWM
Sin escobillas	Rotación en un solo sentido	Controlador para motor sin escobillas
	Inversión de giro	Controlador para motor sin escobillas
	Control de velocidad	Controlador para motor sin escobillas PWM
A pasos	Rotación en un solo sentido	Controlador para motor a pasos
	Inversión de giro	Controlador para motor a pasos
	Control de velocidad	Controlador para motor a pasos

1.4 Sensores para robots móviles

Sensor de un robot móvil es un dispositivo utilizado para captar información del robot o de su entorno. Si el sensor recolecta información del robot se denomina interno; si recolecta información de su entorno se denomina externo. La Tabla 3 muestra sensores comúnmente utilizados en robótica móvil.

Tabla 3

Sensores para robots móviles.

Magnitud a medir	Sensor
Desplazamiento	Interruptor mecánico
	Potenciómetro rotacional
	Potenciómetro lineal
	Encoder óptico
	Encoder magnético
Orientación	Magnetómetro
Inclinación	Acelerómetro
Altitud	Barómetro
Posición	GPS
Proximidad	TOF ultrasónico
	Capacitivos
	Inductivos
	Magnético de proximidad
	Encoder óptico
Velocidad	Encoder magnético
	Giroscopio
	Doppler ultrasónico
	Tacogenerador
Fuerza	Dinamómetro
	Galgas extensiométricas

Fuente: (Bishop, 2002)

Tareas indispensables de un robot móvil son odometría y orientación. Los sensores más utilizados para realizar estas tareas son encoders, magnetómetros y acelerómetros. Estos sensores se estudian en los siguientes apartados.

1.4.1 Encoder

Un encoder es un dispositivo capaz de medir el desplazamiento y velocidad angular de un eje. Los ejemplares más utilizados son los ópticos. Un encoder óptico es un cortador de luz que produce estados de alto y bajo cuando el eje al que está adaptado se mueve. Este dispositivo está compuesto de una fuente de luz, una máscara codificadora de luz, un disco ranurado y detectores

de luz. La resolución de un encoder se mide en pulsos por revolución (ppr). La Figura 4 muestra la implementación de un encoder típico.

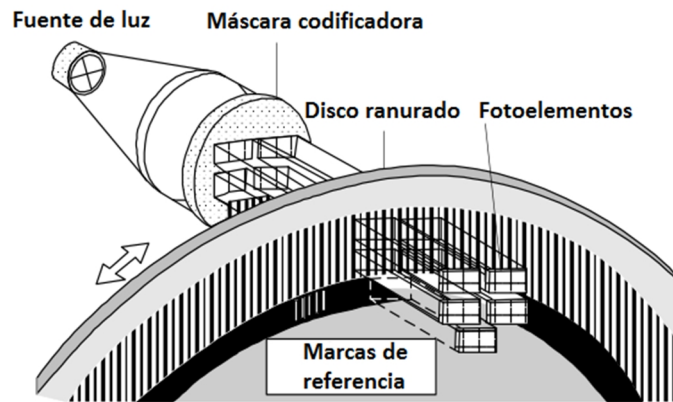


Figura 4. Encoder típico.

Fuente: (Ripka, 2007, pág. 329)

Para leer las señales de un encoder con un microcontrolador es necesario que la velocidad de lectura sea superior a la velocidad de cambio de estado de los detectores del encoder. Un código de lectura de encoder desarrollado en Python se muestra a continuación:

```
counter=0
lastState=encoder1.read()
while True:
    actualState=encoder1.read()
    if actualState!=lastState:
        counter+=1
        lastState=actualState
    sleep(0.05)
```

1.4.2 Magnetómetro

Un magnetómetro es un sensor de tipo analógico capaz de medir su orientación respecto al norte magnético de la Tierra. Si se dispone de un magnetómetro de tres ejes (x-y-z) el ángulo de orientación se calcula con la Ecuación 1 (ST Microelectronics, 2010, pág. 6).

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

Ecuación 1

Donde:

θ es el ángulo de orientación del magnetómetro (rad)

y es el voltaje de salida del canal Y del magnetómetro (V)

x es el voltaje de salida del canal X del magnetómetro (V)

1.4.3 Acelerómetro

Un acelerómetro entrega una señal analógica correspondiente a la aceleración que experimenta. En estado de reposo un acelerómetro es capaz de medir su inclinación gracias a la acción de la gravedad. El ángulo de inclinación se calcula con la Ecuación 2 (Analog Devices, 2010).

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{V_c}{V_m}\right)$$

Ecuación 2

Donde:

α es el ángulo de inclinación del acelerómetro (rad)

V_c es el voltaje de salida del acelerómetro (V)

V_m es el voltaje de salida máximo del acelerómetro (V)

1.5 Dispositivos de control para robots móviles

1.5.1 Microcontroladores

Los microcontroladores son pequeños computadores alojados en un circuito integrado que pueden ser programados para ejecutar tareas en forma autónoma. Los componentes principales de estos dispositivos son:

- Microprocesador de 8 o 16 bits
- Pequeña cantidad de memoria RAM
- Memoria ROM programable y/o memoria flash
- Puertos de entrada y salida (paralelo y/o serial)
- Temporizadores y generadores de señal

- Conversores digital-análogo y análogo digital

Para grabar instrucciones en la memoria de los microcontroladores es necesario utilizar un programa compilador que permita redactar instrucciones entendibles por el usuario para luego traducirlas al lenguaje binario del microcontrolador y un circuito grabador. La Figura 5 muestra un robot sumo con un circuito de control basado en el microcontrolador Motorola MC68HC908GP32. Este tipo de robots son completamente autónomos y manejan una cantidad importante de sensores infrarrojos y ultrasónicos.

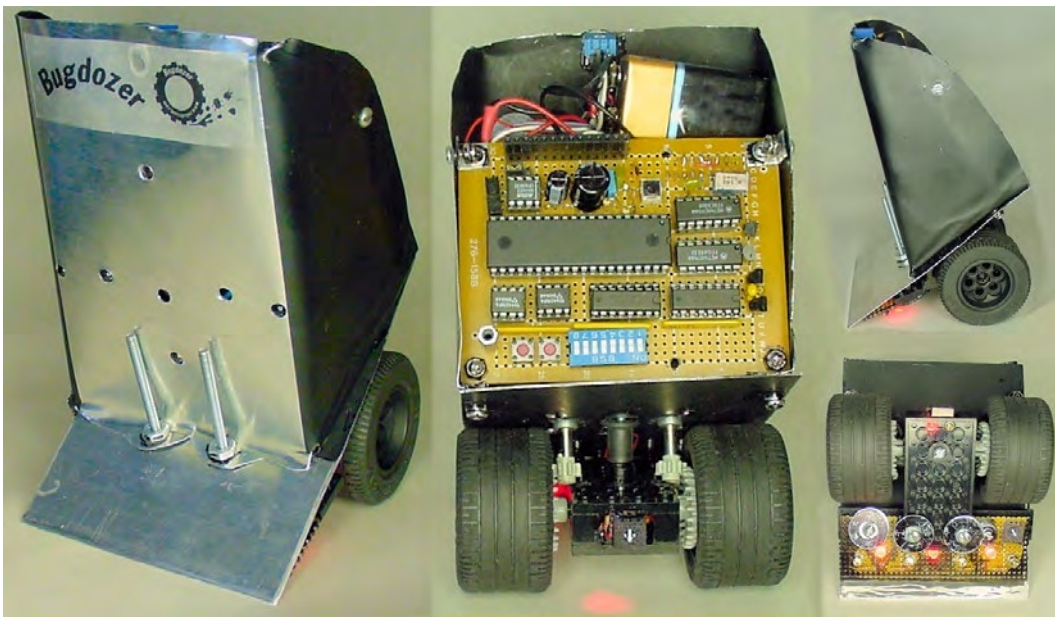


Figura 5. Microcontrolador Motorola utilizado en un robot sumo.

Fuente: (Cook, 2009, pág. 2)

1.5.2 Tarjetas de desarrollo

Las tarjetas de desarrollo son dispositivos basados en microcontroladores cuya función principal es facilitar la utilización de los microcontroladores. Son muy útiles para proyectos en los que se requiera cambiar las instrucciones del microcontrolador frecuentemente. Como desventaja puede mencionarse que su precio es elevado en comparación con los microcontroladores por lo que resultan inconvenientes para producción en serie. La Figura 6 muestra un robot móvil con circuito de control basado en una tarjeta Arduino Mega.



Figura 6. Tarjeta Arduino MEGA utilizada en un robot para navegación autónoma.

Fuente: (Warren, 2011, pág. 185)

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL MÓDULO MECÁNICO

2.1 Requisitos de diseño del módulo mecánico

El sistema mecánico de un robot móvil le permite desplazarse con facilidad sobre un entorno definido y sirve como soporte y protección al resto de componentes. Referido a este proyecto, el módulo mecánico de la plataforma debe cumplir los siguientes requisitos de diseño:

- **Escalar gradas:** este es el reto más grande del proyecto por lo que la morfología del módulo debe ser la de un escalador de gradas.
- **Disponer de tracción intercambiable:** parte de la robótica móvil comprende el estudio de diferentes tipos de locomoción en donde destacan los sistemas híbridos por su adaptabilidad a un mayor número de entornos. El módulo mecánico debe ser entonces híbrido a fin de verificar su adaptabilidad.

2.2 Entornos de trabajo

La plataforma debe desplazarse eficientemente en el interior del laboratorio de Mecatrónica, en los pasillos y gradas que rodean el laboratorio y en los exteriores de la ESPE-L. La Tabla 4 muestra las características de cada uno de los ambientes mencionados.

Tabla 4

Características del entorno de trabajo de la plataforma robótica.

Ambiente	Características
Laboratorio de Mecatrónica	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente estructurado • Terreno: cerámica
Pasillos	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente estructurado • Terreno: cerámica
Escaleras	<ul style="list-style-type: none"> • Material: Concreto, piedra • Huella: 300 mm. • Contrahuella: 200 mm.
Exterior del campus	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente no estructurado • Terreno: tierra, césped, concreto

2.3 Escaladores de gradas comerciales

La Tabla 5 muestra características de plataformas robóticas comerciales con capacidad de movilidad en ambientes exteriores y gradas.

Tabla 5

Características de plataformas robóticas comerciales.

Robot	Distancia entre ejes (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Masa (kg)	Carga útil (kg)	Velocidad (m/s)
Seekur Jr. ¹	425	663	494	77	40	1,2
MMP-40 (tracked) ²	686	529	184	18	13	0,73
LT2 ³	686	431	178	20	-	1,52
MegaBot ⁴	787	660	355	80	68	3,35
Jaguar Lite ⁵	640	538	176	13,5	13	2
Packbot ⁶	686	406	178	11	-	2,6
Talon ⁷	864	572	279	39	136	1,8
Promedio	682	543	263	37	54	2

Nota: ¹ Información de fila tomada de (Adept mobile robots, s.f.). ² Información de fila tomada de (The machine lab, s.f.). ³ Información de fila tomada de (SuperDroid Robots, s.f.). ⁴ Información de fila tomada de (Inspector Bots, s.f.). ⁵ Información de fila tomada de (Dr. Robot, s.f.). ⁶ Información de fila tomada de (iRobot, s.f.). ⁷ Información de fila tomada de (Foster-Miller, s.f.).

2.4 Selección de la morfología

Rastan (2011) concluye que el escalador de gradas más adecuado para edificios es el de geometría fija. La máquina desarrollada por Rastan se muestra en la Figura 7. El robot busca “atacar” con un ángulo agudo los primeros escalones para que la fuerza de repulsión generada en estos disminuya. Este modelo puede denominarse “clásico”.

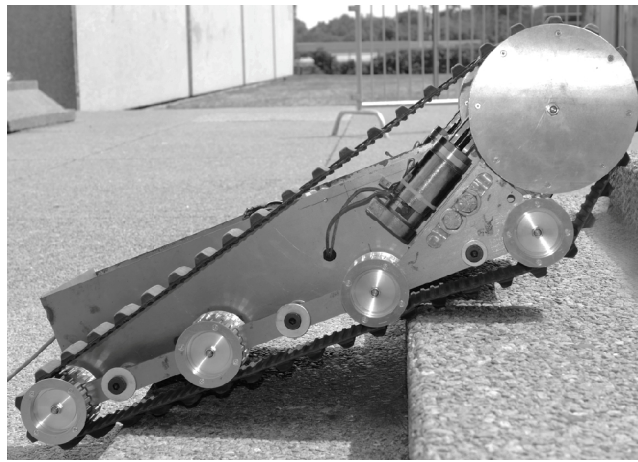


Figura 7. Escalador de gradas de geometría fija clásico.

Fuente: (Rastan, 2011, pág. 110)

En escaladores de geometría fija, como alternativa al modelo clásico está el modelo “compacto” mostrado en la Figura 8.

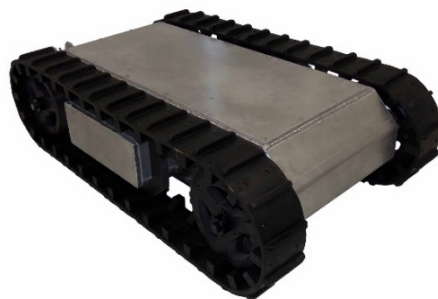


Figura 8. Escalador de gradas de geometría fija compacto.

Fuente: (SuperDroid Robots, s.f.)

Al comparar los modelos de la Figura 7 y la Figura 8 se advierten las siguientes diferencias:

- Para una misma escalera, el tamaño del modelo clásico es mayor al modelo compacto.
- El modelo clásico requiere una oruga más grande a la requerida por el modelo compacto.
- Si ambos modelos tuvieran el mismo peso, el clásico consumiría menos energía durante las primeras fases del proceso de escalar las gradas debido a su geometría frontal.
- Cuando los modelos abandonan las gradas, el modelo clásico pasa a arrastrar “peso muerto”; el modelo compacto no arrastra tal peso.

En las recomendaciones para trabajo futuro Rastan (2011) indica que “Una combinación de orugas y ruedas podría ser una mejor opción para vigilancia de edificios, si tal robot puede diseñarse” (pág. 102). Se sigue la recomendación de Rastan y en este proyecto se desarrollará un escalador de gradas compacto que pueda emplear ruedas y orugas.

2.5 Análisis dinámico de la plataforma

El análisis dinámico de un robot móvil permite calcular la fuerza requerida por los actuadores además de las fuerzas a las que está sometida la estructura mecánica. En este proyecto se analiza el comportamiento de un escalador de gradas con orugas cuando se desplaza sobre gradas, superficies planas y cuando rota. Las dimensiones del escalador utilizadas en el análisis se muestran en la Figura 9.

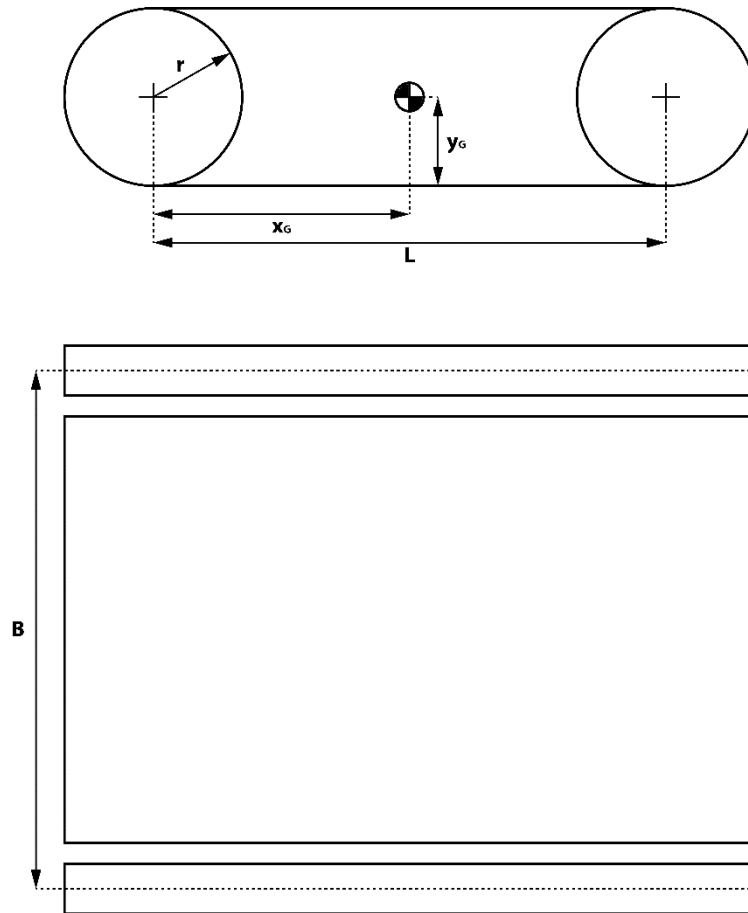


Figura 9. Dimensiones relevantes de un escalador de gradas de geometría fija.

En la Figura 9 se identifican las siguientes dimensiones:

- L es la huella de la oruga; corresponde a la sección de oruga inferior comprendida entre los centros de ejes.
- r es el radio de las ruedas.
- x_G es la coordenada horizontal del centro de gravedad medida desde el punto más bajo de la rueda posterior; este valor depende únicamente de la geometría de la plataforma.
- y_G es la coordenada vertical del centro de gravedad medida desde el punto más bajo de la rueda posterior; este valor depende únicamente de la geometría de la plataforma.
- B es el ancho de la plataforma.

2.5.1 Fase 1

La fase 1 empieza cuando el robot toca la primera grada y termina cuando la huella de la oruga alcanza la punta del primer escalón. La Figura 10 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 1 del escalamiento. Para simplificar los cálculos se asume que las fuerzas mantienen la dirección mostrada durante toda la fase.

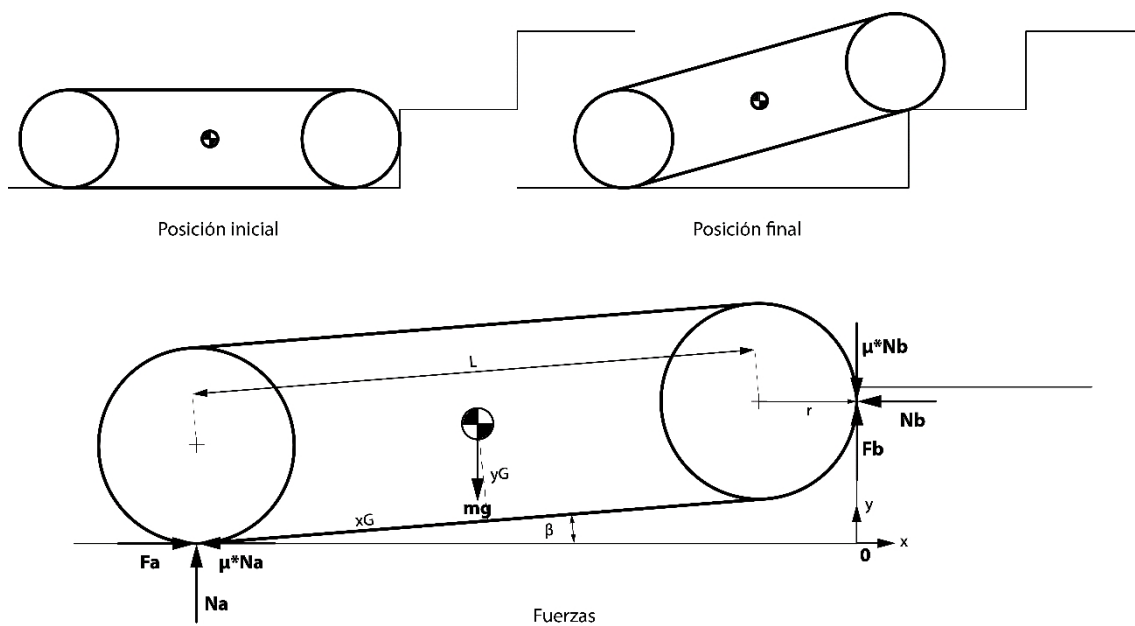


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 1 del escalamiento.

La fuerza requerida por la plataforma es máxima en la posición final. Las ecuaciones cinéticas de la plataforma durante la fase 1 se muestran a continuación:

$$\sum F_x = m * \ddot{x}$$

$$F_A - \mu_A * N_A - N_B = m * \ddot{x}$$

Ecuación 3

$$\sum F_y = m * \ddot{y}$$

$$N_A - F_B - \mu_B * N_B - m * g = m * \ddot{y}$$

Ecuación 4

$$\sum M_0 = J * \ddot{\beta}$$

$$-N_A * (L * \cos \beta + r) + m * g * [(L - x_G) * \cos \beta + r] + N_B * (L * \sin \beta + r) = J * \ddot{\beta}$$

Ecuación 5

Las constantes del entorno necesarias para el desarrollo del análisis dinámico se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Constantes del entorno para el análisis dinámico.

Constante	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Contrahuella de grada	T	0,2	m	
Contrahuella de grada	A	0,3	m	
Coefficiente de rodadura de la plataforma contra la cerámica de las gradas	μ	0,166		En un principio este valor debe asumirse. Durante la etapa de pruebas se determinó que el valor del coeficiente es 0,166.
Aceleración de la gravedad	g	9,81	$\frac{m}{s^2}$	

Las constantes de la plataforma necesarias para el desarrollo del análisis dinámico se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Constantes de la plataforma para el análisis dinámico.

Constante	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Huella de la oruga	L	0,721	m	Rastan (2011) y Liu (2005) indican que la huella de la oruga de un escalador de gradas debe cumplir la siguiente condición: $L \geq 2 * \sqrt{T^2 + A^2}$ Donde: T es la huella de la grada (m). A es la longitud de la contrahuella (m).
Masa + carga útil	m	30	kg	La Tabla 5 indica que las plataformas con una huella de la oruga similar a 0,721 m tienen una masa + carga útil aproximada de 70 kg; esta masa parece excesiva teniendo en cuenta que la carga útil en todos los casos se ha medido en superficies planas. Se opta por reducir el valor del parámetro masa + carga útil y utilizarlo en las circunstancias más demandantes de energía.
Radio de la rueda	r	0,125	m	En un principio este valor debe asumirse. La selección definitiva de los neumáticos recayó sobre ejemplares de 0,125 m de diámetro.
Coordenada y del centro de gravedad	y _G	0,125	m	Se asume que la plataforma es simétrica respecto a su eje y. Si la condición anterior se cumple la distancia vertical relativa medida desde la parte más baja de la oruga al centro de gravedad será igual al radio de la rueda. Los planos de la máquina mostrados en el Anexo 7 evidencian que la simetría respecto a y es cierta.
Coordenada x del centro de gravedad	x _G	0,443	m	Rastan (2011) y Liu (2005) indican que la distancia medida desde el centro de la rueda posterior al centro de gravedad debe cumplir la siguiente condición: $x_G = \sqrt{T^2 + A^2} + y_G * \frac{T}{A}$
Momento de inercia respecto al punto 0	J	13,11	kg * m ²	Si se considera la forma del escalador como rectangular, la fórmula de su momento de inercia corresponde a la de un rectángulo que rota respecto al punto O: $J = \frac{1}{12} * m * (L^2 + D^2) + m * ((L - x_G) * \cos \beta + r)^2 + (x_G * \sin \beta + r)^2$ Donde: D es la altura de la plataforma (m). La altura de la plataforma en la Figura 9 es el diámetro de sus ruedas o sea 0,25 m. β es el máximo ángulo que forma la plataforma con el suelo (rad). El valor máximo de β durante la fase 1 es 0,27 rad como se verá en la Tabla 8.

La aceleración angular $\ddot{\beta}$ va a considerarse constante. Si la plataforma parte del reposo la velocidad la expresión de la aceleración angular $\ddot{\beta}$ es:

$$\ddot{\beta} = \frac{2 * \dot{\beta}}{t^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

β es el desplazamiento realizado (rad).

t es la variación del tiempo (s).

De la Figura 10 puede determinarse que distancia horizontal entre el origen y la coordenada x_G es:

$$x = (L - x_g) * \cos \beta + r \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

L es la huella de la oruga (m).

x_g es la coordenada horizontal de la plataforma (m)

La expresión de la aceleración de la plataforma en la dirección x corresponde a la segunda derivada de la Ecuación 7:

$$\ddot{x} = (L - x_g) * (\cos \beta * \dot{\beta}^2 + \sin \beta * \ddot{\beta}) \quad \text{Ecuación 8}$$

De la Figura 10 puede determinarse que distancia vertical entre el origen y la coordenada y_G es:

$$y = x_g * \sin \beta + r \quad \text{Ecuación 9}$$

La expresión de la aceleración de la plataforma en la dirección y corresponde a la segunda derivada de la Ecuación 9:

$$\ddot{y} = x_g * (-\sin \beta * \dot{\beta}^2 + \cos \beta * \ddot{\beta}) \quad \text{Ecuación 10}$$

Las aceleraciones $\ddot{\beta}$, \ddot{x} y \ddot{y} se calculan en la Tabla 8.

Tabla 8

Aceleraciones de la plataforma durante la fase 1.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fórmula	Observación
Variación del tiempo	t	1	s	-	Se asume
Desplazamiento angular	β	0,27	rad	$\beta = \tan^{-1} \frac{T'}{L}$	T' es la huella de la grada en m. A es la longitud de la contrahuella en m.
Aceleración angular	$\ddot{\beta}$	0,2	$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$\ddot{\beta} = \frac{2 * \beta}{t^2}$	
Rapidez angular	$\dot{\beta}$	0,2	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\dot{\beta} = \ddot{\beta} * t$	Fórmula de la velocidad angular cuando la velocidad angular inicial vale 0.
Aceleración en la dirección x	\ddot{x}	0,011	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\ddot{x} = (L - x_G) * (\cos \beta * \ddot{\beta}^2 + \sin \beta * \ddot{\beta})$	
Aceleración en la dirección y	\ddot{y}	0,088	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\ddot{y} = x_G * (-\sin \beta * \ddot{\beta}^2 + \cos \beta * \ddot{\beta})$	

El Anexo 1 muestra el código de Matlab utilizado para resolver el sistema formado por la Ecuación 3, Ecuación 4 y Ecuación 5. La Figura 11 muestra los valores de las fuerzas generadas.

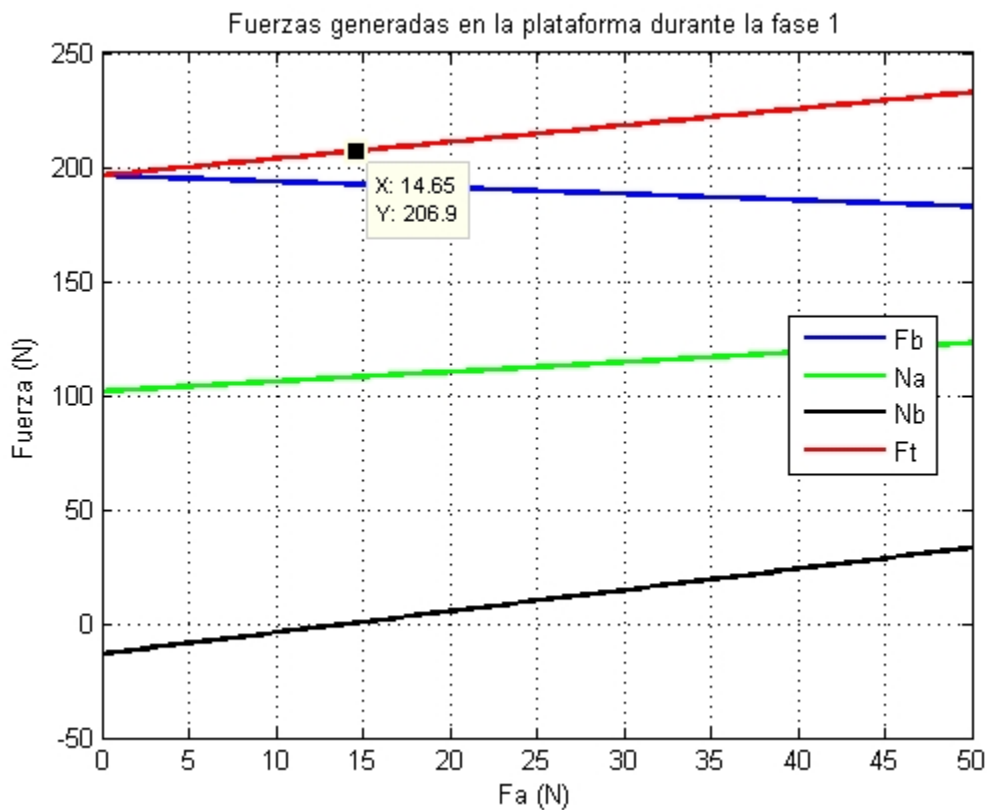


Figura 11. Fuerzas generadas en la plataforma durante la fase 1.

En la Figura 11 los valores de las fuerzas comienzan a corresponderse con el diagrama de cuerpo libre de la Figura 10 desde que F_A vale 15 N; puesto que N_B no puede tener un valor igual o cercano a cero, la fuerza total requerida por la plataforma debe ser mayor a 206,9 N y la fuerza generada por cada motor superior a 103,45 N.

2.5.2 Fase 2

La fase 2 comienza cuando la huella de la oruga toca la punta de la primera grada y termina cuando la huella de la oruga coincide con la pendiente de las gradas. La Figura 12 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 2 del escalamiento.

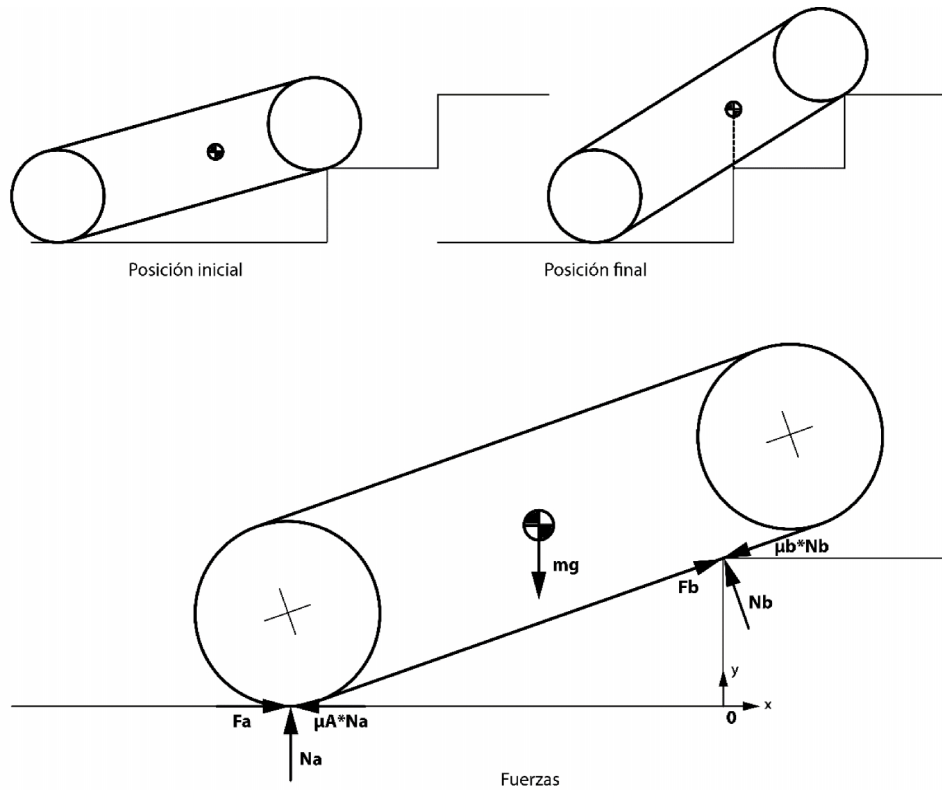


Figura 12. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la fase 2 del escalamiento.

En la Figura 12, F_A y F_B son componentes de la fuerza transmitida por la oruga. Para facilitar los cálculos en esta fase es posible obviar, indistintamente, una de las dos componentes; se decide no tomar en cuenta a F_B . La fuerza requerida por la plataforma es máxima en la posición final. Las ecuaciones cinéticas de la plataforma durante la fase 2 se muestran a continuación:

$$\sum F_x = m * \ddot{x}$$

$$F_A - \mu_A * N_A - \mu_B * N_B * \cos \beta - N_B * \sin \beta = m * \ddot{x} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\sum F_y = m * \ddot{y}$$

$$N_A + N_B * \cos \beta - \mu_B * N_B * \sin \beta - m * g = m * \ddot{y} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\sum M_O = J * \ddot{\beta}$$

$$(\mu_B * N_B * \cos \beta + N_B * \sin \beta) * T - N_A * \frac{T}{\tan \beta} = J * \ddot{\beta} \quad \text{Ecuación 13}$$

El momento de inercia de la plataforma en esta fase corresponde al de un rectángulo que gira alrededor del eje O:

$$J = \frac{1}{12} * m * (L^2 + B^2) + m * \left(T + \frac{y_G}{\cos \beta} \right)^2$$

Ecuación 14

Donde:

m es la masa de la plataforma (kg)

L es la huella de la oruga (m)

B es el ancho de la plataforma (m)

β es el desplazamiento angular (rad); este valor es 0,371 rad como se verá en la Tabla 9.

x_G es la coordenada horizontal del centro de gravedad (m)

r es el radio de las ruedas (m)

El valor del momento de inercia máximo de la plataforma en la fase 2 es 5,08 kg * m².

Las ecuaciones de la aceleración se calculan en forma similar a la mostrada en la fase 1. Las aceleraciones $\ddot{\beta}$, \ddot{x} y \ddot{y} se calculan en la Tabla 9.

Tabla 9

Aceleraciones de la plataforma para la fase 2.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fórmula	Observación
Tiempo	Δt	5	s	-	Se asume
Desplazamiento angular	B	0,317	rad	$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{T}{A}\right) - \beta_1$	T es la contrahuella de la grada A es la huella de la grada β_1 es el ángulo final de la anterior fase
Aceleración angular	$\ddot{\beta}$	0,025	$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$\ddot{\beta} = \frac{2 * \beta}{\Delta t^2}$	
Rapidez angular	$\dot{\beta}$	0,126	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	$\dot{\beta} = \ddot{\beta} * \Delta t$	
Aceleración en la dirección x	\ddot{x}	0,015	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\ddot{x} = \left(x_G * \cos \beta + 2 * T * \frac{(\tan \beta^2 + 1)^2}{\tan \beta^3} - 2 * T * \frac{\tan \beta^2 + 1}{\tan \beta} \right) * \ddot{\beta}^2$ $+ \left(x_G * \sin \beta - T * \frac{\tan \beta^2 + 1}{\tan \beta^2} \right) * \ddot{\beta}$	
Aceleración en la dirección y	\ddot{y}	-0,007	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\ddot{y} = x_G * (-\sin \beta * \ddot{\beta}^2 + \cos \beta * \ddot{\beta})$	

El Anexo 2 muestra la resolución del sistema conformado por la Ecuación 11, Ecuación 12 y Ecuación 13. La fuerza requerida por la plataforma es 195,44 N. La fuerza requerida por cada motor es 97.72 N.

2.5.3 Fase 3

La Figura 13 muestra el diagrama de cuerpo de la plataforma durante la fase 3 del escalamiento.

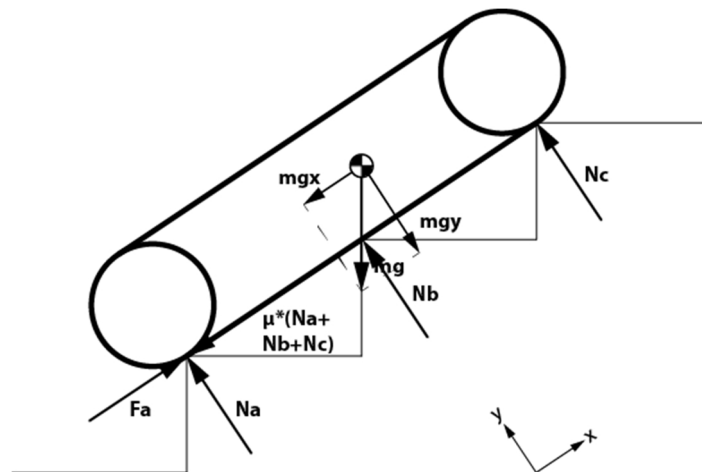


Figura 13. Diagrama de cuerpo de la plataforma durante la fase 3 del escalamiento.

Durante esta fase la plataforma experimenta movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. El valor de la aceleración depende del comportamiento que se le desee dar al robot; para este proyecto se selecciona una aceleración de $0,1 \frac{m}{s^2}$

La expresión que permite conocer la fuerza total requerida es:

$$F = m * a + m * g * \sin \beta + \mu * m * g * \cos \beta \quad \text{Ecuación 15}$$

La fuerza requerida para ejecutar el movimiento es entonces 195,87 N; la fuerza en cada motor es 97,93 N.

2.5.4 Fase 4

La Figura 14 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma cuando se desplaza sobre superficies planas.

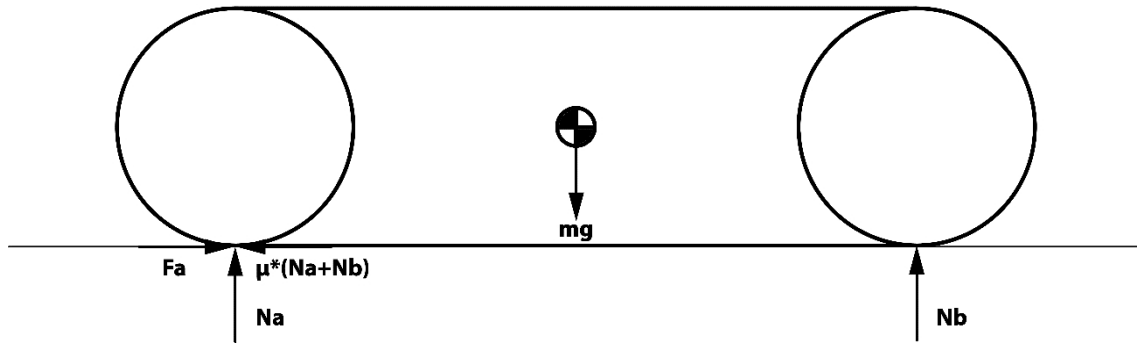


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma mientras se desplaza sobre superficies planas.

La expresión que permite conocer la fuerza total requerida es:

$$F = m * a + \mu * m * g \quad \text{Ecuación 16}$$

La fuerza requerida para ejecutar el movimiento es entonces 51,85 N cuando la aceleración tiene un valor de $0,1 \frac{m}{s^2}$; la fuerza en cada motor es 27,42 N.

La expresión que permite calcular la fuerza requerida para que la plataforma se mueva con velocidad constante es:

$$F = \mu * m * g \quad \text{Ecuación 17}$$

La fuerza requerida para que la plataforma se mueva con velocidad constante es entonces 48,85 N; la fuerza en cada motor es 24,42 N.

2.5.5 Fase 5

La Figura 15 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma cuando desciende escaleras.

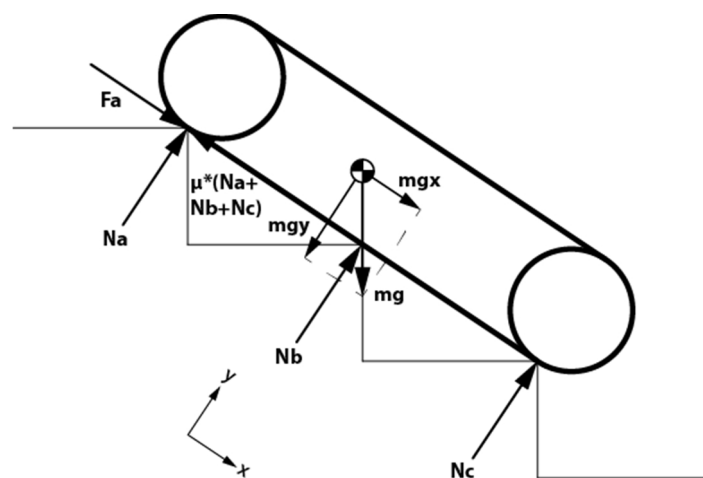


Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma cuando desciende escaleras.

La expresión que permite conocer la fuerza total requerida es:

$$F = m * a - m * g * \sin \beta + \mu * m * g * \cos \beta \quad \text{Ecuación 18}$$

La fuerza calculada es entonces -137,17 N cuando la aceleración tiene un valor de $0,1 \frac{m}{s^2}$; el signo negativo de la fuerza indica que la plataforma, teóricamente, desciende por su propio peso.

2.5.6 Fase 6

El análisis dinámico de la plataforma cuando rota presentado a continuación está basado en el propuesto por Wong (2001, págs. 397-398). La Figura 16 muestra el diagrama de cuerpo libre de la plataforma mientras rota sobre un eje perpendicular al suelo. La Tabla 10 muestra los parámetros necesarios para el cálculo de las fuerzas generadas en la plataforma durante la rotación.

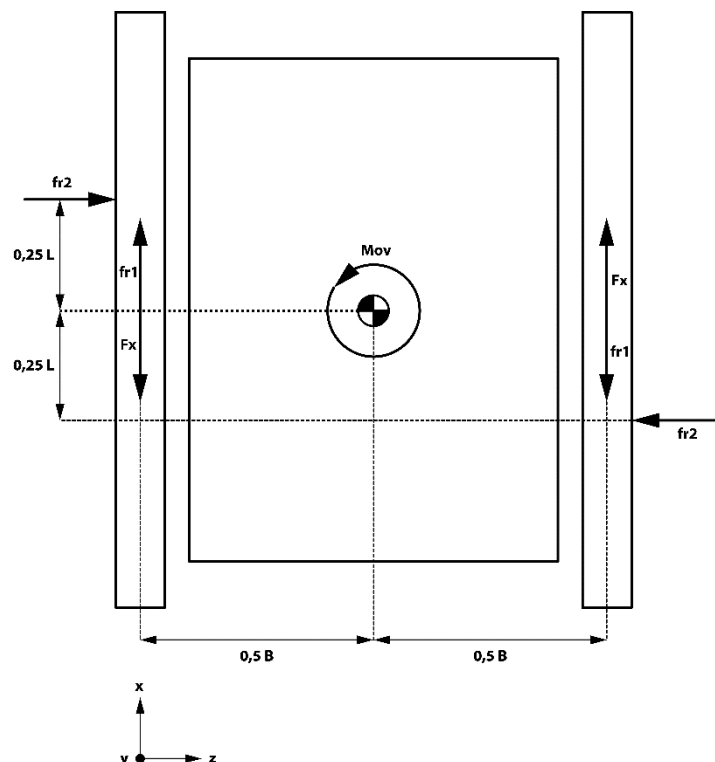


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma durante la rotación.

Tabla 10

Valores necesarios para el cálculo de las fuerzas generadas en la plataforma durante la rotación.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fórmula	Observación
Tiempo	Δt	1	s	-	Se asume
Desplazamiento angular	$\Delta \theta$	0,52	rad	-	Se asume
Ancho de la plataforma	B	0,6	m	-	
Coefficiente de rodadura	μ_1	0,166	-	-	
Coefficiente de fricción	μ_2	0,123	-	-	En un principio este valor debe asumirse. Durante la fase de pruebas se determinó que el valor de este coeficiente es 0,123.
Aceleración angular	α	1,04	$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	$\frac{2 * \beta}{\Delta t^2}$	Fórmula de la aceleración angular cuando la velocidad angular inicial vale 0.
Momento de inercia	J	2,19	$\text{kg} * \text{m}^2$	$\frac{1}{12} * m * (L^2 + B^2)$	Momento de inercia correspondiente a un sólido rectangular que rota sobre su centro geométrico. <i>m</i> es la masa de la plataforma (kg) <i>L</i> es la huella de la oruga (m) <i>B</i> es el ancho de la plataforma (m)

Durante la rotación actúan 3 momentos sobre la plataforma.

Las fuerzas producidas por los motores generan un momento a favor del movimiento cuyo valor es:

$$M_m = F_x * B \quad \text{Ecuación 19}$$

Las fuerzas requeridas por las orugas para empezar a rodar generan un momento en contra del movimiento cuyo valor es:

$$M_r = f_1 * B \quad \text{Ecuación 20}$$

Las fuerzas de rozamiento producidas por el desplazamiento lateral de las orugas generan un momento en contra del movimiento cuyo valor es:

$$M_{rc} = f_2 * \frac{L}{2} \quad \text{Ecuación 21}$$

La expresión de equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la plataforma durante la rotación es:

$$M_m - M_r - M_{rc} = J * \alpha \quad \text{Ecuación 22}$$

Reemplazando la Ecuación 19, Ecuación 20 y Ecuación 21 en la Ecuación 22 se obtiene la siguiente expresión:

$$F_x * B - f_1 * B - f_2 * \frac{L}{2} = J * \alpha \quad \text{Ecuación 23}$$

La fórmula de las fuerzas resistentes es $f = \mu * N$. Un sencillo análisis de la Figura 16 revela que $N = m * g$. La Ecuación 23 puede reescribirse entonces como:

$$F_x * B - \mu_1 * m * g * B - \mu_2 * m * g * \frac{L}{2} = J * \alpha \quad \text{Ecuación 24}$$

La Ecuación 24 puede reordenarse para obtener la expresión que permite calcular la fuerza requerida por cada motor de la plataforma para rotar:

$$F_x = \frac{2 * J * \alpha + 2 * \mu_1 * m * g * B + \mu_2 * m * g * L}{2 * B} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

J es el momento de inercia de la plataforma ($\text{kg} * \text{m}^2$)

α es la aceleración angular ($\frac{\text{r}}{\text{s}^2}$)

μ_1 es el coeficiente de rodadura de la plataforma

μ_2 es el coeficiente de rozamiento de la plataforma

m es la masa de la plataforma (kg)

g es la aceleración de la gravedad ($\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)

L es la huella de la oruga (m)

B es el ancho de la plataforma (m)

La fuerza requerida por cada motor de la plataforma para que esta rote es 74,44 N.

2.6 Selección de los actuadores

El torque requerido por cada oruga de la plataforma puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\tau_M = F_m * r \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

F_m es la fuerza máxima fuerza requerida por los motores (N)

r es el radio de las ruedas (m)

La máxima fuerza requerida por los motores corresponde a la calculada en la fase 1 del análisis dinámico y vale 103,45 N. Se asume que el radio de las ruedas es 0,125 m. El torque requerido por cada motor es entonces 12,93 Nm.

De toda la gama de motores eléctricos que existen, únicamente se consideran los utilizados en robots móviles, scooters o bicicletas eléctricas. La Tabla 11 muestra parámetros de candidatos para ser utilizados en este proyecto.

Tabla 11

Características de motores eléctricos utilizados en aplicaciones móviles.

Parámetro	Motor			Mejor	Justificación
	NPC-T64 ¹	OLBO MY1018 ²	Golden Motor MBG36F ³		
Identificador	1	2	3		
Aplicación	Robots móviles	Bicicleta eléctrica	Bicicleta eléctrica		
Tipo	Imanes permanentes con caja de reducción	Imanes permanentes	Sin escobillas	1 y 2	Los motores de imanes permanentes son más fáciles de controlar que los motores sin escobillas. Las ecuaciones que rigen su comportamiento son también más sencillas
Potencia (W)	700	250	250	2 y 3	Potencias bajas son más fáciles de controlar que potencias altas
Voltaje nominal (V)	24	24	24		
Corriente nominal (A)	43	13,4	14,24	2	Corrientes bajas son más fáciles de controlar que corrientes altas
Torque nominal (Nm)	33,9	5,7	20,3	1	Un mayor torque permite aumentar la carga útil de la plataforma
Velocidad (rpm)	181	383	172,9	-	No existe restricción respecto a la velocidad
Masa (kg)	6	2	2,7	2	Menor masa del dispositivo reduce los esfuerzos generados sobre el chasis de la plataforma

1 Información de columna tomada de (The robot market place, s.f.). ² Información de columna tomada de (CSMOTORISATION, s.f.). ³ Información de columna tomada de (Golden Motor, s.f.).

De cinco parámetros evaluados en la Tabla 11, el motor MY1018 se muestra como mejor opción en 4. Se decide entonces utilizar el motor MY1018. Más información sobre este motor se muestra en el Anexo 3.

2.7 Cálculo de la reducción mecánica

Para ajustar el torque de los motores MY1018 al torque requerido por la plataforma es necesario utilizar un sistema de reducción mecánica.

Existen tres modelos de reducción mecánica utilizados frecuentemente: engranajes, cadenas y bandas dentadas. Las reducciones de cadena y banda requieren un espacio considerable para su implementación; por otro lado, la reducción de engranajes es compacta y permitirá disponer de mayor espacio para instalación de hardware. Se selecciona la reducción de engranajes rectos. El espesor del engranaje es parámetro de diseño porque permitirá ajustar fácilmente el piñón al motor. La Tabla 12 muestra el cálculo de la fuerza dinámica soportada reducción mecánica.

Tabla 12

Cálculo de la fuerza tangencial máxima soportada por la reducción mecánica.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Fórmula	Observación
Ángulo de presión	A	25	°		
Número de dientes del piñón	N_1	12			Número de dientes mínimo recomendado para engranajes con ángulo de presión de 25° (Radzevich, 2012, pág. 118)
Número de dientes del engranaje	N_2	60			La relación máxima recomendada para engranajes rectos es 1:5 (Radzevich, 2012, pág. 42)
Módulo	m	2	mm		
Diámetro engranaje	d_2	120	mm	$d_2 = N_2 * m$	
Espesor	b	9	mm		
Material			SAE 1020		
Esfuerzo flexionante permitido	σ_0	124	MPa		Valor correspondiente al acero SAE 1020 (Ugural, 2015, pág. 529)
Espesor del engranaje	b	9	mm		
Factor de Lewis	Y	0,277			Valor tomado de (Ugural, 2015, pág. 528)
Factor de concentración de esfuerzos	K_f	1,5			Valor tomado de (Ugural, 2015, pág. 530)
Fuerza máxima	F_m	412,18	N	$F_m = \frac{\sigma_0 * b * Y * m}{K_f}$	
Velocidad del motor	ω	383	RPM		
Velocidad tangencial	v	2,4	m/s	$v = \frac{\pi}{60} * \omega * d_2$	
Fuerza dinámica	F_d	229	N	$F_d = \frac{3}{3 + v} * F_m$	Fórmula tomada de (Ugural, 2015, pág. 524)

La Tabla 12 muestra que la fuerza dinámica soportada por cada engranaje es 229 N. El apartado 2.6 muestra que la fuerza máxima que transmite cada motor es 103,45 N. El factor de seguridad de los engranajes es entonces:

$$F = \frac{F_m}{F_r} = \frac{229}{103,45} = 2,21$$

El factor de seguridad calculado permite afirmar que los engranajes soportan los esfuerzos generados en la transmisión.

2.8 Cálculo del diámetro mínimo de los ejes

El sistema de locomoción de orugas se diseña como una transmisión de banda plana (esta decisión se justificará más adelante). Budynas & Nisbett (2008, pág. 866) indican que la expresión para calcular la fuerza con la que la banda debe ser tensada para que no exista deslizamiento es:

$$F_i = \frac{T}{D} * \frac{e^{f*\theta} + 1}{e^{f*\theta} - 1} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

F_i es la fuerza con la que la banda debe ser tensada (N).

T es el torque máximo que transmite el sistema (Nm).

D es el diámetro de la rueda (m).

f es el coeficiente de fricción entre la rueda y la banda.

θ es el coeficiente de rozamiento entre la banda y las ruedas

Los parámetros necesarios para calcular la tensión inicial de la oruga se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Parámetros necesarios para calcular la tensión inicial de la oruga.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Torque máximo transmitido	T	23,71	Nm	Valor correspondiente a la salida de la reducción mecánica
Diámetro de la rueda	D	0,25	m	
Coefficiente de fricción rueda-banda	f	0,3		En un principio este valor debe asumirse. La selección definitiva de las ruedas y las orugas determinaron del coeficiente de fricción rueda-banda es el correspondiente a caucho-lona o sea 0,3 (Applied Industrial Technologies, s.f.)
Ángulo de abrazamiento de la banda	θ	pi	rad	Las ruedas delantera y trasera de cada oruga son iguales por lo que el ángulo de abrazamiento es π rad

El valor de F_i es entonces 195 N.

La reacción máxima que transmite el suelo a cualquier eje se produce durante la fase 2. Los resultados obtenidos del análisis dinámico del apartado 2.5 indican que la reacción N_B máxima que soportan los ejes delanteros es 248 N; la fuerza soportada por cada eje es 124 N.

La geometría del eje del lado de la rueda depende exclusivamente del ancho del neumático. Se asume que el ancho del neumático es 0,065 m.

F_i y N_B son las principales fuerzas que se ejercen sobre cualquier eje por lo que los mayores esfuerzos se encuentran del lado de la rueda. El valor de F_i distribuido sobre el eje es $3000 \frac{N}{m}$. La fuerza cortante máxima es 195N y el momento flector máximo es 6,34 Nm. El valor de N_B distribuido sobre el eje es $1907 \frac{N}{m}$. La fuerza cortante máxima es 100 N y el momento flector máximo es 4,03 Nm. F_i y N_B son perpendiculares por lo que la fuerza cortante total sobre el eje es 231 N y el momento flector total es 7,51 Nm. El par de torsión máximo corresponde al entregado por la reducción mecánica y su valor es 23,71 Nm. La Tabla 14 muestra el cálculo del diámetro mínimo de los ejes de la plataforma.

Tabla 14

Cálculo del diámetro mínimo de los ejes de la plataforma.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Factor de seguridad	FS	2		Valor recomendado para elementos de máquinas sometidos a cargas dinámicas (Mott, 2006, pág. 185).
Resistencia a la fluencia	Sy	220	MPa	Valores correspondientes al acero 1018 (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 1020).
Resistencia última	Sut	400	MPa	
Momento flector medio	Mm	0	Nm	
Momento flector alternante	Ma	7,51	Nm	
Par de torsión medio	Tm	23,71	Nm	
Par de torsión alternante	Ta	0	Nm	
Resistencia a la fatiga	Se'	200	MPa	Cuando S_u es menor a 1400 MPa, $S_e' = 0,5 * S_u$ (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 274)
Factor de modificación de la condición superficial	ka	0,921		La expresión que permite conocer el valor de este factor es $k_a = a * S_u^b$. Para el acero maquinado los valores de a y b son 4,51 y -0,265 respectivamente (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 280)
Factor de modificación del tamaño	kb	0,899		Se asume un valor de 25,4 mm. La expresión que permite calcular este factor es $k_b = 1,24 * d^{-0,1}$ (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 280)
Factor de modificación de la carga	kc	1		$k_c = 1$ corresponde a elementos sometidos a esfuerzos combinados (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 282)
Factor de modificación de la temperatura	kd	1		$k_d = 1$ corresponde a elementos sometidos a temperatura ambiente (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 283)
Factor de confiabilidad	ke	0,814		La confiabilidad del diseño no requiere ser alta. $k_e = 0,814$ corresponde a una confiabilidad de 99% (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 285)

Continúa 

Resistencia a la fatiga modificada	Se	134,79	MPa	La expresión que permite calcular la resistencia a la fatiga modificada es: $S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * S_e'$ (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 279)
Factor de concentración del esfuerzo por fatiga	Kt	2,2		El eje debe tener un cuñero que permita transmitir fuerza a la rueda. Los valores de concentración de esfuerzos recomendados en caso de existir un cuñero en el eje son $K_t = 2,2$ y $K_{t_t} = 3$ (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 361)
Factor de concentración del esfuerzo por fatiga (torsión)	Kts	3		
Sensibilidad a la muesca	Q	-		
Factor de concentración del esfuerzo por fatiga reducido	Kf	2,2		Budynas y Nisbett indican que “siempre es seguro usar $K_f = K_t$ cuando existe alguna duda acerca del valor verdadero de q” (2008, pág. 288). Por analogía, debe ser seguro utilizar $K_f = K_t$.
Factor de concentración del esfuerzo por fatiga reducido (torsión)	Kfs	3		
Diámetro	D	0,017	m	Budynas y Nisbett (2008, pág. 364) recomiendan el criterio ED-Goodman para la primera aproximación del diámetro mínimo de ejes: la fórmula utilizada por este criterio es (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 356): $d = \left(\frac{16 * F}{\pi} * \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4 * (K_f * M_a)^2 + 3 * (K_f * T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_u} \left[4 * (K_f * M_m)^2 + 3 * (K_f * T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$

El diámetro mínimo calculado es 17,3 mm. El diámetro estándar más próximo es 19,05 mm o $\frac{3}{4}$ ".

2.9 Selección de las chumaceras

Para soportar los ejes de la plataforma se seleccionan cuatro chumaceras de brida para 2 pernos. La fuerza cortante soportada por cada eje del lado de la rueda se transmite a la chumacera en forma de una reacción del mismo valor. La fuerza soportada por cada chumacera del lado de la rueda es entonces 219,14 N. Las chumaceras más fáciles de conseguir con rodamientos de $\frac{3}{4}$ " son las NBR modelo UCFL204. El Anexo 4 contiene más información sobre este modelo de chumacera.

La expresión que permite calcular la vida útil de rodamientos descrita por Mott (2006, pág. 611) es:

$$L_2 = 10^6 * \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^k \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

L_2 es la duración del diseño (rev)

P_1 es la capacidad de carga básica (N).

P_2 es la carga de diseño (N).

k es un valor dependiente del tipo de rodamiento

El Anexo 2 indica que la capacidad de carga dinámica de los rodamientos UC204 es 13000 N. De acuerdo con Mott (2006, pág. 606) el valor k para rodamientos de bola es 3.

La duración de diseño de los rodamientos UC204 en la plataforma es 2×10^1 rev. Este valor comprueba que las chumaceras UCFL204 son adecuadas para la plataforma.

2.10 Selección de las ruedas

Plataformas robóticas con ruedas utilizadas en exteriores como Seekur Jr (Adept mobile robots, s.f.), MMP-40 (The machine lab, s.f.), Mega Bot (Inspector Bots, s.f.) y Jaguar 4x4 (Dr. Robot, s.f.) utilizan neumáticos similares de

diámetros mayores o iguales 200 mm. Este tipo de neumáticos coinciden con los de la familia IMSA. Se seleccionan los neumáticos 350/410-4 marca IMSA ya que son los más grandes que guardan similitud con los neumáticos utilizados por las casas fabricantes. Las características de estos neumáticos se muestran en el Anexo 5.

2.11 Diseño de las orugas

Sistemas de orugas tradicionales como los utilizados por las plataformas MMP-40 (The machine lab, s.f.), Jaguar Lite (Dr. Robot, s.f.) y Packbot (iRobot, s.f.) tienen entre sus componentes principales ruedas y bandas dentadas. Como alternativa al sistema tradicional es posible pensar en las orugas como sistemas de banda plana. Al comparar los sistemas de banda dentada y banda plana puede advertirse lo siguiente:

- Los sistemas de banda dentada son mucho más precisos que los sistemas de banda plana debido a que no presentan deslizamiento.
- Los sistemas de banda plana son más fáciles de implementar que los sistemas de banda dentada.

Al seleccionarse el sistema de oruga debe tenerse en cuenta que en robótica móvil la precisión de los movimientos no es un requerimiento crítico. Se selecciona el sistema de orugas basado en banda plana.

Rysin Cia. Ltda. se dedicada a la comercialización de repuestos para un significativo número de industrias. Una de sus especialidades son las bandas para transportadores. La empresa, además de poseer un variado stock de bandas, posee un taller en que se realizan trabajos a medida. Consultados sobre la mejor manera de implementar un sistema de orugas basado en banda plana, su recomendación recayó sobre la banda de arrastre marca TEMPO INTERNATIONAL debido a la flexibilidad del material, aspereza superficial y facilidad de manufactura. La hoja de datos de la banda proporcionada por la empresa se muestra en el Anexo 6. El diseño de la oruga propuesto por Rysin se muestra en el Anexo 7.

2.12 Análisis de esfuerzos

Para el análisis de esfuerzos de los diferentes componentes de la plataforma se emplea el módulo Simulation de Solidworks. Los parámetros básicos que deben indicarse al programa para realizar un análisis estático de esfuerzos se indican en la Tabla 15.

Tabla 15

Parámetros básicos requeridos por Solidworks para realizar análisis de esfuerzos.

Parámetro	Observación
Material	Al seleccionar un material de la biblioteca de materiales de Solidworks automáticamente quedan definidas sus constantes. Si el material no se encuentra en la biblioteca es necesario cargar los valores de las constantes del material
Sujeciones	Las sujeciones describen cómo se soporta el modelo. El tipo de sujeción más utilizado es Geometría Fija en la que el desplazamiento y rotación del elemento seleccionado quedan bloqueados en todas direcciones
Cargas	Algunas de las cargas disponibles son Fuerza, Torque, Gravedad (para considerar el peso del modelo en el análisis) y Carga Remota. Para definir una carga es necesario indicar sobre qué elemento actúa, su valor y dirección. En el caso de Carga remota debe indicarse además la ubicación de la carga

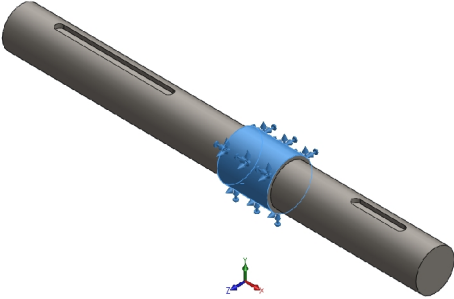
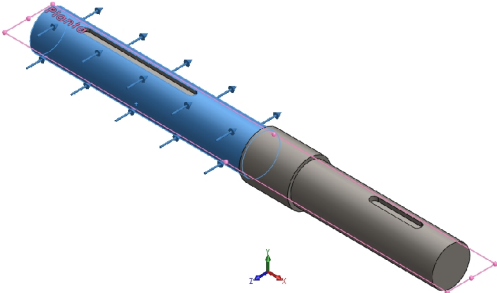
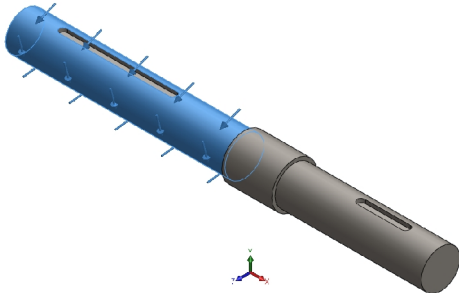
Una vez definidos los parámetros de la Tabla 15, se dispone de una gran variedad de resultados. El resultado de interés para este proyecto es el *Factor de seguridad mínimo*. Los componentes sometidos a mayores esfuerzos son: eje motriz, soporte de los motores y chasis inferior. Cada uno de estos componentes se examina en los siguientes apartados.

2.12.1 Análisis de esfuerzos sobre el eje motriz

La Tabla 16 ilustra el análisis de esfuerzos del eje motriz.

Tabla 16

Análisis de esfuerzos del eje motriz utilizando Simulation de Solidworks.

Parámetro	Desarrollo	
Material	Acero 1020	
Sujeción	<p>El eje motriz se encuentra soportado por las chumaceras. Se utiliza geometría fija</p> 	
Cargas	Tensión inicial de la banda	<p>El valor de la tensión inicial es 195 N</p> 
	Torque transmitido por el motor	<p>El valor del torque máximo transmitido por el motor es 23,71 Nm</p> 

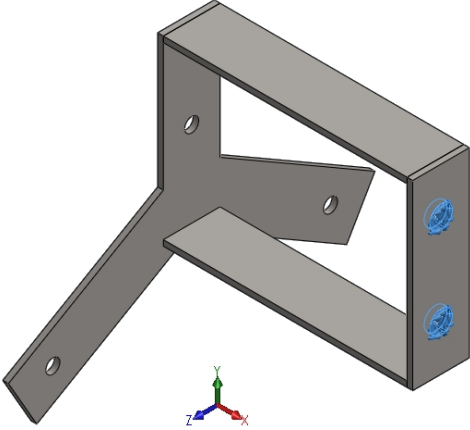
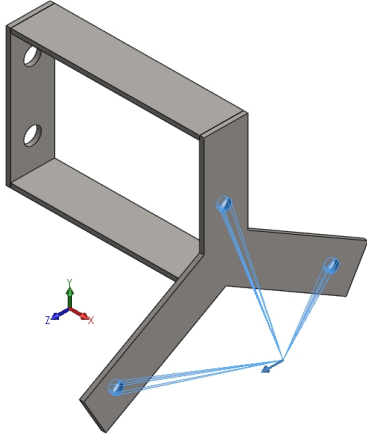
El factor de seguridad mínimo encontrado por Solidworks es 3,77.

2.12.2 Análisis de esfuerzos del soporte del motor

La Tabla 17 ilustra el análisis de esfuerzos del soporte del motor.

Tabla 17

Análisis de esfuerzos del soporte de motor utilizando Simulation de Solidworks.

Parámetro	Desarrollo
Material	Acero 1020
Sujeciones	<p>El soporte del motor se encuentra sujeto al chasis a través de los agujeros posteriores. Se utiliza geometría fija</p> 
Cargas	<p>El peso del motor se encuentra soportado por los tres agujeros frontales. El peso del motor es 19,6 N. El centro de gravedad del motor se encuentra a 65 mm de los orificios por lo que el peso se aplica como carga remota</p> 

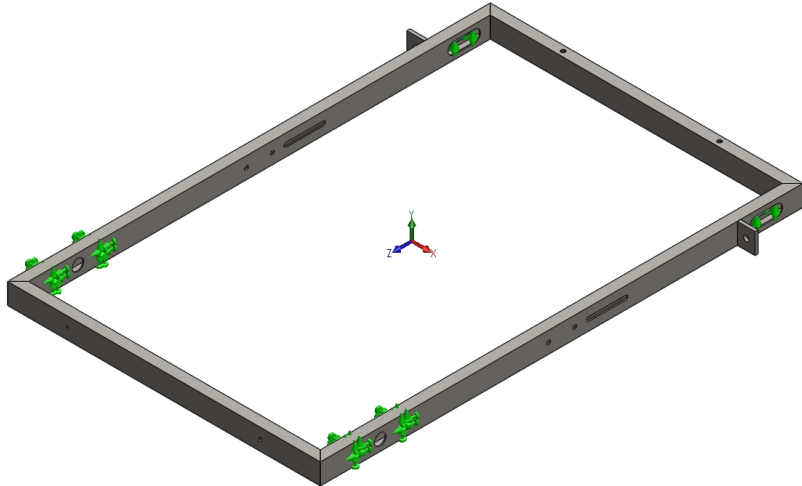
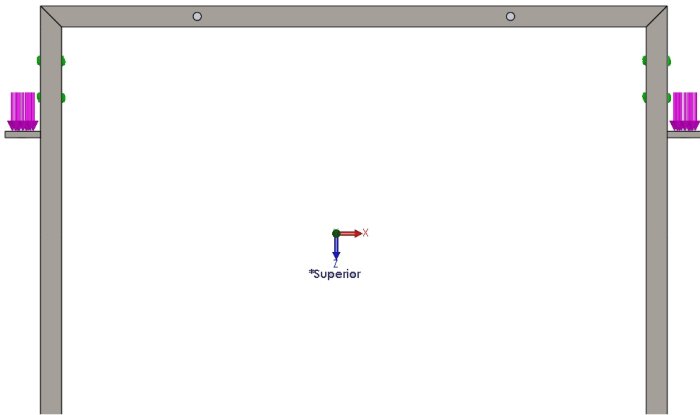
El factor de seguridad mínimo encontrado por Solidworks es 2,61.

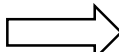
2.12.3 Análisis de esfuerzos del chasis inferior

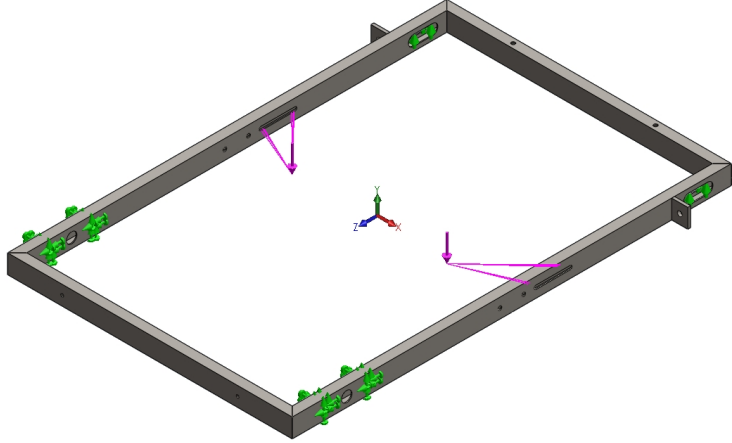
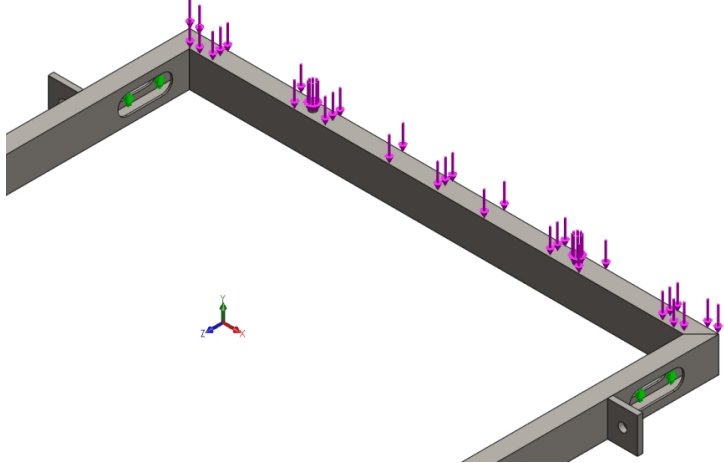
La Tabla 18 ilustra el análisis de esfuerzos del chasis inferior.

Tabla 18

Análisis de esfuerzos del chasis inferior utilizando Simulation de Solidworks.

Parámetro	Desarrollo	
Material	Acero 1020	
Sujeción	<p>El chasis se encuentra soportado por los agujeros de las chumaceras y la ranura del eje delantero. En los agujeros de la chumacera se emplea geometría fija mientras que en la ranura del eje delantero se emplea una única restricción en el eje y</p> 	
Cargas	<p>Reaccion es debidas a la tensión inicial de cada oruga</p>	<p>La tensión de cada oruga se transmite al chasis a través de los elementos que soportan los pernos tensores. Cada tensión está orientada en dirección z+ y vale 195 N.</p> 
	<p>Peso de los motores</p>	<p>El peso de cada motor se encuentra ubicado a 461 mm del eslabón posterior y a 143 mm del respectivo eslabón lateral. Cada peso está orientado en la dirección -y y vale 20 N</p>

Continúa 

		
	Pesos de las baterías	<p>El peso de las baterías está soportado por el eslabón posterior del chasis. Cada peso está orientado en la dirección $-y$ y vale 20 N</p> 

El factor de seguridad mínimo encontrado por Solidworks es 9.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO MECÁNICO

3.1 Mapas de fabricación y ensamblaje

Los componentes del módulo mecánico fueron construidos de acuerdo a los diagramas de fabricación mostrados en la Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25. Los componentes del módulo mecánico fueron ensamblados de acuerdo al diagrama de ensamblaje mostrado en la Tabla 26.

Tabla 19

Mapa de flujo de procesos para la fabricación de los eslabones del chasis.

Objetivo: Fabricación de eslabón									Resumen de procesos	
									Operación	5
Empieza cuando: Se selecciona el perfil rectangular		Inspección	2							
Termina cuando: Se almacena el eslabón		Transporte	2							
Elaborado por: P. Tinizaray		Almacenamiento	1							
Revisado por: E. Santillán		Demora	0							
		Tiempo total (min)	33							
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	○	□	➔	▽	D		
1	Selección de perfil rectangular	1	-	●						
2	Desplazamiento del perfil hacia la mesa de trabajo	1	2			●				
3	Dimensionamiento del perfil	1	5	●						
4	Corte del perfil	1	10	●						
5	Inspección de dimensiones	1	2		●					
6	Dimensionamiento de los agujeros	1	5	●						
7	Desplazamiento del perfil hacia el taladro de pedestal	1	2			●				
8	Taladrado de agujeros	1	5	●						
9	Inspección de dimensiones	1	2		●					
10	Almacenamiento del eslabón	1	-				●			

Tabla 20

Mapa de flujo de procesos para la fabricación de los ejes.

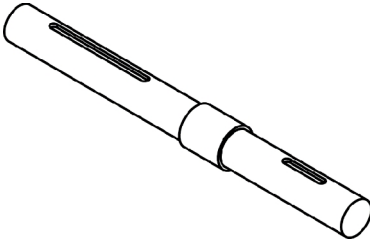
Objetivo: Fabricación de eje motriz									Resumen de procesos	
									Operación	7
Empieza cuando: Se selecciona el eje del deposito									Inspección	3
Termina cuando: Se almacena el eje terminado									Transporte	2
Elaborado por: P. Tinizaray									Almacenamiento	1
Revisado por: E. Santillán									Demora	0
									Tiempo total (min)	44
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	○	□	➡	▽	D		
1	Selección de eje	1	-	●						
2	Desplazamiento del eje hacia el torno	1	2			●				
3	Dimensionamiento del eje	1	5	●						
4	Mecanizado del eje	1	10	●						
5	Tronzado del eje	1	2	●						
6	Inspección de dimensiones	1	2		●					
7	Mecanizado de roscas del eje	1	5	●						
8	Inspección del roscado	1	2		●					
9	Transporte a la fresadora	1	2			●				
10	Dimensionamiento de los chaveteros	1	2	●						
11	Mecanizado de los chaveteros	1	10	●						
12	Inspección de los chaveteros	1	2		●					
13	Almacenamiento del eje terminado	1	-				●			

Tabla 21

Mapa de flujo de procesos para la fabricación de los componentes del soporte de motor.

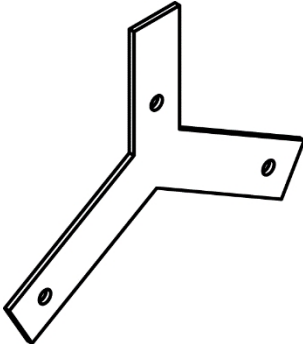
Objetivo: Fabricación de soporte de motor Empieza cuando: Se selecciona la plancha de latón Termina cuando: Se almacena el componente Elaborado por: P. Tinizaray Revisado por: E. Santillán					Resumen de procesos					
					Operación					4
					Inspección					1
					Transporte					3
					Almacenamiento					1
					Demora					0
					Tiempo total (min)					28
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	○	□	⇒	▽	D		
1	Selección de plancha del depósito	1	-	●						
2	Desplazamiento hacia la mesa de trabajo	1	2			●				
3	Dimensionamiento del componente	1	5	●						
4	Desplazamiento de la plancha hacia la cortadora	1	2			●				
3	Corte de la plancha	1	5	●						
4	Inspección de dimensiones	1	10		●					
5	Desplazamiento hacia el esmeril	1	2			●				
6	Esmerilado de residuos	1	2	●						
8	Almacenamiento	1	-				●			

Tabla 22

Mapa de flujo de procesos para la fabricación del engranaje de 60 dientes.

Objetivo: Fabricación de engranaje de 60 dientes									Resumen de procesos	
									Operación	5
Empieza cuando: Se selecciona el material para el engranaje		Cantidad		Tiempo (min)		<input type="radio"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		Inspección	2	
								Termina cuando: Se almacena el engranaje	Demora	0
Elaborado por: P. Tinizaray		Revisado por: E. Santillán		Tiempo (min)		total		134		
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
1	Selección de eje del deposito	1	-	<input checked="" type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	Desplazamiento del eje hacia el torno	1	2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Mecanizado del eje para alcanzar el diámetro primitivo, el espesor y el agujero interior indicados	1	20	<input checked="" type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Inspección de dimensiones	1	2	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Desplazamiento del eje hacia la fresadora	1	2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Mecanizado de dientes	1	90	<input checked="" type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	Desplazamiento del engranaje hacia la brochadora		2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	Mecanizado de chavetero	1	5	<input checked="" type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	Inspección de geometría	1	2	<input type="radio"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	Desplazamiento a hacia la mesa de trabajo	1	2	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	Eliminación de residuos	1	5	<input checked="" type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	Almacenamiento del engranaje	1	-	<input type="radio"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Tabla 23

Mapa de flujo de procesos para la fabricación del soporte de baterías.

Objetivo: Fabricación del soporte de baterías Empieza cuando: Se selecciona el material para el soporte de baterías Termina cuando: Se almacena el soporte de baterías Elaborado por: P. Tinizaray Revisado por: E. Santillán				Resumen de procesos				
				Operación	7			
				Inspección	1			
				Transporte	2			
				Almacenamiento	1			
				Demora	0			
				Tiempo (min)	total	43		
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	○	□	⇨	▽	D
1	Selección de material del depósito	1	-	●				
2	Desplazamiento del material hacia la mesa de trabajo	1	2			●		
3	Dimensionamiento del soporte de baterías	1	5	●				
4	Corte del soporte de baterías	1	15	●				
5	Dimensionamiento de los agujeros		5	●				
6	Taladrado de los agujeros		5	●				
5	Recolección de las baterías	1	2	●				
6	Desplazamiento de las baterías hacia la mesa de trabajo	1	2			●		
7	Fijación de las baterías en el soporte		5	●				
8	Inspección de geometría y dimensiones		2		●			
9	Almacenamiento de soporte		-				●	

Tabla 24

Mapa de flujo de procesos para la fabricación del chasis.

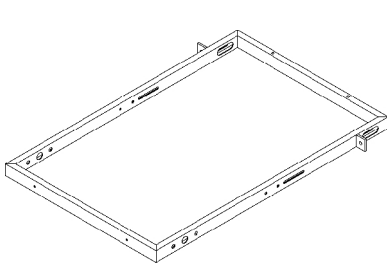
Objetivo: Fabricación de chasis				Resumen de procesos														
				Operación	6	Inspección	1	Transporte	1	Almacenamiento	2	Demora	0	Tiempo total (min)	385			
Empieza cuando: Se recolectan los componentes del chasis Termina cuando: Se almacena el chasis Elaborado por: P. Tinizaray Revisado por: E. Santillán																		
Orden	Descripción			Cantidad	Tiempo (min)	○	□	➡	▽	D								
1	Recolección de los eslabones del chasis	1	-	●														
2	Desplazamiento hacia la mesa de trabajo	1	2			●												
3	Soldadura provisional	1	18	●														
4	Inspección de geometría y dimensiones	1	10		●													
5	Soldadura definitiva	1	30	●														
6	Esmerilado de juntas e imperfecciones	1	5	●														
7	Limpieza	1	5	●														
8	Pintado	1	15	●														
9	Secado	1	300				●											
10	Almacenamiento	1	-				●											

Tabla 25

Mapa de flujo de procesos para la fabricación del soporte de motor.

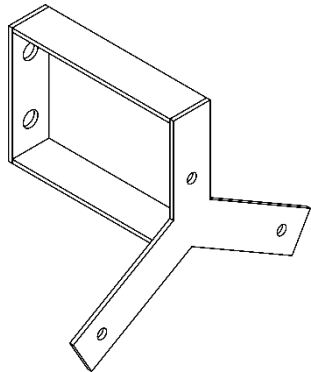
<p>Objetivo: Fabricación de soporte de motor</p> <p>Empieza cuando: Se recolectan los componentes del soporte de motor</p> <p>Termina cuando: Se almacena el chasis</p> <p>Elaborado por: P. Tinizaray</p> <p>Revisado por: E. Santillán</p>				Resumen de procesos					
				Operación					6
				Inspección					1
				Transporte					1
				Almacenamiento					2
				Demora					0
				Tiempo (min)	total				
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	○	□	⇒	▽	D	
1	Recolección de los elementos del soporte de motor	1	-	●					
2	Desplazamiento de los componentes hacia la mesa de trabajo	1	2			●			
3	Soldadura provisional	1	12	●					
4	Inspección de geometría y dimensiones	1	10		●				
5	Soldadura definitiva	1	20	●					
6	Esmerilado de juntas e imperfecciones	1	5	●					
7	Limpieza	1	5	●					
8	Pintado	1	15	●					
9	Secado	1	300				●		
10	Almacenamiento	1	-				●		

Tabla 26

Mapa de flujo de procesos para el ensamblaje del módulo mecánico.

Objetivo: Ensamblaje del módulo mecánico						Resumen de procesos	
						Operación	7
Empieza cuando: Se recolectan los elementos que conforman el módulo mecánico						Inspección	1
Termina cuando: Se almacena el módulo mecánico						Transporte	1
						Almacenamiento	1
Elaborado por: P. Tinizaray						Demora	0
Revisado por: E. Santillán						Tiempo total (min)	52
Orden	Descripción	Cantidad	Tiempo (min)				
1	Recolección de los elementos que conforman el módulo	1	-	●			
2	Desplazamiento de los elementos a la mesa de trabajo	1	2		●		
3	Ensamblaje de chumaceras	1	5	●			
4	Ensamblaje de soporte de baterías	1	5	●			
5	Ensamblaje de los motores	1	5	●			
6	Ensamblaje de los ejes	1	10	●			
7	Ensamblaje de los engranajes	1	10	●			
8	Inspección de funcionamiento de la reducción mecánica	1	5		●		
9	Ensamblaje de las ruedas	1	10	●			
10	Almacenamiento del módulo mecánico	1	-			●	

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL

4.1 Requisitos de diseño del módulo de control

Las principales tareas del módulo de control de un robot móvil son sensorización, razonamiento y comunicación. El modo en que el módulo debe ejecutar estas tareas arroja los siguientes requisitos de diseño:

- **Dispositivo de control:** la plataforma robótica está pensada para servir de base a proyectos superiores de robótica móvil. La tarjeta de control debe enlazar fácilmente nuevo hardware de control. Códigos desarrollados para la tarjeta deben ser implementados con agilidad. Este dispositivo debe además soportar comunicación inalámbrica.
- **Sensores:** los sensores que posee un robot están determinados por las tareas que va a ejecutar. La plataforma tiene como función principal el desplazamiento sobre diferentes entornos por lo que requiere sensores de posición y orientación.
- **Comunicación inalámbrica:** la comunicación entre el robot y el usuario debe basarse en alguno de los protocolos de comunicación inalámbrica disponibles.

4.2 Hardware de control

4.2.1 Tarjeta de control

Los dispositivos preferidos para controlar robots móviles son microcontroladores. La versatilidad de conexión y programación que debe tener el microcontrolador sugiere la utilización de tarjetas controladoras. La única marca de tarjetas basadas en microcontroladores disponible en el país es Arduino. Debido a la incertidumbre sobre futuras adiciones de hardware se selecciona la tarjeta más grande: Arduino Mega 2560. Puede mencionarse que las plataformas robóticas MarkII (Amtoft & Jensen, 2011) y Super Mega Bot (Inspector Bots, s.f.) utilizan esta tarjeta.

4.2.2 Controlador para motor

Las tarjetas controladoras de motores o drivers son dispositivos electrónicos que permiten controlar el accionamiento, sentido de giro y velocidad de motores eléctricos.

Los criterios de selección predominantes en drivers para motores son el tipo de motor, el voltaje nominal y la corriente máxima; a este respecto los actuadores seleccionados presentan las siguientes características:

- Motores DC con escobillas
- Voltaje nominal de 24 V
- Corriente nominal 11 A; corriente de arranque moderada que rara vez excede los 30 A (CSMOTORISATION, s.f.)

Estos dispositivos se estropearan ante los más simples errores de manipulación por lo que es necesario que puedan ser reemplazadas con facilidad, léase que estén disponibles en Ecuador. Los dispositivos más apropiados para el control de los motores MY1018 son las Monster Moto Shield de Sparkfun. Con estas tarjetas los motores podrían únicamente operar a 12V. Durante la etapa de pruebas se verificó que la corriente máxima absorbida por los MY1018 trabajando a 12 V se encuentra por debajo del límite de la Monster Moto Shield. Las tarjetas basadas en MOSFETs tales como esta requieren implementarse con disipadores de calor. El modelo de disipador implementado para las Monster Moto Shield se muestra en el Anexo 8.

4.2.3 Dispositivo de comunicación

De entre los dispositivos de comunicación inalámbrica destacan los transceptores Xbee debido a su operación en modo transparente. En este modo, dos módulos Xbee emulan las terminales de un cable serial de tal modo que los dispositivos enlazados no alteran su configuración al dejar el cable serial y utilizar los Xbee. La configuración de los Xbee en modo transparente es mínima y no requiere conocimiento del protocolo de comunicación (Zigbee). Como punto desfavorable debe mencionarse que en este modo pueden enlazarse únicamente dos dispositivos; como uno de los objetivos del proyecto es enlazar

una plataforma robótica y una PC no existe inconveniente. En Ecuador únicamente está disponible la serie 1 de los transceptores Xbee. Se selecciona entonces dos transceptores Xbee además de la Xbee Shield y el Xbee Explorer que facilitan la comunicación Arduino-Xbee.

4.2.4 Encoders

La utilización de sendos encoders en los ejes motrices permite controlar el desplazamiento y velocidad de la plataforma. La característica más importante en la selección de encoders es la resolución y en este proyecto la resolución se ve limitada por el tipo de comunicación.

Cuando Arduino se comunica mediante Xbee es necesario incluir una interrupción de 10 milisegundos en el lazo de ejecución continua (Faludi, 2011, pág. 109). Aplicado a los encoders, esto significa que la tarjeta puede leer 1 pulso cada 10 milisegundos o 100 pulsos por segundo.

La velocidad máxima de los MY1018 a plena carga es 383 rpm. La mitad del voltaje implica la mitad de la velocidad, esto es 191,5 rpm. La utilización de la reducción mecánica 5:1 implica una velocidad final de 46 rpm o 0,767 revoluciones por segundo.

Al dividir los 100 pulsos por segundo entre las 0,767 revoluciones por segundo se determina que el encoder puede tener una resolución máxima de 130 ppr (pulsos por revolución) o $2,76^\circ$. Esto significa que el disco del encoder puede tener hasta 130 divisiones. $2,26^\circ$ de resolución y una radio de rueda de 125 mm implican una resolución en el desplazamiento de la plataforma de 4,9 mm. La resolución de desplazamiento es exagerada teniendo en cuenta que la plataforma se desplazará en exteriores. La resolución del encoder se fija en 30 ppr. Durante la fase de pruebas de determino que esta resolución es apropiada para la plataforma robótica.

4.2.5 Circuito de distribución de voltaje

La Tabla 27 muestra los requerimientos de voltaje de los componentes electrónicos de la plataforma robótica.

Tabla 27

Requerimiento de voltaje de los componentes del módulo de control.

Componente	Voltaje requerido (V)
Arduino Mega	7-12
Moster Moto Shield derecha	5
Moster Moto Shield izquierda	5
Encoder derecho	5
Encoder izquierdo	5

El análisis de la Tabla 27 demuestra que el circuito puede poseer al menos 5 salidas de 5 V.

4.2.6 Baterías

En la selección de baterías destacan dos características: voltaje y autonomía. En este proyecto son requeridos 12 V para los actuadores y 5 V para los circuito integrados. No existe restricción respecto a la autonomía. Se seleccionan dos baterías de plomo-ácido marca FAMMA modelo SW12120; el Anexo 9 muestra la hoja de datos de este dispositivo.

Una batería se destina a los actuadores y una los dispositivos de control. Es lógico pensar que el consumo de energía de los dispositivos de control va a ser mucho menor que el de los actuadores y por lo tanto una de las baterías sería subutilizada. Más allá de esta primera impresión, tener dos baterías idénticas es una gran ventaja por las siguientes razones:

- Se requiere un solo tipo de cargador.
- Las baterías pueden alternarse dependiendo de su carga.
- Mejor distribución del peso.

4.3 Software de control

Teóricamente, las tarjetas Arduino son capaces de interactuar con cualquier lenguaje de programación que disponga de comunicación serial. Python es el lenguaje de programación recomendado para controlar la plataforma por las siguientes razones:

- Es de distribución libre.
- Es estable.
- Es multiplataforma.
- Es de fácil aprendizaje
- Posee amplia documentación.

Una forma de implementar software de control para la plataforma es escribiendo un programa en la IDE de la tarjeta Arduino y otro en el software que se esté utilizando. Aquí pueden utilizarse con más libertad las capacidades de la tarjeta y el software pero demanda más trabajo en la configuración de la comunicación. Otra forma de controlar la plataforma desde la PC es utilizar un *sketch* especializado que permita comunicar Arduino con un determinado software. En este modo de operación la comunicación eficiente entre la tarjeta y el software está asegurada. Sin embargo, ciertas capacidades de estos elementos se ven bloqueadas. Utilizar un *sketch* especializado es la recomendación si no se tiene mucha experiencia en programación. El *sketch* especializado más fácil de utilizar con Python es StandardFirmata.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL

5.1 Asignación de pines en la Arduino Mega

La Tabla 28 muestra la distribución de pines de los componentes electrónicos de la plataforma robótica.

Tabla 28

Distribución de pines de los componentes electrónicos.

Dispositivo	Pin	Función	Pin Arduino	Tipo de pin
Moster Moto Shield derecha	INA	Controla la rama A del puente H de la dirección del motor	35	Salida digital
	INB	Controla la rama B del puente H de la dirección del motor	37	Salida digital
	PWM	Controla la velocidad del motor	3	Salida PWM
Moster Moto Shield izquierda	INA		31	Salida digital
	INB		33	Salida digital
	PWM		2	Salida PWM
Encoder derecho	OUT	Salida del encoder	23	Entrada digital
Encoder izquierdo	OUT		24	Entrada digital
Xbee Shield	RX	Recepción serial	0	Pin exclusivo para comunicación serial
	TX	Transmisión serial	1	Pin exclusivo para comunicación serial

5.2 Configuración de los Xbee

La configuración de transceptores Xbee requiere dos componentes: el Xbee Explorer y el programa X-CTU. Para configurar dos transceptores Xbee S2 en modo transparente uno debe configurarse como coordinador y otro como

enrutador. Los valores utilizados por los transceptores de este proyecto se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29

Valores de los parámetros de identificación de los módulos Xbee.

Parámetro	Valor	
	Enrutador	Coordinador
ID PAN ID	666	666
DH Destination Address High	13A200	13A200
DL Destination Address Low	40B97449	40B97429
BD Baud Rate	9600	9600

Para trabajar con los transceptores Xbee uno de ellos debe estar conectado a la computadora a través del Xbee Explorer y el otro debe estar conectado al Arduino por medio de la Xbee Shield.

5.3 Construcción de los encoders

El camino más fácil para conseguir un encoder con una resolución de 30 ppr es implementarlo con sensores de luz CNY70. Los discos codificados se implementan sobre los engranajes de 60 dientes. Los detalles de la implementación se encuentran en el Anexo 10.

5.4 Construcción del circuito de distribución

El circuito de distribución definitivo se muestra en el Anexo 12.

5.5 Comunicación Arduino – Python

5.5.1 Instalación de la IDE de Arduino

La IDE de Arduino es una aplicación gratuita para escribir código para las tarjetas Arduino. El enlace de descarga del instalador se muestra en el Anexo 14. En la página de descarga existe la posibilidad de realizar una donación. Se recomienda realizar la donación

5.5.2 Instalación de Python

El instalador de Python puede descargarse desde su página oficial de manera gratuita. El enlace de descarga del instalador se muestra en el Anexo 14. Se recomienda instalar la versión 2.7 ya que todo el software desarrollado en este proyecto fue desarrollado con dicha versión. Además se recomienda seleccionar la versión de 32 bits incluso si se está utilizando una máquina de 64 bits ya que algunas librerías que se requerirán después solo se encuentran disponibles para 32 bits.

Para facilitar la utilización de Python en Windows es necesario añadir lo siguiente en el *path* de Variables del Sistema: C:\Python27\;C:\Python27\Scripts\

5.5.3 Instalación de VPython

Para escribir y ejecutar código de Python el programador es libre de seleccionar el camino más cómodo. En este proyecto se utilizó la IDE Visual Python. El enlace de descarga del instalador se muestra en el Anexo 14. Si se instaló la versión para 32 bits de Python es necesario instalar la versión de 32 bits de Vpython

5.5.4 Instalación de PiP

PiP es una herramienta que permite instalar paquetes de Python de manera fácil y correcta. Para instalar PiP deben seguirse los siguientes pasos:

- Descargar el Script de PiP (El enlace de descarga se muestra en el Anexo 14)
- Ejecutar el Script descargado

5.5.5 Instalación de PyFirmata

Pyfirmata es un paquete que soporta comunicación bidireccional entre microcontroladores y Python. Para instalar Pyfirmata deben seguirse los siguientes pasos:

- Acceder al CMD de Windows

- Escribir: `install_pip pyfirmata`
- Ejecutar el comando

5.5.6 Instalación del protocolo Firmata en Arduino

El protocolo Firmata esta implementado para Arduino en *sketchs* que pueden accederse desde la IDE de Arduino. El sketch utilizado en este proyecto es StandardFirmata. Para cargar StandardFirmata en la tarjeta Arduino deben seguirse los siguientes pasos:

- Conectar la tarjeta a la PC
- Abrir la IDE de Arduino
- Escoger adecuadamente el modelo de la tarjeta y el puerto al que está conectada
- Ir a Ejemplos→Firmata→StandardFirmata
- Cargar el sketch en la tarjeta

5.5.7 Creación de programas para Arduino en Python

La Tabla 30 muestra códigos útiles a la hora de crear programas que enlacen Python y Arduino a través de Firmata.

Tabla 30

Códigos para enlazar Arduino y Python a través del protocolo Firmata.

Código	Función	Configuración
from pyfirmata import ArduinoMega, útil	Importación de la librería PyFirmata	<i>pyfirmata</i> es la librería administradora del protocolo Firmata. <i>ArduinoMega</i> corresponde a la tarjeta seleccionada; el módulo <i>útil</i> posee funciones misceláneas del protocolo
object=ArduinoMega('port',baudrate)	Creación de un objeto con los atributos y métodos correspondientes a un Arduino Mega	<i>object</i> es el nombre del puerto <i>port</i> es el puerto al que está conectado el dispositivo <i>baudrate</i> se encuentra por defecto en 57600
get_pin ('pin_type: pin_number: pin_mode')	Configura los pines de la tarjeta	<i>pin_type</i> especifica la naturaleza del pin: a (analógico), d (digital) ; <i>pin_number</i> es el número de pin de la tarjeta; <i>pin_mode</i> configura el pin como entrada o salida: i (entrada), o (salida), p (salida PWM)

CAPÍTULO VI

PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1 Carga útil

La masa total de la plataforma es 22 kg; como se diseñó para 30 kg la carga útil es 8 kg.

6.2 Velocidad

La Tabla 31 muestra el cálculo de la velocidad máxima de la plataforma sobre una superficie plana de concreto. Para este cálculo se utilizaron orugas.

Tabla 31

Cálculo de la velocidad máxima de la plataforma con orugas.

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1	3,21	0,31
1	3,18	0,31
1	3,24	0,31
2	5,95	0,34
2	6,38	0,31
2	6,76	0,30
4	13,10	0,31
4	12,55	0,32
4	12,60	0,32
Promedio		0,31

La Tabla 32 muestra el cálculo de la velocidad máxima de la plataforma sobre una superficie plana de concreto. Para este cálculo se utilizaron ruedas.

Tabla 32

Cálculo de la velocidad máxima de la plataforma con ruedas.

Distancia (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
1	3,05	0,33
1	3,1	0,32
1	3,15	0,32
2	5,54	0,36
2	6,1	0,33
2	6,05	0,33
4	12,25	0,33
4	12,38	0,32
4	12,71	0,31
Promedio		0,33

6.3 Autonomía

La Tabla 33 muestra la corriente absorbida por cada motor de la plataforma para ejecutar diferentes actividades. Las pruebas fueron realizadas con orugas.

Tabla 33

Corriente absorbida por cada motor de la plataforma para ejecutar diferentes actividades.

Actividad		Corriente (A)	Voltaje (V)
Ascenso de escaleras		7	12
Desplazamiento sobre concreto	Justo antes del movimiento	2,5	4
	Máxima velocidad	4	12
Rotación sobre concreto	Justo antes del movimiento	4,5	6
	Máxima velocidad	8	12

Para determinar la autonomía de la plataforma se reparte por igual el tiempo que la plataforma suba gradas, se desplace sobre superficies planas y rote; el promedio de consumo de corriente por cada motor es entonces 6,33 A. El de la plataforma es 12,66 A. De acuerdo con el Anexo 9 el tiempo de autonomía es 30 minutos.

6.4 Corrección del coeficiente de rodadura

La fuerza de rodadura que actúa sobre la plataforma en una superficie plana corresponde a la generada por los motores justo antes que la plataforma entre en movimiento. A través de la relación torque-corriente del MY1018 es posible conocer el valor de la fuerza para cualquier corriente. La expresión que rige la relación torque corriente corresponde a la ecuación de una recta cuyos parámetros se calculan a partir de los datos de corriente y torque del motor en vacío y a plena carga. La expresión resultante es:

$$T = 0,486 * I - 0,702 \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

T es el torque generado por el motor

I es la corriente que absorbe el motor

Utilizando la relación torque-fuerza e incluyendo el valor de la transmisión mecánica en la Ecuación 29 se obtiene la siguiente expresión:

$$F = 23,143 * I - 33,428 \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

F es la fuerza transmitida a las ruedas (N)

I es la corriente que absorbe el motor (A)

Con orugas, la corriente absorbida por cada motor de la plataforma justo antes de que empiece a moverse sobre una superficie plana es 2.5 A; la fuerza correspondiente es 24,429 N. La fuerza de rodadura es 48,859 N y el coeficiente de rodadura 0,166. Con ruedas, los valores son similares a los obtenidos con orugas.

6.5 Corrección del coeficiente de rozamiento

El valor del coeficiente de rozamiento entre las orugas y el concreto puede calcularse estudiando el comportamiento de la plataforma cuando rota. La expresión que determina la fuerza mínima requerida por la plataforma para rotar es:

$$F = \frac{2 * \mu_1 * m * g * D + \mu_2 * m * g * L}{2 * D} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

F es la fuerza mínima requerida por la plataforma para rotar (N)

m es la masa de la plataforma (kg)

g es la fuerza de la gravedad ($m*s^{-2}$)

D es la distancia entre las orugas de la plataforma (m)

L es la distancia entre los ejes de una misma oruga (m)

μ_1 es el coeficiente de rodadura

μ_2 es el coeficiente de rozamiento

La corriente absorbida por los motores cuando la plataforma empieza a rotar es 4.5 A; la fuerza correspondiente es 70,71 N. Reemplazando los valores conocidos en la Ecuación 31, el coeficiente de rozamiento resultante es 0,123. Con ruedas, los valores son similares a los obtenidos con orugas.

6.6 Altura máxima del obstáculo

Los valores que intervienen en el cálculo de la altura máxima del obstáculo se muestran en la Figura 17.

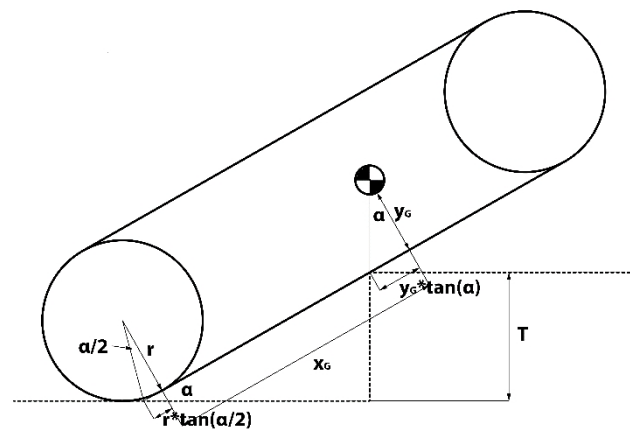


Figura 17. Valores que intervienen en el cálculo de la altura máxima del obstáculo.

Del triángulo rectángulo formado por el suelo, el obstáculo y la huella de la oruga se desprende que:

$$T = \left(x_G - y_G * \tan \alpha + r * \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) * \sin \alpha \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

h es la altura máxima del obstáculo (m)

x_G es la distancia entre el eje posterior y el centro de gravedad (m)

y_G es el radio de las ruedas (m)

α es el ángulo de elevación de la plataforma cuando ha alcanzado la cima del obstáculo (rad)

La expresión se analiza con $x_G = 0.422$ m, $y_G = 0,125$ m, $r = 0,125$ m y $\alpha = [0; 1.22]$ rad. Los resultados se muestran en la Figura 18.

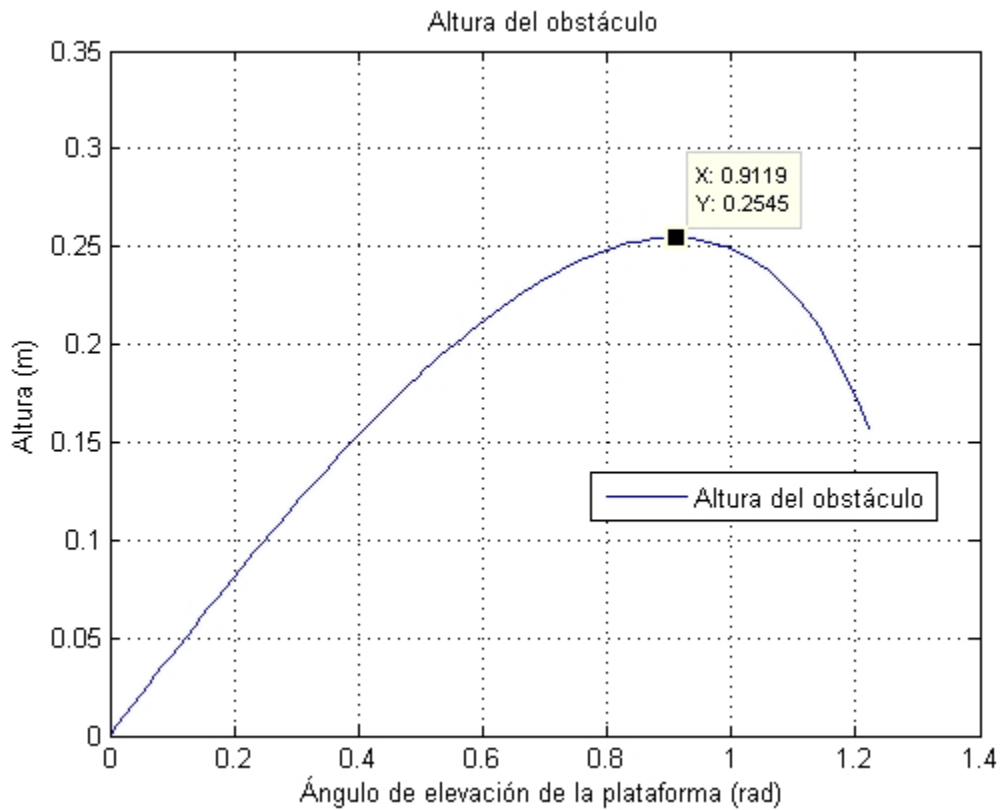


Figura 18. Cálculo de la altura máxima del obstáculo que la plataforma puede superar

La altura máxima del obstáculo que la plataforma puede superar es 0,254 m; el ángulo de elevación correspondiente es 52° . Para la verificación de estos valores se utilizó un obstáculo de 0.24 m de altura que la plataforma superó de acuerdo a los esperado. Para esta prueba se utilizaron orugas.

6.7 Brecha máxima

Los valores que intervienen en el cálculo de la brecha máxima se muestran en la Figura 19. El escalador se ha dibujado desprendido del suelo con fines didácticos.

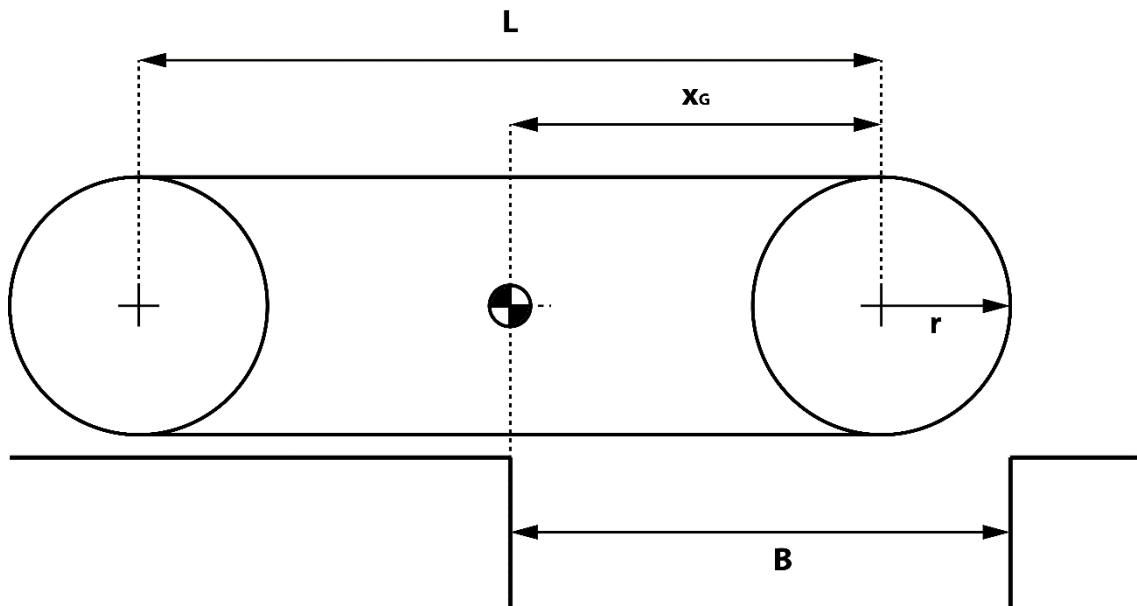


Figura 19. Valores que intervienen en el cálculo de la brecha máxima

De la Figura 19 se deduce que brecha máxima que la plataforma puede atravesar obedece a la siguiente expresión:

$$B < x_G + r \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

B es la brecha máxima que la plataforma puede superar (m)

x_G es la distancia entre el eje trasero y el centro de gravedad (m)

r es el radio de la rueda (m)

La expresión se analiza con $x_G = 0,422 \text{ m}$ y $r = 0,125 \text{ m}$. La brecha máxima que puede superar la plataforma debe ser menor a 0.547 m. Este valor se comprueba con una brecha de 0,52 m que la plataforma supera de acuerdo a lo esperado. Para esta prueba se utilizaron orugas.

6.8 Medición del desplazamiento

La resolución de los encoders utilizados por la plataforma es 30 ppr. El perímetro de las ruedas es 0,785 m. Una regla de tres simple revela que los encoders deben medir 38 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. La Tabla 34 muestra los resultados de la prueba.

Tabla 34

Pulsos entregados por los encoders para diferentes desplazamientos de la plataforma.

Desplazamiento (m)	Pulsos calculados	Pulsos entregados	Error (%)
1	38	38	0,00
1	38	37	2,63
1	38	37	2,63
2	76	77	1,32
2	76	77	1,32
2	76	76	0,00
4	152	151	0,66
4	152	151	0,66
4	152	150	1,32

Debe indicarse que los datos entregados por los encoders durante el arranque y parada de la plataforma fueron eliminados de los cálculos para evitar errores debidos a inercia y tiempos de conexión y desconexión. Ambos encoders trabajaron en forma idéntica por lo que resulta innecesario presentar sus datos por separado. Los valores de error mostrados en la Tabla 34 permiten afirmar que los encoders son exactos y precisos dentro de los límites de su resolución.

6.9 Medición de la velocidad

El control de la velocidad de la plataforma se realiza mediante modulación de ancho de pulsos. La medición de la velocidad se realiza a través de los encoders. La Tabla 35 muestra los pulsos entregados por los encoders para diferentes ciclos de trabajo de la señal PWM cuando la plataforma se desplaza sobre una superficie plana de cerámica.

Tabla 35

Pulsos entregados por los encoders para diferentes ciclos de trabajo de la señal PWM.

Ciclo de trabajo (%)	PPS calculados	PPS medidos	Error (%)
50	7	7	0,00
50	7	7	0,00
50	7	8	14,29
75	10	10	0,00
75	10	11	10,00
75	10	11	10,00
100	14	14	0,00
100	14	14	0,00
100	14	14	0,00

Los resultados de la Tabla 35 permiten ver que la relación voltaje-velocidad es lineal tal como se espera en motores DC. El error es alto para pequeñas variaciones por lo que estos sensores son poco recomendables para tareas que demanden gran exactitud.

6.10 Distancia máxima de conexión

Con línea de vista la distancia máxima de conexión es 25 metros; sin embargo, a esta distancia la comunicación es muy inestable. La distancia máxima de comunicación estable es 12 metros. Sin línea de vista la distancia máxima de conexión es 5 metros; la comunicación es segura debajo de 4 metros.

6.11 Verificación de la hipótesis

La hipótesis planteada en este proyecto es la siguiente: “Una plataforma robótica con tracción intercambiable puede ser utilizada en un mayor número de aplicaciones que una con tracción simple”.

Que la hipótesis sea cierta implica que las orugas sobresalgan donde las ruedas fallan y viceversa de modo que el robot se desplace eficientemente sobre entornos para orugas y ruedas. La principal ventaja que presentan los robots con ruedas sobre los robots con orugas es mayor velocidad con menor consumo de

energía. Sin embargo, los datos mostrados en la Tabla 31 y Tabla 32 reflejan que la velocidad de la configuración con orugas de este modelo es igual a la configuración con ruedas. La hipótesis nula y la alternativa se plantean como:

H_0 =La velocidad de la configuración con orugas es igual a la velocidad de la configuración con ruedas (la hipótesis planteada en este proyecto es falsa).

H_1 = La velocidad de la configuración con orugas es diferente a la velocidad de la configuración con ruedas (la hipótesis planteada en este proyecto es verdadera).

Los datos utilizados para verificación de la hipótesis se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36

Datos utilizados para la verificación de la hipótesis.

Velocidad con orugas (m/s)	Velocidad con ruedas (m/s)
0,31	0,33
0,31	0,32
0,31	0,32
0,34	0,36
0,31	0,33
0,3	0,33
0,31	0,33
0,32	0,32
0,32	0,31

La Tabla 37 muestra los cálculos realizados para la verificación de la hipótesis

Tabla 37

Cálculos realizados para la verificación de la hipótesis.

Parámetro	Símbolo	Configuración con orugas	Configuración con ruedas
Media	\bar{y}	0,31	0,33
Varianza	S^2	0,00011	0,00017
Desviación estándar	S	0,0107	0,01315
Número de muestras	n	10	10
Varianza común	S_p	0,01197	
Estadístico de prueba	t_0	3,737	
Grados de libertad	v	18	
Nivel de significación	v	0,05	
Valor distribución t	t	1,734	

Puesto que $t_0 > t$ la hipótesis nula se rechaza y la hipótesis de este proyecto es verdadera.

A manera de conclusión puede decirse que, puesto que no existe restricción en la velocidad, la configuración con orugas es superior a la configuración de ruedas porque presenta un desempeño similar a la configuración con ruedas en ambientes propios para robots con ruedas.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- La tarea inicial en el diseño de un escalador de gradas es el análisis dinámico porque permite determinar las características de los actuadores y los esfuerzos que experimenta el módulo mecánico del robot durante su funcionamiento; después, las características de los actuadores definen casi por completo los componentes que integrarán el módulo de control.
- El análisis dinámico presentado en este proyecto contiene elementos originales que lo diferencian de los presentados en proyectos similares
- Bandas y ruedas dentadas no son necesarias para el buen desempeño de un escalador de orugas; el sistema oruga-ruedas motrices puede tratarse como una transmisión de banda plana y con la adecuada tensión inicial no se presenta deslizamiento apreciable.
- La distancia entre el centro de gravedad y la huella de la oruga debe ser tan pequeña como lo permita la geometría de los componentes de la plataforma; un centro de gravedad bajo reduce la fuerza requerida por la plataforma durante las primeras fases del escalamiento y aumenta la altura máxima del obstáculo.
- El ancho de un escalador de gradas no es una variable determinante durante el análisis dinámico por lo que puede determinarse en base a otros requerimientos de la plataforma como la geometría de sus componentes.
- La frecuencia con la que la tarjeta Arduino envía datos debe ser menor a la frecuencia con la que el software de control los lee.
- Para lograr una correcta comunicación bidireccional entre Arduino y algún software de programación el camino más fácil es utilizar un *sketch* especializado.
- La comunicación inalámbrica más sencilla de implementar y configurar se consigue utilizando módulos Xbee en modo transparente.

- La comunicación serial con Arduino exige tener una pequeña interrupción en los lazos de control; de otra manera se conseguirá una comunicación defectuosa.
- La configuración del robot con orugas es superior a la configuración con ruedas en todos los entornos considerados en este proyecto ya que, si bien el análisis estadístico determinó que el robot es más veloz con ruedas, no existe restricción en la velocidad del robot

7.2 Recomendaciones

- Durante del desarrollo del análisis dinámico de un escalador de gradas las simplificaciones son necesarias; sin embargo no es recomendable abusar de esta técnica ya que puede llevar a apreciaciones incorrectas del funcionamiento del escalador.
- Al diseñar un escalador de gradas “compacto” con orugas lisas debe tenerse especial cuidado con la selección del coeficiente de rodadura; un valor alto evita el sub-dimensionamiento de los motores pero es posible que en la práctica no pueda alcanzarse.
- Durante el desarrollo dispositivos mecatrónicos, es recomendable utilizar componentes estándar; de otro modo se corre el riesgo de no encontrar repuestos para reparaciones futuras.
- Para mejorar las tolerancias geométricas y el acabado de los componentes del robot es recomendable utilizar máquinas de control numérico en la etapa de construcción
- El diseño e implementación de una tarjeta controladora de motores DC de alto amperaje es recomendable para el desarrollo de robots de gran tamaño ya que en la actualidad estos dispositivos se encuentran únicamente en el extranjero.
- Al añadir dispositivos con peso importante en el escalador es recomendable realizar nuevamente el análisis dinámico o al menos verificar nueva posición del centro de gravedad para evitar el volcamiento del escalador.

- Cuando el robot desciende gradas u obstáculos es recomendable disminuir la velocidad de avance a fin de evitar movimientos bruscos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adept mobile robots. (s.f.). *Seekur Jr. outdoor research platform*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de Adept mobile robots: <http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/SeekurJr-Datasheet-RevB.sflb.ashx>
- Amtoft, K., & Jensen, S. (2011). *Design and Control of an Autonomous Mobile Agricultural Robot*. Aalarbog, DK: Aalarbog University.
- Analog Devices. (2010). *Using an Accelerometer for Inclination Sensing*. Norwood, EEUU: Analog Devices.
- Applied Industrial Technologies. (s.f.). *Coefficients of Friction*. Recuperado el 10 de Agosto de 2015, de Applied Industrial Technologies: <http://www.applied.com/site.cfm/CoefficientsofFriction.cfm>
- Arai Laboratory. (s.f.). *Stair Recognition with Laser Range Scanning by ASTERISK*. Recuperado el 23 de Mayo de 2015, de Arai Laboratory: <http://www-arailab.sys.es.osaka-u.ac.jp/research/limbgroup/image/actual.jpg>
- Bishop, R. (2002). *The mechatronic handbook*. New York, EEUU: CRC Press.
- Boucher, G., & Sanchez, M. (2009). *Mobile wheeled robot with step climbing capabilities*. (X. Chen, Ed.) Rijeka, HR: InTech.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw Hill Interamericana.
- Cook, D. (2009). *Robot building for beginners*. New York: Apress.
- CSMOTORISATION. (s.f.). *MY1018 24V 250W DC*. Recuperado el 23 de Junio de 2015, de CSMOTORISATION: <http://pocketquadelectrique.csmoto.fr/informations/datasheet3.php>
- Dr. Robot. (s.f.). *Jaguar 4x4 wheel user guide*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de Dr. Robot: http://jaguar.drrobot.com/images/Jaguar_4x4_wheel_manual.pdf
- Dr. Robot. (s.f.). *Jaguar lite user guide*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de Dr. Robot: http://jaguar.drrobot.com/images/Jaguar_lite_manual.pdf
- Dudek, G., & Jenkin, M. (2010). *Computational principles of mobile robotics*. Ney York, EEUU: Cambridge University Press.

- Faludi, R. (2011). *Building wireless sensor networks*. Sebastopol, EEUU: O'Reilly Media.
- Foster-Miller. (s.f.). *Talor robot*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de Clemson University: http://www.clemson.edu/ces/crb/students/octor/product_data/talon.pdf
- Golden Motor. (s.f.). *MBG36F*. Recuperado el 13 de Octubre de 2015, de Golden Motor: <http://www.goldenmotor.com/hubmotors/Mini%20Front%2036V200W%20Performance.pdf>
- Inspector Bots. (s.f.). *The MEGA Bot*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de Inspector Bots: http://www.inspectorbots.com/Mega_Bot.html
- iRobot. (s.f.). *510 PackBot*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de iRobot: <http://www.irobot.com/~media/Files/Robots/Defense/PackBot/iRobot-510-PackBot-Specs.pdf>
- Liu, J. (2005). Analysis of stair climbing ability for tracked reconfigurable modular robot. *International workshop on safety, security and rescue robotics*, 36-41.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Prentice-Hall.
- Mourikis, A. (2007). Autonomous stair climbing for tracked vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 737-758.
- Radzevich, S. (2012). *Handbook of practical gear design and manufacture*. Boca Raton, EEUU: CRC Press.
- Rastan, H. (2011). *Mechanical design for track robot climbing stairs*. Ottawa: University of Ottawa.
- Ripka, P. (2007). *Modern sensors handbook*. Newport Beach, EEUU: ISTE.
- Shigley, J., Mischke, C., & Brown, T. (2004). *Standard handbook of machine design*. New York, EEUU: McGraw-Hill.
- ST Microelectronics. (2010). *Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass*. ST Microelectronics. Obtenido de ST Microelectronics.
- SuperDroid Robots. (s.f.). *LT2 Tracked ATR Robot Platform*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de SuperDroid Robots:

<http://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/lt2-tracked-atr-robot-platform/1513/>

- The machine lab. (s.f.). *MMP-40 Tracked Mobile Robot Platform*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de The machine lab: <http://www.themachinelab.com/MMP40/MMP-40T.pdf>
- The machine lab. (s.f.). *MMP-40 Wheeled Mobile Robot Platform*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2015, de The machine lab: <http://www.themachinelab.com/MMP40/MMP-40W.pdf>
- The robot market place. (s.f.). *NPC-T64*. Recuperado el 13 de Octubre de 2015, de The robot market place.
- Ugural, A. (2015). *Mechanical design of machine components*. Boca Raton: CRC Press.
- Voss, W. (2007). *A comprehensive guide to servo motor sizing*. Greenfield, EEUU: Copperhill Technologies Co.
- Warren, J. (2011). *Arduino Robotics*. New York: Apress.
- Wong, Y. (2001). *Theory of ground vehicles*. New York, Estados Unidos: Jhon Wiley & Sons.
- Woo, C.-K. (2007). *Climbing and Walking Robots: towards new applications*. Vienna: Itech.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor: **PAÚL ISAÍAS
TINIZARAY ROMERO**

En la ciudad de Latacunga a los 11 días del mes de enero de 2016.

Ing. Ernesto Santillán
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Marco Singaña
CODIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Vicente Hallo
DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Juan Carlos Díaz
SECRETARIO ACADÉMICO