



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TELEOPERACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE TRACCIÓN DIFERENCIAL PARA EL
MONITOREO DEL DISTANCIAMIENTO SOCIAL COMO MEDIDA DE PREVENCIÓN
FRENTE AL COVID-19**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

CRISTIAN ALEJANDRO CORONEL BRITO

DIRECTOR: GABRIELA ANDALUZ, MSc

D. M. Quito,

2022

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece (Filipenses 4:13)

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi familia porque siempre me ha apoyado en cumplir mis sueños. Agradezco a mis maestros por saberme transmitir su conocimiento y experiencia en todo este lapso. Agradezco a mis compañeros de clase con los cuales he superado numerosos retos durante este largo proceso. Y por sobre todas las cosas, agradezco a Dios por enseñarme a ser humilde y darme las fuerzas para convertirme en lo que soy hoy.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Tema	1
2.	Objetivos	1
2.1.	General	1
2.2.	Específicos	1
3.	Problema	2
4.	Hipótesis	2
5.	Introducción a la Robótica	2
5.1.	Robótica Móvil	5
5.2.	Tipos de Locomoción	6
5.3.	Tipos de ruedas	8
5.3.1.	Robots de tracción diferencial, con restricción no holonómica	9
6.	Teleoperación para robots móviles con ruedas	10
7.	Modelación cinemática de un robot móvil con tracción diferencial y restricción no holonómica	13
8.	Aplicación de robots de distanciamiento social	16
9.	Normas de bioseguridad frente al Covid-19	18
10.	Consideraciones de diseño	18
11.	Especificaciones técnicas	19
11.1.	Casa de la calidad	19
11.2.	Características de la función de calidad	19
11.3.	Requerimientos del usuario	20
11.4.	Implementación de la casa de la calidad	21
11.5.	Selección de configuraciones cinemáticas	21
11.6.	Selección del módulo de control electrónico	24
11.7.	Selección de la plataforma de programación	26
11.8.	Requerimientos generales del prototipo	26
12.	Diseño Mecatrónico	27
12.1.	Diseño Mecánico	28
12.1.1.	Masa de la plataforma	28
12.1.2.	Dimensionamiento de motor	28
12.1.3.	Velocidad del motor	29

12.1.4.	Potencia del motor	30
12.1.5.	Diseño de la base superior	36
12.1.6.	Diseño de la base inferior	40
12.1.7.	Diseño de la base intermedia	43
12.1.8.	Selección de material de la estructura mecánica	53
12.2.	Dimensionamiento Electrónico	54
12.2.1.	Selección del microcontrolador	54
12.2.2.	Selección de driver para motores	55
12.2.3.	Selección de parlantes	56
12.2.4.	Selección de cámara	59
12.2.5.	Selección de batería	61
12.2.6.	Componentes electrónicos seleccionados	64
12.3.	Desarrollo de la programación	64
12.3.1.	Diseño del servidor web	65
12.3.2.	Transmisión de imagen hacia el servidor web	65
12.3.3.	Reproducción de mensaje preventivo	65
12.3.4.	Control de motores	66
13.	Pruebas de Funcionamiento y Resultados	67
13.1.	Pruebas de área de comunicación	67
13.2.	Pruebas de velocidad del robot	68
13.2.1.	Prueba de velocidad en superfice de concreto	68
13.2.2.	Prueba de velocidad en superfice de asfalto	70
13.2.3.	Prueba de velocidad en superficie de baldosa	72
13.2.4.	Análisis de resultados de velocidad del robot móvil	74
13.3.	Pruebas de comunicación	76
13.4.	Pruebas en rampas para discapacitados	77
13.4.1.	Prueba 1: Rampa de 4,76°	77
13.4.2.	Prueba 2: Rampa de 7,13°	78
13.4.3.	Prueba 3: Rampa de 11,31°	79
13.5.	Prueba de campo	79
14.	Análisis de costos	80
15.	Conclusiones	81
16.	Recomendaciones	82

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Línea de soldadura por puntos robotizado.	3
2. Robot Sojourner.	4
3. Cosechadora robotizada Demeter.	4
4. Sistema de cirugía robótica Da Vinci.	5
5. Robot militar US Air Force Predator.	5
6. Restricción no holonómica	10
7. Robot Pioneer 3DX	10
8. Áreas de la teleoperación	11
9. Elementos de la teleoperación	12
10. Diagrama de Robot de Traccion Diferencial	13
11. Robot MOSRO	16
12. Robot SRV – 1	17
13. Robot Spot	17
14. Diagrama de consideraciones de diseño	20
15. Modelo 3D del robot	27
16. Fuerzas que actúan sobre el robot móvil	31
17. Pendientes longitudinales	32
18. Curvas características de los motores del robot	36
19. Diagrama de cuerpo libre de la base superior, en m	37
20. Esfuerzos cortantes en la base superior	37
21. Momentos flectores en la base superior	38
22. Simulación de la base superior	40
23. Diagrama de cuerpo libre de la base inferior, en m	40
24. Esfuerzo cortante en la base inferior	41
25. Momento Flector de la base inferior	41
26. Simulación de la base inferior	43
27. Diagrama de cuerpo libre de la base intermedia, en m	43
28. Diagrama de cuerpo libre para el caso 1 en B, en m	44
29. Diagrama de cuerpo libre para el caso 2 en B, en m	45
30. Diagrama de cuerpo libre para el caso 3 en B, en m	45
31. Momento flector para el caso 1 en B	45

32. Momento flector para el caso 2 en B	46
33. Momento flector para el caso 3 en B	46
34. Diagrama de cuerpo libre para el caso 1 en A, en m	47
35. Diagrama de cuerpo libre para el caso 2 en A, en m	48
36. Diagrama de cuerpo libre para el caso 3 en A, en m	48
37. Momento flector para el caso 1 en A	48
38. Momento flector para el caso 2 en A	49
39. Momento flector para el caso 3 en A	49
40. Esfuerzo cortante en la base intermedia	51
41. Momento flector en la base intermedia	51
42. Simulación de la base intermedia	52
43. Diagrama de bloques de los componentes electrónicos	54
44. Diagrama de bloques de los componentes electrónicos	55
45. Módulo L298N	56
46. Parlantes trust leto 2.0	57
47. Parlantes Genius Sp-hf180	57
48. Parlantes Kisonli V360	58
49. ECam 8000	59
50. Cámara web empresarial BRIO ULTRA HD PRO	60
51. Cámara para PC mini PACKING	61
52. Batería 12v 2,0Ah Seca Recargable	63
53. Mini UPS DC de Forza	63
54. Lógica de programación	65
55. Diseño del servidor web	66
56. Área de funcionamiento	67
57. Prueba de área de comunicación	68
58. Prueba 1 de velocidad en concreto	69
59. Prueba 2 de velocidad en concreto	69
60. Prueba 3 de velocidad en concreto	70
61. Prueba 1 de velocidad en asfalto	71
62. Prueba 2 de velocidad en asfalto	71
63. Prueba 3 de velocidad en asfalto	72
64. Prueba 1 de velocidad en baldosa	73

65. Prueba 2 de velocidad en baldosa	73
66. Prueba 3 de velocidad en baldosa	74
67. Robot móvil sobre una superficie de concreto	75
68. Robot móvil sobre una superficie de asfalto	75
69. Robot móvil sobre una superficie de baldosa	76
70. Tiempos de respuesta en la comunicacion	77
71. Prueba 1 en rampa para discapacitados	78
72. Prueba 2 en rampa fabricada	78
73. Prueba 3 en rampa fabricada	79
74. Prueba de campo	80

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Descripción de configuraciones cinemáticas para robots móviles	7
2.	Descripción de tipos de ruedas para robots móviles	8
3.	Dimensiones funcionales	18
4.	Valores de Ponderación	21
5.	Valores de ponderación de la configuración cinemática	22
6.	Peso específico del criterio "Movilidad"	22
7.	Peso específico del criterio "Control"	22
8.	Peso específico del criterio "Precio"	23
9.	Peso específico del criterio "Peso"	23
10.	Resultado de Posicionamiento	24
11.	Valores de ponderación del módulo de control electrónico	25
12.	Valor de ponderación del criterio "Periféricos"	25
13.	Valor de ponderación del criterio "Coste"	25
14.	Valor de ponderación del criterio "Software"	25
15.	Resultado de Posicionamiento	26
16.	Denominación de los elementos	27
17.	Masa estimada de los elementos	28
18.	Coeficiente de resistencia a la rodadura para diferentes terrenos	29
19.	Alternativas de llantas para el robot	30
20.	Alternativas de motores	35
21.	Características de los motores del robot	36
22.	Esfuerzos de diseño	39
23.	Alternativas de materiales	53
24.	Listado de variables I/O	54
25.	Especificaciones técnicas del módulo L298N	56
26.	Especificaciones técnicas de los parlantes	57
27.	Especificaciones técnicas de los parlantes	58
28.	Especificaciones técnicas de los parlantes	58
29.	Especificaciones técnicas de ECam 8000	59
30.	Especificaciones técnicas de cámara BRIO	60
31.	Especificaciones técnicas de la cámara para PC mini PACKING	61

32. Elementos electrónicos	61
33. Especificaciones técnicas de la Batería Seca Recargable	63
34. Especificaciones técnicas de la mini UPS DC de Forza	63
35. Prueba 1 de velocidad en concreto	68
36. Prueba 2 de velocidad en concreto	69
37. Prueba 3 de velocidad en concreto	69
38. Prueba 1 de velocidad en asfalto	70
39. Prueba 2 de velocidad en asfalto	71
40. Prueba 3 de velocidad en asfalto	72
41. Prueba 1 de velocidad en baldosa	72
42. Prueba 2 de velocidad en baldosa	73
43. Prueba 3 de velocidad en baldosa	74
44. Promedio de velocidad en diferentes superficies	74
45. Tiempos de respuesta de la comunicación, en segundos	76
46. Tiempos de respuesta de la comunicación, en segundos	80

TELEOPERACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL DE TRACCIÓN DIFERENCIAL PARA EL MONITOREO DEL DISTANCIAMIENTO SOCIAL COMO MEDIDA DE PREVENCIÓN FRENTE AL COVID-19

1. Tema

Teleoperación de un robot móvil de tracción diferencial para el monitoreo del distanciamiento social como medida de prevención frente al COVID-19.

2. Objetivos

2.1. General

Diseñar y construir un sistema de teleoperación de un robot móvil de tracción diferencial para monitoreo del distanciamiento social como medida de prevención frente a la COVID-19.

2.2. Específicos

- Investigar y determinar las normas y medidas de seguridad generadas por organismos públicos para la prevención del contagio del COVID-19 para el distanciamiento social.
- Investigar y determinar las alternativas existentes de robots empleados para el monitoreo de distanciamiento social.
- Diseñar y dimensionar el prototipo de un robot móvil de tracción diferencial que incluya un sistema de alertas para el distanciamiento social como medida de prevención frente a la COVID-19.
- Dimensionar y seleccionar los componentes mecánicos, electrónicos y software necesario para el sistema de teleoperación.
- Diseñar un sistema de teleoperación para un prototipo de un robot móvil de tracción diferencial, que contemple la activación de alertas auditivas para incentivar y mantener el distanciamiento social permitido.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema de teleoperación del robot móvil de tracción diferencial para el monitoreo de distanciamiento social.

3. Problema

El COVID-19 es una enfermedad que ha infectado a más de 489 millones de personas hasta el mes de Marzo del 2022 en el mundo entero [1], dejando a su paso incontables muertes. El COVID-19 es un virus que se logra propagar principalmente al contacto entre dos personas, a través de las gotículas que salen de una persona al hablar, estornudar o toser [2]. Es aquí donde el distanciamiento social es un factor primordial para reducir el índice de personas contagiadas. El Ministerio de Salud Pública del Ecuador [3] ha reportado 226.002 casos confirmados y en aumento, por lo que miles de ciudadanos no comprenden la gran importancia que tiene el respetar las medidas de distanciamiento social.

4. Hipótesis

El prototipo del robot móvil se basará en un robot con ruedas de tracción diferencial, que se moverá en un ambiente semiestructurado en espacios internos. El sistema de teleoperación no contemplará retardos en la comunicación y se limitará a un único operador. La función de monitoreo de distanciamiento social se llevará a cabo por el operador, con el objetivo de alertar y/o proporcionar consejos básicos de prevención frente a la COVID-19, mediante la difusión de mensajes de alertas auditivas, emitidos desde el robot teleoperado cuando el operador detecte un grupo de personas que no conserven el distanciamiento social permitido. El robot dispondrá de una cámara que servirá al operador para monitorear el entorno en el cual se moverá el robot; la distancia de teleoperación se limitará al medio de comunicación empleado.

5. Introducción a la Robótica

El concepto de robot se hizo popular en la década de 1940 con el escritor Isaac Asimov, que determina como una máquina con aspecto humano cuyo comportamiento sería definido en base a una programación hecha por seres humanos para cumplir con ciertas reglas éticas de conducta, [4]. Durante la historia, el ser humano se ha visto obligado a ir desarrollando nueva tecnología que supla una necesidad en específico, utilizando máquinas y dispositivos que puedan simular funciones o movimientos de diferentes seres vivos. Los griegos nombraron a estas máquinas como **autómata** que significa “máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado” y **automatización** que significa “el uso de máquinas diseñado específicamente para la fabricación en serie de productos de la misma característica, con el objetivo de alta productividad, volumen y calidad”. El sustituir al operador por un programa de un computador que lograra realizar los movimientos del operador fue

lo que dio de entrada al concepto de robot, generado por las diferentes necesidades de automatizar varios procesos de construcción. La robótica es una ciencia que abarca múltiples disciplinas de la ingeniería como lo son la electrónica, la mecánica, la teoría de control y ciencias de la computación. Esta se especializa en estudiar y analizar el diseño de máquinas autónomas con un cierto grado de inteligencia que logren realizar actividades de una persona común. Esta ciencia se especializa en el diseño y en la manufactura de robots que sustituyan procesos, comúnmente industriales, realizados por la mano del hombre. Los robots son las máquinas capaces de ejecutar las tareas de una manera automática, basándose en una programación hecha con una estructura que genera una función de toma de decisiones. Existe un amplio campo de aplicación de la robótica los cuales se muestran a continuación, [5]:

- **Robótica Industrial:**

Es aquella rama de la robótica encargada de diseñar y construir robots que logren ejecutar tareas relacionadas al proceso de ensamblaje y manufacturación de diferentes componentes o elementos a nivel industrial. Dentro de estos procesos, está incluido el ensamble de partes, la identificación y separación de elementos, control y regulación de estándares de calidad, etc. La robótica industrial busca como principal objetivo la manera de abaratar costos y tiempos de producción en industrias, perfeccionando la manufactura de los componentes y automatizar procesos, como se muestra en la Figura 1 [4].

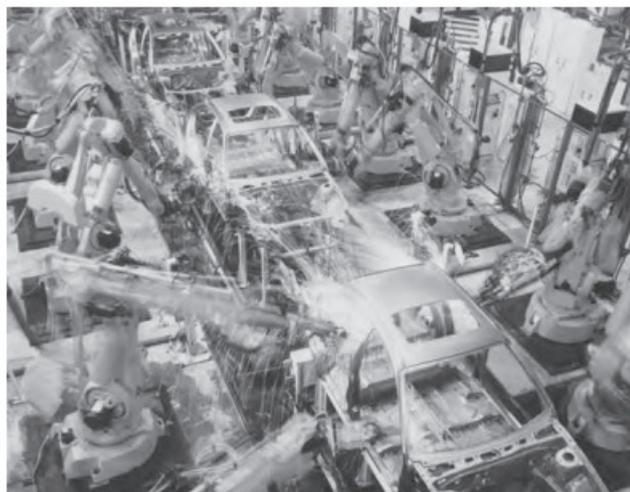


Figura 1. Línea de soldadura por puntos robotizado.

- **Robótica Espacial:**

Dentro de esta área, se orienta al diseño y construcción de robots capaces de realizar actividades en el espacio como por ejemplo la exploración planetaria o la asistencia en órbita. Esta rama se enfoca en realizar estudios sobre la composición del suelo y atmósfera de lugares al

cual el ser humano es incapaz de llegar, como se ilustra en la Figura 2 [6].



Figura 2. Robot Sojourner.

- Robótica de Servicio:

Encargada del diseño de robots que brinden servicios y prestaciones al ser humano. Este tipo de robots están enfocados a operar de manera autónoma en tareas como cuidado de personas, sistemas de cirugía, servicios domésticos, entretenimiento, agricultura, etc., como se puede ver en la Figura, 3 [4].



Figura 3. Cosechadora robotizada Demeter.

- Robótica Médica:

En 1980 empezaron los primeros experimentos con robots para tratar en áreas de neurocirugía y ortopedia. Actualmente la robótica se aplica desde el campo quirúrgico, robots de asistencia, para la rehabilitación y para procesos no quirúrgicos como dar diagnósticos médicos aplicando la telepresencia [7], visto en la Figura 4 [8].



Figura 4. Sistema de cirugía robótica Da Vinci.

- **Robótica Militar:**

En el ámbito militar, la robótica ha sido utilizada en labores logísticos o de apoyo. Estos recolectan toda la información procedente de sensores que permiten al ejército obtener conocimiento muy eficiente sobre áreas a donde no se puedan acceder con facilidad o que ponga en riesgo la vida de un soldado. También emplean a los robots como un sistema autónomo de reaprovisionamiento o municionamiento, [9], como se muestra en la Figura 5 [6].



Figura 5. Robot militar US Air Force Predator.

Ya en el siglo XXI, la robótica se ha colocado en una parte fundamental del desarrollo tecnológico debido a que sus áreas de aplicación no tienen límite alguno. El diseño de robots tiene como base el paradigma de control centrado en el comportamiento. Este paradigma conlleva inspiraciones biológicas ya que muchos investigadores han encontrado ejemplar el analizar el comportamiento y características que tienen diferentes seres de la naturaleza como animales e insectos, y juntar todo ese conocimiento para aplicarlo en diseño de sistemas de acción múltiple, [10].

5.1. Robótica Móvil

Esta rama de la ciencia se ha convertido en uno de los campos de estudio de alta tecnología que maneja problemas de alta complejidad. El Instituto de Robótica de América (RIA) definió a un

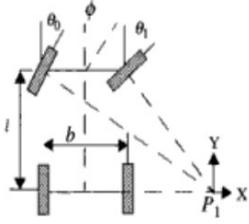
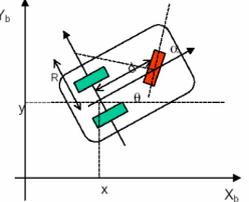
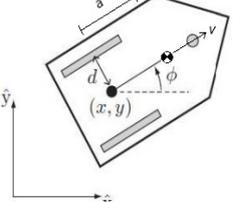
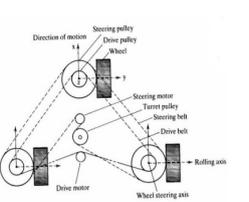
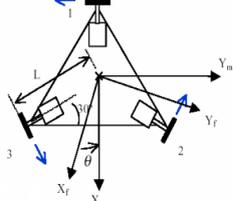
robot móvil como «*Un manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de varios movimientos programados para el desarrollo de una variedad de tareas*», [11]. Las aplicaciones donde se enfoca la robótica móvil conllevan áreas de control, programación, percepción e instrumentación, inteligencia artificial, entre otros. Este campo de la investigación está desarrollándose en todo momento, quedando aún mucho que recorrer.

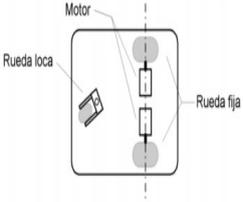
Con el desarrollo de nuevas tecnologías entre 1966 y 1972 aparece el primer robot móvil llamado Shakey, que consistía en una plataforma móvil independiente la cual estaba dotada de una cámara para la visión de entornos y un detector táctil, [12]. Junto con el desarrollo de la tecnología aplicada a robots empieza a crecer de manera exponencial la investigación y diseño de robots móviles, donde el navegar en diferentes terrenos sea su principal objetivo como por ejemplo en la exploración planetaria, reconocimiento de entornos, minería, vigilancia, la búsqueda y rescate de personas, entre otras.

5.2. Tipos de Locomoción

Los robots móviles se clasifican según el tipo de locomoción. Estos pueden ser por ruedas, por patas o por orugas. Comúnmente, los mayores desarrollos en diseños de robots móviles han sido mediante ruedas debido a la eficiencia en cuanto a energía que se produce en superficies lisas y firmes, ya que minimiza el desgaste en la superficie donde se desplazan, además que en cuanto al diseño por patas u orugas representan un menor grado de complejidad, lo que permite que su construcción sea más sencilla. A partir de estos parámetros, se define el concepto de robot móvil de ruedas como un sistema electromecánico controlado, que utiliza como locomoción ruedas de algún tipo, y que son capaces de trasladarse de forma autónoma a una meta preestablecida en un determinado espacio de trabajo. Los robots móviles con ruedas están compuestos principalmente por un arreglo cinemático y un sistema de actuadores. Las configuraciones cinemáticas de los robots móviles con ruedas dependen de hacia dónde se encuentra enfocado, lo cual se puede ver en la Tabla, 1 [12]:

Tabla 1. Descripción de configuraciones cinemáticas para robots móviles

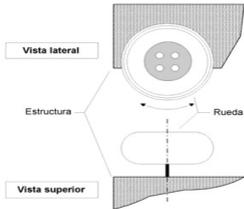
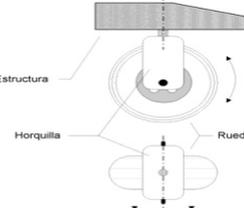
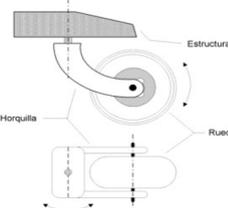
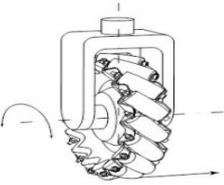
Tipo	Ventajas	Desventajas	Esquema
Ackerman	De fácil implementación, además que utiliza un sistema simple de 4 barras para el control de la dirección.	Tiene restricciones no holónomas.	
Triciclo Clásico	No existe deslizamiento en las ruedas.	Se requiere guiado no holónimo.	
Tracción Diferencial	Diseño simple de fácil implementación cuyo sistema es de bajo costo en su construcción.	Se debe precisar el control para trayectorias y presenta un gran desgaste de neumáticos.	
Síncrona	Al utilizar motores separados para traslación y rotación, se simplifica el control lo que garantiza un desplazamiento en línea recta. Restricciones holónomas.	Tiene un diseño complejo lo que dificulta su implementación.	
Tracción Omnidireccional	Permite movimientos complejos al reducir restricciones cinemáticas.	No garantiza un movimiento en línea recta por restricciones mecánicas. Su implementación es compleja.	

Tipo	Ventajas	Desventajas	Esquema
Uniciclo	Presenta una estructura mecánica, una electrónica de control y una cinemática simple, [13].	Tiene restricciones no holónomas.	 <p>El diagrama muestra un robot uniciclo con un motor en la parte superior que impulsa una rueda loca (de menor tamaño) y una rueda fija (de mayor tamaño) en la parte inferior. Las etiquetas indican 'Motor', 'Rueda loca' y 'Rueda fija'.</p>

5.3. Tipos de ruedas

Según la configuración cinemática que se utilice para diseñar los robots móviles con ruedas, existen cuatro modelos diferentes para la locomoción: rueda fija, rueda orientable centrada, rueda orientable no centrada y rueda sueca, las mismas que se describen en la Tabla, 2 [14].

Tabla 2. Descripción de tipos de ruedas para robots móviles

Tipo	Descripción	Esquema
Rueda fija	El eje de la rueda está fijo a la estructura del robot.	 <p>El diagrama muestra una rueda fija montada en un eje que está directamente conectado a la estructura del robot. Se muestran vistas lateral y superior.</p>
Rueda orientable centrada	Las ruedas presentan un eje vertical de rotación con respecto a la estructura.	 <p>El diagrama muestra una rueda orientable centrada montada en un eje vertical que puede girar con respecto a la estructura del robot. Se muestra una horquilla que sostiene la rueda.</p>
Rueda orientable no centrada	Comunmente conocida como rueda loca, presentan características muy similares a la rueda orientable centrada, con la diferencia de que el eje de rotación no cruza por el eje vertical de la rueda.	 <p>El diagrama muestra una rueda orientable no centrada (rueda loca) montada en un eje que no es vertical, sino que está inclinado con respecto a la estructura del robot.</p>
Rueda sueca	Presenta una baja resistencia al cambiar de dirección. Permite desplazarse en dirección perpendicular al plano de la rueda.	 <p>El diagrama muestra una rueda sueca, que es una rueda con una estructura helicoidal que permite un movimiento de deslizamiento lateral.</p>

5.3.1. Robots de tracción diferencial, con restricción no holonómica

Los robots móviles se pueden construir basándose en el diseño de sistemas de tracción y dirección que utilizan. El tema se relaciona con la disposición que tienen las ruedas, la mecánica asociada y los algoritmos empleados para el control local de los motores. A partir de estos criterios, se presentan tres sistemas básicos para obtener diferentes configuraciones, [14]:

- Tracción y dirección en ejes independientes:

En esta configuración, la tracción es dada por las ruedas traseras y el control de la dirección en las ruedas delanteras o viceversa. Una ventaja de esta configuración es que es más sencillo el controlar la dirección del robot móvil y como desventaja por tener un radio de giro bastante elevado no permite realizar cambios de dirección muy cerrados.

- Tracción y dirección sobre todos los ejes:

Esta configuración utiliza un sistema odométrico complejo debido a la incertidumbre que tiene en los radios de giro asociado al sistema de tracción y dirección.

- Tracción y dirección en un mismo eje:

También conocido como tracción diferencial, ésta configuración consiste en utilizar motores independientes en las ruedas del mismo eje y colocar ruedas de bola para el resto de los ejes. Es la configuración más utilizada en robots móviles ya que su construcción es sencilla y permite radios de giro del orden del tamaño del robot.

Al diseñar un robot se debe tomar en cuenta la forma que tiene. Es por eso que aparece los robots holonómicos y los no holonómicos. La holonimicidad es una característica que depende de la movilidad del robot. Los robots holonómicos son aquellos que están formados por ligaduras, conocidos como brazos y manipuladores. La restricción holonómico hace referencia a aquellas que están expresadas como posición u orientación. Los robots no holonómicos corresponde prácticamente a los robots móviles en general, [15]. Cabe mencionar que existen restricciones para la rueda en un robot móvil. Las ruedas convencionales imponen restricciones no holonómicas. El control de sistemas no holónomos se caracteriza por tener un número menor de grados de libertad controlables con respecto al número total de grados, que en caso de un robot móvil con ruedas de tracción diferencial vendrían a ser las posiciones (x, y) y su orientación. La restricción no holonómica determina que el robot móvil de tracción diferencial solo puede desplazarse hacia adelante o hacia atrás, pero no puede desplazarse de forma lateral, como se aprecia en la Figura 6.

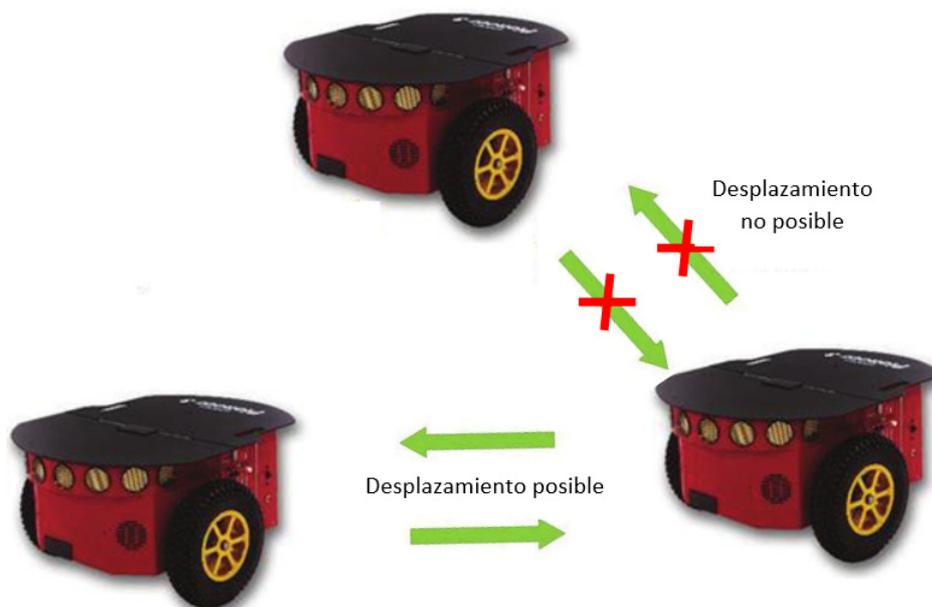


Figura 6. Restricción no holonómica

Un ejemplo de robot de tracción diferencia es el Pioneer 3DX. Son los dispositivos móviles inteligentes más populares del mundo para la educación y la investigación, desarrollado por MobileRobots Inc. El cuerpo del robot está conformado por aluminio de 1,6 mm mientras que los neumáticos son de caucho relleno de espuma. Tiene un peso de 9 kg y una carga útil operativa de 17 kg. Con el robot Pioneer 3DX, se puede cambiar su configuración según la aplicación que se necesite como por ejemplo para cartografía y visión, agarre y manipulación, y audio y voz. En la Figura 7 se aprecia el modelo del robot Pioneer.



Figura 7. Robot Pioneer 3DX

6. Teleoperación para robots móviles con ruedas

La teleoperación de sistemas robóticos permite transferir a un operador sus capacidades y destrezas para realizar un trabajo específico en ambientes remotos. Los sistemas de teleoperación están constituidos por tres principales áreas: el sitio local donde el “maestro” envía instrucciones hacia el sitio remoto, donde se encuentra el “esclavo” el cual interpreta la información y ejecuta la

tarea en el mundo físico y todo a través del canal de comunicación que se logra establecer un vínculo entre ambos sitios, [6]. En la Figura 8 se presenta un esquema sobre las principales áreas de la teleoperación.

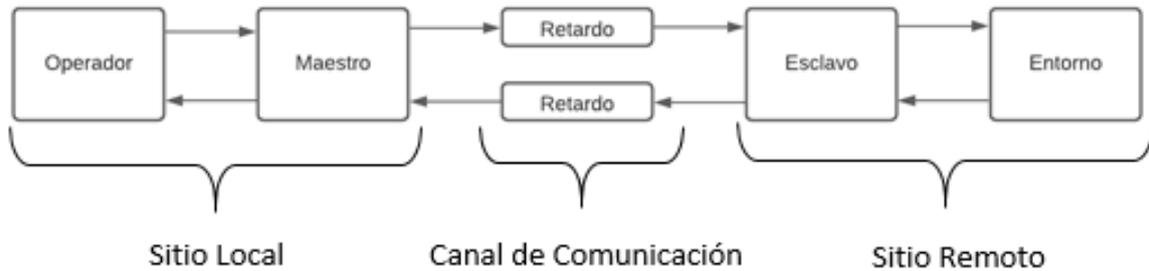


Figura 8. Áreas de la teleoperación

La teleoperación permite realizar un intercambio de información táctil y de movimiento con el fin de generar un sentido real de telepresencia, con posibilidad de interactuar con personas y objetos a distancia. Con este concepto se abren varias aplicaciones como: industrias de servicio, industria nuclear, exploración de ambientes peligrosos, telemedicina, entre otros. La teleoperación comprende toda tecnología que permita al ser humano dirigir a distancia tareas impredecibles o no repetitivas en ambientes hostiles y/o inaccesibles. Se debe tener en consideración la principal diferencia que tiene la teleoperación con la forma de trabajar de un robot industrial, la cual es que al momento de realizar una trabajo, siempre debe estar presente un operador humano. Un sistema de teleoperación está formado básicamente con los siguientes elementos, [4]:

1. Operador o Teleoperador: Es aquel ser humano encargado del control de la operación a distancia. Su intervención puede ir desde la manipulación continua del dispositivo teleoperado o la supervisión e indicación de planes y objetivos cada cierto tiempo.
2. Dispositivo Teleoperado: Este podrá ser un robot, un manipulador, vehículo u otro dispositivo similar que trabaje en la zona remota y que responda a las órdenes dadas por el operador.
3. Dispositivos de Control: Conjunto de instrumentos que posibiliten al operador la interacción con el sistema de teleoperación, generando órdenes para el dispositivo teleoperado.
4. Dispositivos de realimentación: Dispositivos que entregan información codificada al operador de la zona remota.
5. Control y Canales de comunicación: Conjunto de dispositivos que envían y reciben las señales transmitidas por el operador y el dispositivo teleoperado.

6. Sensores: Dispositivos utilizados para la recolección de información de la zona remota.

A continuación, en la Figura 9 se presenta un esquema sobre los elementos de la teleoperación.

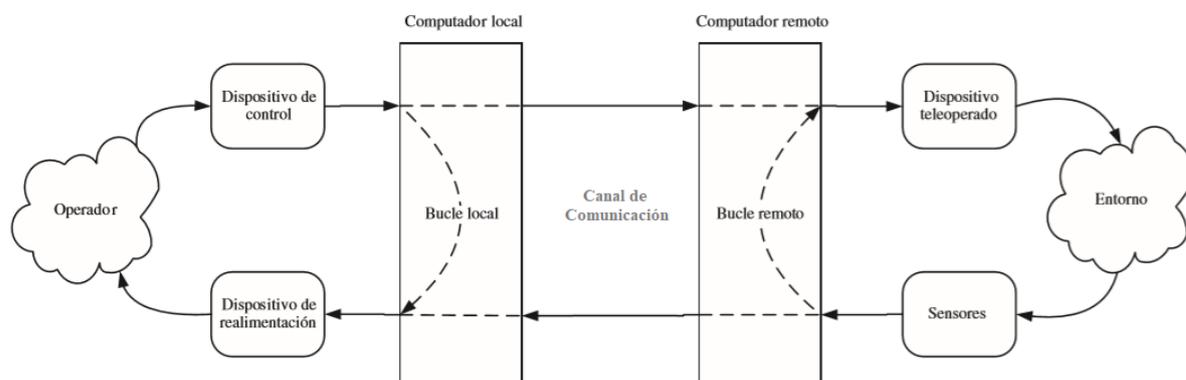


Figura 9. Elementos de la teleoperación

La robótica y la teleoperación son dos ciencias que han tomado caminos diferentes durante su desarrollo. La robótica, por un lado, busca trabajar de forma automática en entornos donde sus variables son fijas y sus operaciones son repetitivas donde la velocidad de operación es elevada con el fin de disminuir el tiempo de ciclo de operación, mientras que la teleoperación se aplica más en entornos complejos, impredecibles y por lo común hostiles, donde lo verdaderamente importante es la fuerza que éste ejerce sobre el entorno. Pero ambas ciencias han abordado un mismo problema para su desarrollo: la manipulación. El objetivo final que tiene la teleoperación y la robótica es el mismo que es la total flexibilidad con completa autonomía.

Los dispositivos de control y de realimentación son elementos importantes de un sistema de teleoperación en robots móviles con ruedas. En referencia al control, estos son empleados por el operador humano con el fin de generar las instrucciones de movimiento o control para el sistema teleoperado. Estos pueden clasificarse en función de los grados de libertad que se puede controlar de una manera independiente. Existen los dispositivos comandados en un plano (2D) o los controlados en el espacio (3D), que son los más utilizados en la teleoperación. Por otro lado, están los de realimentación, encarados de informar al operador sobre el desarrollo del trabajo hecho por el robot móvil en la zona remota. Los diferentes modelos que existen en el mercado están enfocados principalmente por el tipo de información que se va a mostrar al operador como lo es la información visual, táctil, cinestésica o auditiva.

7. Modelación cinemática de un robot móvil con tracción diferencial y restricción no holonómica

Existen parámetros físicos de los cuales depende el modelo a desarrollar del robot móvil que se aprecian en la Figura 10.

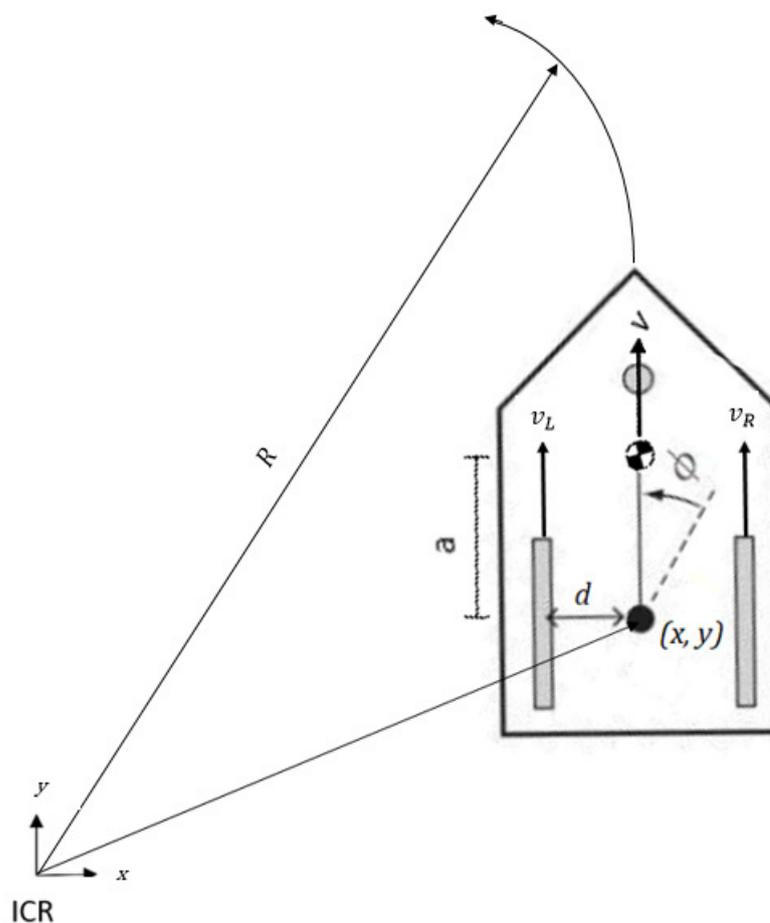


Figura 10. Diagrama de Robot de Tracción Diferencial

Donde:

- d es la longitud del punto de análisis hacia la rueda, en m.
- v es la velocidad lineal del robot, en m/s.
- a es la longitud entre el punto de análisis hacia el centro de masa del robot, en m.
- ϕ es la orientación con respecto al sistema de referencia, en $^{\circ}$.
- x, y es la posición del punto de análisis con respecto a un sistema de referencia, en m.
- v_L es la velocidad lineal de la llanta izquierda, en m/s.
- v_R es la velocidad lineal de la llanta derecha, en m/s.

R es la distancia entre el punto de análisis y el centro instantáneo de rotación, en m.

Conociendo esto, se debe encontrar las coordenadas generalizadas del robot dado por (1):

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

q es el vector de coordenadas generalizadas del robot, adimensional.

Las entradas de control en el sistema vienen dados por (2):

$$u = \begin{bmatrix} u_R \\ u_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

u_R es la velocidad de giro del motor derecho, en rad/s.

u_L es la velocidad de giro del motor izquierdo, en rad/s.

El modelo cinemático del robot de tracción diferencial se resume en la relación que existe de la derivada de las coordenadas generalizadas \dot{q} que son las velocidades del robot de tracción diferencial en función de las entradas de control. Se conoce el modelo cinemático en función de la velocidad lineal y angular del robot dada por (3), (4) y (5):

$$\dot{x} = v \cdot \cos\phi - a \cdot \omega \cdot \sin\phi \quad (3)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin\phi + a \cdot \omega \cdot \cos\phi \quad (4)$$

$$\dot{\phi} = \omega \quad (5)$$

Donde:

\dot{x} es la velocidad lineal del robot asociado al eje x, en m/s.

\dot{y} es la velocidad lineal del robot asociado al eje y, en m/s.

$\dot{\phi}$ es la velocidad angular del robot asociado a la orientación con respecto al sistema de referencia, , en rad/s.

w es la velocidad angular del robot, en rad/s.

La velocidad lineal, con respecto al centro instantáneo de rotación viene dado por (6) y, si se analiza de ésta manera, la velocidad de las ruedas izquierda y derecha se obtiene con (7) y (8) respectivamente.

$$v = \omega \cdot R \quad (6)$$

$$v_L = \omega \cdot R_L \quad (7)$$

$$v_R = \omega \cdot R_R \quad (8)$$

Donde:

R_L distancia entre la llanta izquierda y el centro instantáneo de rotación, en m.

R_R distancia entre la llanta derecha y el centro instantáneo de rotación, en m.

Se puede apreciar de mejor manera en la Figura 10 la distancia que existe entre el centro instantáneo de rotación (ICR) y el robot de tracción diferencial.

A partir de ello, se realiza el proceso matemático para conocer las ecuaciones de las velocidades lineal con (9) y angular con (10) en función de las entradas de control.

$$R_R = R_L + 2d$$

$$\frac{v_R}{\omega} = \frac{v_L}{\omega} + 2d$$

$$\omega = \frac{v_R + v_L}{2d}$$

$$\omega = \frac{r}{2d} \cdot (u_R - u_L) \quad (9)$$

$$R = \frac{R_R + R_L}{2}$$

$$\omega \cdot R = \frac{\omega \cdot R_R + \omega \cdot R_L}{2}$$

$$v = \frac{v_R + v_L}{2}$$

$$v = \frac{r}{2} \cdot (u_R + u_L) \quad (10)$$

Donde

r es el radio de la rueda izquierda y derecha, en m.

Conociendo esto, se reemplaza (9) en (3) y (4) y (10) en (5) para así obtener el modelo cinemático en función de las entradas de control, dadas por (11), (12) y (13).

$$\dot{x} = \frac{r}{2} \cdot \cos\phi \cdot (u_R + u_L) - a \cdot \omega \cdot \sin\phi \quad (11)$$

$$\dot{y} = \frac{r}{2} \cdot \sin\phi \cdot (u_R + u_L) + a \cdot \omega \cdot \cos\phi \quad (12)$$

$$\dot{\phi} = \frac{r}{2d} \cdot (u_R - u_L) \quad (13)$$

Existen casos en los que el centro de masa no coincide con el punto de análisis en el robot de tracción diferencial, y esto se da por el largo en sus dimensiones. Esto lo que provoca es que la trayectoria que tome al momento de realizar un giro, va a ser más abierta comparado con el caso cuando el centro de masa coincide con el punto de análisis. Con las ecuaciones descritas anteriormente, se establece el modelo cinemático de un robot de tracción diferencial.

8. Aplicación de robots de distanciamiento social

A continuación, se presentan algunos ejemplos de robots móviles:

- MOSRO:

Este es un robot de vigilancia diseñado para la seguridad en controles de procesamiento de información, eventos deportivos, lugares públicos. Posee sensores infrarrojos, detector de huellas dactilares, ultrasonidos, de gases y otros. El robot MOSRO utiliza señales Wireless Fidelity (Wi-Fi) para transferir datos desde sus sensores hasta una base de datos donde compara con datos ya establecidos; además se lo utiliza para la supervisión del trabajo de estos robots. El robot mide 116 cm de alto, 30 cm de ancho y 30 cm de largo, con un peso de 25 kg y alcanzar una velocidad de 7 km/h, [6]. En la Figura 11 [16] se aprecia un modelo del robot MOSRO.



Figura 11. Robot MOSRO

- SRV-1:

Este robot fue desarrollado por la empresa Surveyor Corporation para realizar un telecontrol y vigilar entornos, grabar videos, detectar movimientos, etc. Posee la ventaja de ser programado en casi cualquier lenguaje de programación, además de tener la facilidad de agregar más dispositivos y sensores para lograr un funcionamiento óptimo. Utiliza una comunicación inalámbrica mediante Wi-Fi para así controlarlo mediante una computadora, [17]. Tiene una velocidad de 40 cm/s y el alcance del Wi-Fi es de unos 100 m. Véase la Figura 12 [17].



Figura 12. Robot SRV – 1

- Spot:

Modelo diseñado por Boston Dynamics, es un robot móvil con locomoción de 4 patas donde se le ha integrado cámaras y sensores que puedan identificar una violación a estándares de distanciamiento social en zonas públicas y genere un mensaje de advertencia. Con sus 4 patas puede llegar a una velocidad de 1,6 m/s y transportar una carga de hasta 14 kg. Tiene una autonomía de 90 min, una altura de 84 cm y pesa alrededor de 25 kg, [18]. La Figura 13 [18] muestra el robot Spot.



Figura 13. Robot Spot

9. Normas de bioseguridad frente al Covid-19

Debido al incremento de contagios respecto al Covid-19, la Organización Mundial de la Salud (OMS) actualizó en Octubre del 2020 las recomendaciones de precaución para evitar la propagación del virus las cuales se explicarán a continuación, según [19]:

- **Mantener el distanciamiento físico:** Se recomienda guardar al menos 1 metro de distancia entre personas, con el objetivo de reducir el riesgo de infección al momento de toser, hablar o estornudar. Si se encuentran en espacios interiores se recomienda una distancia aún mayor. Cuanto mayor distancia, mejor.
- **Llevar mascarilla:** El utilizar mascarilla se debe convertir en parte normal de la interacción con otras personas. Es esencial utilizar, guardar y limpiar las mascarillas correctamente. Se debe asegurar que cubra la nariz, la boca y el mentón.
- **Ventilar bien las habitaciones:** Los riesgos de contagio de Covid-19 son mayores en espacios insuficientemente ventilados en donde las personas pasan mucho tiempo juntas y muy cerca unas de otras. Se debe aumentar el caudal de aire dentro de un espacio cerrado ya que evita que el virus se propague con mayor facilidad por medio de gotículas respiratorias o aerosoles.
- **Evitar las aglomeraciones:** Las recomendaciones dadas por la OMS sugieren que se debe evitar los espacios cerrados, congestionados o que entrañen contactos cercanos como restaurantes, oficinas o lugares de culto en los que se han reunido personas.

En el Ecuador se implantan las normas de bioseguridad según la OMS detalladas anteriormente, con los protocolos básicos como el lavado de manos, distanciamiento social, uso obligatorio de la mascarilla y evitar aglomeraciones.

10. Consideraciones de diseño

Se propone un esquema básico del proyecto en la Figura 14 con las consideraciones básicas de diseño necesarias para su funcionamiento, así como también las dimensiones funcionales por medio de la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones funcionales

Atributo	Dimensión
Ancho del robot	25-35 cm

Atributo	Dimensión
Largo del robot	30-40 cm
Altura del robot	20-70 cm
Diámetro de rueda	10-20 cm
Área de funcionamiento	100-200 m ²

En base a lo desarrollado en la sección 8, se toma en cuenta los parámetros de los robots existentes para desarrollar las consideraciones de diseño del prototipo funcional del presente proyecto.

11. Especificaciones técnicas

Por medio del uso de la función de calidad, se definen las especificaciones técnicas para el diseño y construcción del proyecto.

11.1. Casa de la calidad

El despliegue de la función de calidad (QFD) se define como *"La conversión de las demandas del consumidor en características de calidad y el desarrollo de una calidad de diseño para el producto terminado"*, [20]. Esto quiere decir que la metodología del QFD permite definir lo que se realizará y expone la manera de cómo hacerlo.

11.2. Características de la función de calidad

Representa los atributos mínimos que el diseño debe tener para lograr la satisfacción del usuario, y está conformado por funcionalidad y confort. Para el proyecto, los atributos que se utilizan son:

- Tamaño de 40 cm x 40 cm x 40 cm
- Material de calidad y resistente
- Cámara con alta definición y un rango de visión de 10 m
- Altavoces con alta definición de sonido
- Área de funcionamiento: 100-200 m²
- Desplazamiento en terrenos semi-lisos
- Tensión de entrada: 110V/60Hz
- Peso máximo: 30 kg

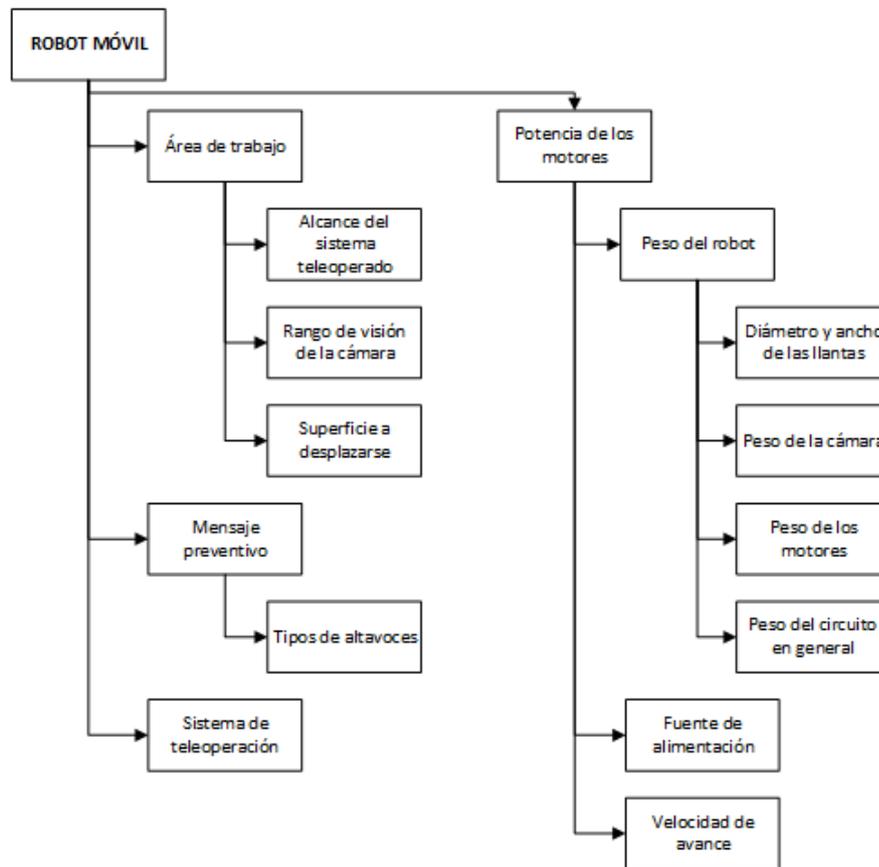


Figura 14. Diagrama de consideraciones de diseño

- Vida útil: 50 años
- Tiempo mínimo de operación: 60 minutos

11.3. Requerimientos del usuario

Representan las necesidades del usuario expresadas o determinadas basado en los mismos elementos de las características de la calidad, que para este proyecto son:

- Uso en interiores y exteriores
- Precio accesible
- Peso liviano
- Su control debe ser basado en teleoperación
- Configuración cinemática adecuada para su movilidad
- Material a utilizar
- Cámara de vigilancia

- Altavoces para emitir el mensaje preventivo contra el distanciamiento social
- Área de trabajo extensa
- Tiempo de ejecución considerable

11.4. Implementación de la casa de la calidad

Se implementa la casa de la calidad como se muestra en el Anexo K. Esto permite identificar y priorizar en el diseño características del robot móvil como el peso, la cámara a utilizar y el tiempo de funcionamiento, con el objetivo de encontrar satisfacción del usuario en cuanto al diseño.

11.5. Selección de configuraciones cinemáticas

El proceso de evaluación para la selección de la configuración cinemática ideal para el proyecto, se lo lleva a cabo mediante criterios ponderados que muestran un resultado tabular de las soluciones. Los criterios evaluación se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de Ponderación

Valor	Criterio
1	Si la solución de la fila es superior que el de la columna
0,5	Si la solución de la fila es equivalente que el de la columna
0	Si la solución de la fila es inferior que el de la columna

A continuación se presentan posibles configuraciones cinemáticas de robots móviles:

- Solución A: Ackerman
- Solución B: Triciclo clásico
- Solución C: Tracción Diferencial
- Solución D: Síncrona
- Solución E: Tracción Omnidireccional
- Solución F: Uniciclo

Se presenta los criterios que se consideraron más determinantes para el desarrollo del proyecto.

- Movilidad: el robot móvil debe ser capaz de desplazarse con gran facilidad.
- Control: el funcionamiento de cada configuración es diferente debido a sus componentes.

- Precio moderado: el precio de construcción debe ser asequible.
- Peso: debe ser bajo que permita al robot moverse con facilidad.

A partir de los requerimientos detallados, se establece los valores específicos de ponderación de cada uno de ellos, expuesto en la Tabla 5. La importancia de los criterios, de acuerdo al objetivo del proyecto, tienen el siguiente orden:

Movilidad > Control > Precio > Peso

Tabla 5. Valores de ponderación de la configuración cinemática

Criterio	Movilidad	Control	Precio	Peso	$\Sigma + 1$	Ponderación
Movilidad		1	1	1	4	0,40
Control	0		1	1	3	0,30
Precio	0	0		1	2	0,20
Peso	0	0	0		1	0,10
				Suma	10	1,00

Con la ponderación de los criterios, se evalúan las opciones entre sí para decidir la mejor opción. A continuación en las Tablas 6 a 9 se presentan los pesos específicos para cada requerimiento:

Tabla 6. Peso específico del criterio "Movilidad"

Movilidad	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	Sol. F	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. A		0	0	1	0	0	2,00	0,09
Sol. B	1		0	1	0	0,50	3,50	0,15
Sol. C	1	1		0	0	1	4,00	0,17
Sol. D	1	1	1		0,50	1	5,50	0,24
Sol. E	1	1	1	0,50		1	5,50	0,24
Sol. F	1	0,50	0	0	0		2,50	0,11
						Suma	23,00	1,00

Tabla 7. Peso específico del criterio "Control"

Control	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	Sol. F	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. A		0,50	0	0	1	1	3,50	0,17
Sol. B	0,50		0	0	1	0,50	3,00	0,14

Control	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	Sol. F	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. C	1	1		1	1	1	6,00	0,29
Sol. D	0	0	0		0,50	0	1,50	0,07
Sol. E	0	0	0	0,50		0	1,50	0,07
Sol. F	1	1	0,50	1	1		5,50	0,26
						Suma	21	1,00

Tabla 8. Peso específico del criterio "Precio"

Precio	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	Sol. F	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. A		0	0	1	1	0	3,00	0,14
Sol. B	1		0	0	1	0,50	3,50	0,17
Sol. C	1	1		1	1	1	6,00	0,29
Sol. D	0	0	0		0,50	0	1,50	0,07
Sol. E	0,50	0	0,50	0,50		0	2,50	0,12
Sol. F	1	0,50	0	1	1		4,50	0,21
						Suma	21	1,00

Tabla 9. Peso específico del criterio "Peso"

Peso	Sol. A	Sol. B	Sol. C	Sol. D	Sol. E	Sol. F	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. A		0	0	0	0	0	1,00	0,05
Sol. B	1		0	0	1	0,50	3,50	0,18
Sol. C	1	1		1	1	1	6,00	0,30
Sol. D	1	0	0		0,50	0	2,50	0,13
Sol. E	1	0	0	0,50		0	2,50	0,13
Sol. F	1	0,50	0	1	1		4,50	0,23
						Suma	20,00	1,00

En la Tabla 10 se tiene el posicionamiento de las distintas soluciones, se reúne los pesos específicos de cada solución escalados por el criterio de ponderación resultado de la Tabla 5. Con este se obtiene la mejor solución en base a los criterios considerados previamente.

Tabla 10. Resultado de Posicionamiento

Conclusión	Movilidad	Control	Precio	Peso	Σ	Prioridad
Sol. A	0,036	0,051	0,028	0,005	0,120	6
Sol. B	0,060	0,042	0,034	0,018	0,153	4
Sol. C	0,068	0,087	0,058	0,030	0,243	1
Sol. D	0,096	0,021	0,014	0,013	0,144	5
Sol. E	0,096	0,021	0,024	0,013	0,154	3
Sol. F	0,044	0,078	0,042	0,023	0,187	2

La solución C obtiene la mejor puntuación, seguido de la solución F, la solución E, la solución B, la solución D y la solución A. Esto quiere decir que la configuración cinemática de tracción diferencial para un robot móvil es la mejor opción para el desarrollo de este proyecto en el ámbito del control de distanciamiento social.

11.6. Selección del módulo de control electrónico

Al igual que en la sección 11.5, se utiliza el método de criterios ponderados y se presentan 3 posibles controladores aceptables para el presente proyecto:

- Solución G: Raspberry Pi 4 Modelo B
- Solución H: Arduino UNO
- Solucion I: PIC

Los criterios que se consideran más determinantes son los siguientes:

- Coste: durante el desarrollo del proyecto se debe economizar en todo lo posible.
- Periféricos: debe tener los necesarios que cumplan con las características mínimas que faciliten el desarrollo del mismo.
- Software: debe ser versátil y adaptable con protocolos de comunicación, además requiere ser compatible con microcontroladores.

Los valores específicos de ponderación de los criterios mencionados, se muestran en la Tabla 11. Para este proyecto, se ha tomado el siguiente orden de importancia:

Periféricos > Coste > Software

Tabla 11. Valores de ponderación del módulo de control electrónico

Criterio	Periféricos	Coste	Software	$\Sigma + 1$	Ponderación
Periféricos		1	1	3	0,50
Coste	0		1	2	0,33
Software	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

A continuación se presentan los valores específicos de ponderación de cada criterio con respecto al módulo de control electrónico en la Tabla 12, 13 y 14.

Tabla 12. Valor de ponderación del criterio "Periféricos"

Periféricos	Sol. G	Sol. H	Sol. I	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. G		1	1	3	0,50
Sol. H	0		1	2	0,33
Sol. I	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

Tabla 13. Valor de ponderación del criterio "Coste"

Coste	Sol. G	Sol. H	Sol. I	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. G		0	0	1	0,17
Sol. H	1		0	2	0,33
Sol. I	1	1		3	0,50
			Suma	6	1,00

Tabla 14. Valor de ponderación del criterio "Software"

Software	Sol. G	Sol. H	Sol. I	$\Sigma + 1$	Ponderación
Sol. G		1	1	3	0,50
Sol. H	0		1	2	0,33
Sol. I	0	0		1	0,17
			Suma	6	1,00

En la Tabla 15 se muestra el posicionamiento de las distintas soluciones para el módulo de control electrónico, estableciendo a la solución G como la más óptima del proyecto, es decir utilizar

Raspberry Pi 4 Modelo B.

Tabla 15. Resultado de Posicionamiento

Conclusión	Periféricos	Coste	Software	Σ	Prioridad
Sol. G	0,25	0,06	0,09	0,39	1
Sol. H	0,17	0,11	0,06	0,33	2
Sol. I	0,09	0,17	0,03	0,28	3

11.7. Selección de la plataforma de programación

Para la plataforma de programación, se utiliza el programa que viene instalado por defecto en el sistema operativo de Raspbian y el más usado dentro de las placas de Raspberry, el cual es Python. Se escoge éste, que es un lenguaje que se desarrolla bajo licencia de código abierto, demuestra una gran versatilidad al momento de aplicar a diferentes campos y combina propiedades de diferentes paradigmas de programación.

11.8. Requerimientos generales del prototipo

En base al análisis de alternativas realizado, se presenta los requerimientos para desarrollar el prototipo propuesto:

- Configuración cinemática de tracción diferencial
- Microcontrolador Raspberry
- Lenguaje de programación Python
- Peso máximo de 30 kg
- Tensión de entrada de 110V/60Hz
- Cámara de video
- Altavoces
- Desplazamiento para terrenos semi-lisos
- Tiempo de funcionamiento mínimo de 60 minutos
- Sistema de comunicación inalámbrico

12. Diseño Mecatrónico

El diseño mecatrónico consta del dimensionamiento y selección de la parte mecánica, así también como de la electrónica donde a su vez se desarrolla la programación del prototipo. Utilizando un software de diseño CAD 3D, se modela el prototipo del robot de tracción diferencial para el monitoreo del distanciamiento social. En la Figura 15 se señala los principales componentes y se muestra su denominación en la Tabla 16:

Tabla 16. Denominación de los elementos

Elemento	Denominación
1	Cámara
2	Parlantes
3	Carcasa
4	Batería
5	Base inferior
6	Rueda garrucha
7	Llanta
8	Motor
9	Microcontrolador
10	Base intermedia
11	Base superior
12	Tapa trasera

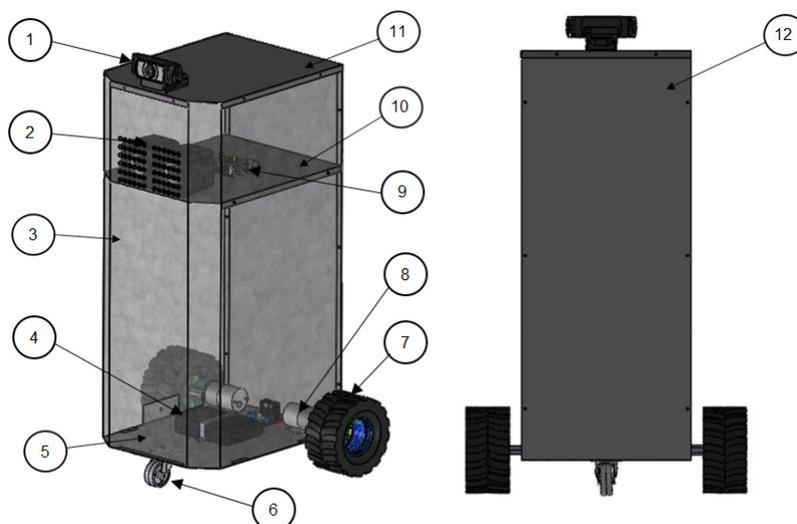


Figura 15. Modelo 3D del robot

12.1. Diseño Mecánico

En esta sección se incluyen los cálculos del diseño y dimensionamiento de la estructura y piezas mecánicas como se muestran en la Figura 15. Se toma a consideración de diseño los elementos como los motores, la base inferior, la base superior y la base intermedia. Los elementos como la carcasa y la tapa trasera no se realiza un análisis a profundidad puesto que se utiliza solo para protección de los componentes internos del prototipo.

12.1.1. Masa de la plataforma

Mediante la Tabla 17, se realiza una estimación de las masas de los elementos que se utilizarán para la construcción del robot móvil como paso previo al diseño de los componentes por separado.

Tabla 17. Masa estimada de los elementos

Elementos	Masa unitaria (kg)	Cantidad	Masa total (kg)
Llanta	0,17	2,00	0,34
Cámara	0,06	1,00	0,06
Microcontrolador	0,13	1,00	0,13
Elementos electrónicos	0,50	1,00	0,50
Estructura	15,00	1,00	15,00
Rueda garrucha	0,07	1,00	0,07
Varios (Ensamblaje)	1,00	1,00	1,00
Batería	0,17	1,00	0,17
Altavoces	0,12	1,00	0,12
		Total	17,50

12.1.2. Dimensionamiento de motor

Para los robots de tracción diferencial, es ideal utilizar motores DC, los cuales de manera individual proporcionan el movimiento al robot. Los parámetros necesarios para la selección de los motores del robot son su velocidad, torque, potencia, la superficie en donde se desplazará y el peso estimado a cargar.

Dentro del dimensionamiento de los motores, se debe tomar en consideración las fuerzas que

actúan sobre éste. Principalmente se tiene en cuenta las siguientes fuerzas:

- **Peso:** El robot móvil, para que genere movimiento, debe ser capaz de desplazar su propia masa. Se considera que el robot móvil operará en lugares públicos con superficies de asfalto y concreto, y deberá lograr desplazarse en lugares con rampas para personas con discapacidad.
- **Fuerza a la resistencia de rodadura:** Esta fuerza se genera en las llantas y el contacto con el suelo en el que opere, por lo que, se origina una resistencia opuesta al movimiento del robot móvil. Dependiendo el suelo en el que trabaje, aparece un coeficiente de resistencia a la rodadura, el cual se muestra en la Tabla 18, tomada de la referencia [21]. Para el presente proyecto se considera como terreno semi-liso en lugares públicos a las superficies de concreto o asfalto y que no presenten variaciones de inclinación, a excepción de rampas para discapacitados, en el cual se realizaran las pruebas de funcionamiento.

Tabla 18. Coeficiente de resistencia a la rodadura para diferentes terrenos

Superficie de contacto	Coeficiente de resistencia a la rodadura
Concreto o asfalto	0,013
Grava apisonada	0,020
Tarmac	0,025
Camino sin pavimentar	0,050
Césped, tierra y arena	0,100 - 0,350

12.1.3. Velocidad del motor

Para determinar la velocidad del motor, se analiza un valor de velocidad promedio para el prototipo en base a las características de diferentes robots móviles visto en la sección 8. Se selecciona una velocidad de 2,50 km/h que se encuentra dentro del promedio, y a partir de éste dato se busca obtener la velocidad angular del motor. Para ello, se necesita el radio de la rueda a utilizar. Por medio de la Tabla 19, se presentan dos alternativas para la selección de las llantas del robot.

Tabla 19. Alternativas de llantas para el robot

Llanta	Características
Llanta 260 PNL3	Diámetro: 260 mm Peso: 0,90 kg Ancho: 55 mm
Dagu Wild Thumper	Diámetro: 120 mm Peso: 0,17 kg Ancho: 60 mm

Se selecciona la llanta "Dagu Wild Thumper" principalmente por presentar una gran versatilidad al acoplarse con diferentes motores del mercado. Conociendo el diámetro de la llanta para el robot móvil y la superficie donde operará, mencionado en la sección 12.1.2, se determina que una rueda garrucha de 1 1/2 " con recubrimiento de caucho es la opción óptima para utilizar en el prototipo.

La velocidad angular del motor se obtiene mediante (14).

$$V_m = w_m \cdot r \quad (14)$$

Donde

V_m es la velocidad lineal del motor, en m/s.

w_m es la velocidad angular del motor, en rad/s.

Despejando de (14) w_m y reemplazando los valores se tiene:

$$w_m = \frac{V_m}{r}$$

$$w_m = \frac{0,69}{0,06}$$

$$w_m = 11,57 \text{ rad/s} = 110,52 \text{ rpm}$$

Esto quiere decir que el motor debe tener por lo menos 110,52 rpm para lograr desplazarse a 2,50 km/h que es la velocidad promedio.

12.1.4. Potencia del motor

En la selección del motor otro parámetro importante es la potencia debido a que depende directamente del torque y éste refiere a la fuerza que generará el motor.

Para la potencia del motor, se utiliza (15).

$$P_m = T_m \cdot \omega_m \quad (15)$$

Donde

P_m es la potencia del motor, en W.

T_m es el torque del motor, en N/m.

Como se definió en la sección 12.1.2, el robot móvil está previsto que opere en lugares públicos cuyo piso sea concreto o asfalto, donde hay la probabilidad que existan rampas para personas con discapacidad. Para ello, en la Figura 16 se expresan las fuerzas que actúan en el mismo en un suelo inclinado.

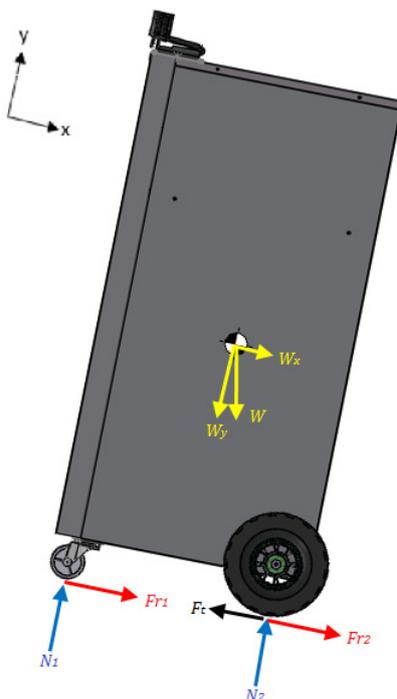


Figura 16. Fuerzas que actúan sobre el robot móvil

Donde

F_t es la fuerza total a superar por el robot móvil, en N.

W es el peso del robot móvil, en N.

W_x es la componente del peso en el eje x del robot móvil, en N.

W_y es la componente del peso en el eje y del robot móvil, en N.

Fr_1 es la fuerza de fricción en la llanta delantera, en N.

Fr_2 es la fuerza de fricción en la llanta trasera, en N.

N_1 es la fuerza normal en la llanta delantera, en N.

N_2 es la fuerza normal en la llanta trasera, en N.

Para calcular la fuerza total a superar y que el robot móvil pueda moverse, se obtiene primero el peso de éste mediante (16) :

$$W = m \cdot g \quad (16)$$

Donde

m es la masa total estimada del robot visto en la Tabla 17, en kg.

g es la aceleración gravitacional, en m/s^2 .

Reemplazando los valores correspondientes en (16), se obtiene lo siguiente:

$$W = 17,50 \cdot 9,81$$

$$W = 171,71 \text{ N}$$

Para obtener el valor de las componentes del peso del robot móvil, se utiliza el grado de inclinación que tiene una rampa para personas con discapacidad. El Servicio Ecuatoriano de Normalización, [22], establece rangos de pendientes longitudinales máximas para los tramos de rampa, como se aprecia en la Figura 17, tomado de [22].

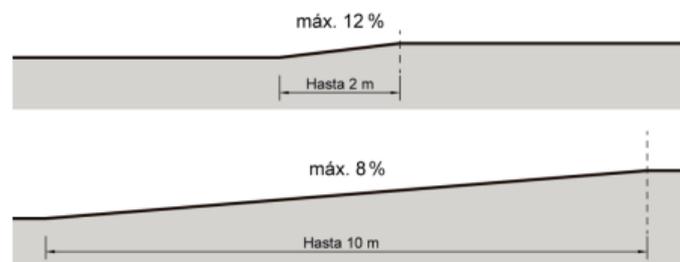


Figura 17. Pendientes longitudinales

Teniendo en cuenta lo mencionado, mediante (17) se calcula el grado de inclinación para el caso más crítico presentado en la Figura 17, es decir aquel con un rango de pendiente máxima del 12%.

$$P_r = \frac{h_r}{l} \cdot 100 \quad (17)$$

Donde

P_r es el rango de pendiente longitudinal máxima, en %.

h_r es la altura de la rampa, en m.

l es la longitud horizontal de la rampa, en m.

Reemplazando los valores correspondientes en (17), se obtiene lo siguiente:

$$12\% = \frac{h_r}{2} \cdot 100$$

$$h_r = 0,24 \text{ m}$$

Con estos resultados, se aplica la ecuación de la tangente en un triángulo rectángulo, representado en la rampa, con lo cual se obtiene que el grado de inclinación es de $6,84^\circ$. Para obtener la fuerza total a superar por el robot móvil, se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje x, sumatoria de fuerzas en el eje y, y sumatoria de momentos en la rueda trasera, dando como resultado (18), (19) y (20).

$$\sum y = 0$$

$$N_1 + N_2 = W \cos \theta \quad (18)$$

Donde

θ es el ángulo de inclinación en rampas para discapacitados, en $^\circ$.

$$\sum x = 0$$

$$Fr_1 + Fr_2 + W \sin \theta = F_t$$

$$C_i(N_1 + N_2) + W \sin \theta = F_t \quad (19)$$

Donde

C_i es el coeficiente de resistencia a la rodadura visto en la Tabla 18, adimensional.

$$\sum M = 0$$

$$(N_1)(d_{12}) = (W \cos \theta) \left(\frac{d_{12}}{2} \right)$$

$$N_1 = \frac{W \cos \theta}{2} \quad (20)$$

Donde

d_{12} es la distancia entre la llanta trasera y delantera, en m.

Se reemplaza (20) en (18), obteniendo (21).

$$N_2 = W \cos \theta - \frac{W \cos \theta}{2} \quad (21)$$

Con ello se reemplaza (21) en (19) para obtener (22).

$$C_i(W \cos \theta) + W \sin \theta = F_t \quad (22)$$

Para el caso particular de éste proyecto, de acuerdo a la Tabla 18, se selecciona el coeficiente de rodadura de concreto o asfalto, que es suelo a desplazarse planteado para el prototipo, por lo que, el valor correspondiente es de 0,013. Se reemplazan los valores en (22) y se obtiene la fuerza total a superar del robot móvil.

$$(0,013)(171,71 \cdot \cos(6,84^\circ)) + 171,71 \cdot \sin(6,84^\circ) = F_t$$

$$F_t = 22,67 \text{ N}$$

Para encontrar el torque necesario de los motores, se utiliza (23).

$$T_m = F_t \cdot r \quad (23)$$

Reemplazando los valores correspondientes, se obtiene el valor del torque de 1,36 Nm. Se requieren dos llantas y cada una controlada por un motor, por lo tanto, el torque se divide para 2, dando como resultado 0,68 Nm. Finalmente, se calcula la potencia del motor con (15) dando como resultado lo siguiente:

$$P_m = 0,68 \cdot 11,57$$

$$P_m = 7,88 \text{ W}$$

Como el modelo de robot es de tracción diferencial, éste trabaja con dos motores iguales en cada llanta. El proceso de dimensionamiento de uno es el mismo para el otro.

En resumen, los motores a seleccionar deben presentar las siguientes características:

- Potencia: 7,88 W
- Torque: 1,36 Nm
- Velocidad promedio: 110,52 rpm.

En la Tabla 20 se presentan tres alternativas de motores de 12 V que se ajustan a las características necesarias para éste proyecto.

Tabla 20. Alternativas de motores

	Potencia (W)	Torque (Nm)	Velocidad (rpm)
Motorreductor POLOLU 37Dx57L 100:1	8,00	3,14	100,00
Zhengke Motor Reductor	14,91	0,60	285,00
Motorreductor POLOLU 25Dx48L 47:1	8,40	1,17	210,00

Con ello, se selecciona el Motorreductor POLOLU 37Dx57L 100:1 que se asemeja a las características calculadas y presenta un torque suficiente para el prototipo. En la Figura 18, [23], se presentan las curvas características del motor y en la Tabla 27, [23], se muestran sus propiedades más relevantes.

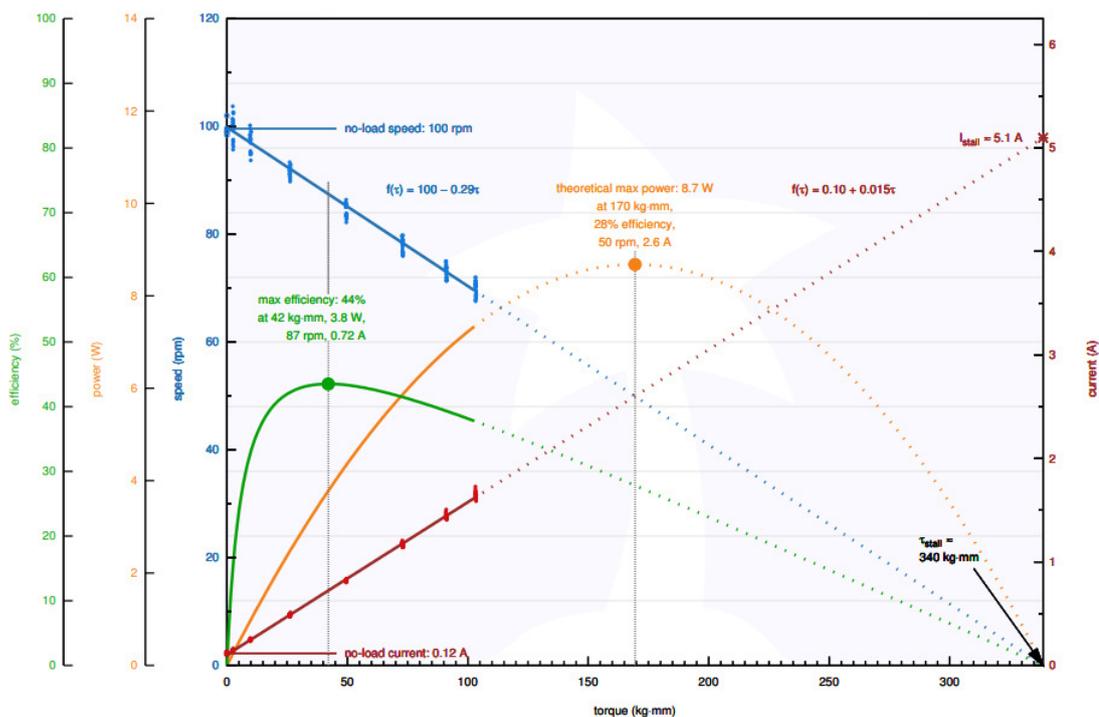


Figura 18. Curvas características de los motores del robot

Tabla 21. Características de los motores del robot

Propiedad	Valor
Voltaje Nominal	12 V
Velocidad sin carga	100 rpm
Corriente sin carga	0,2 A
Torque	34 kg · cm
Radio de engranajes	102,08:1

12.1.5. Diseño de la base superior

Para el diseño de la base superior, se realiza un análisis de esfuerzos y momentos en una viga que representará a la base superior. En la Figura 19, se muestra el diagrama de cuerpo libre con soportes fijos que simbolizan el apoyo del contorno y el peso de la cámara.



Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de la base superior, en m

Donde

P_1 es el peso de la cámara con un valor de 0,59, en N

Los pesos de los elementos fueron calculados al multiplicar su masa respectiva detallada en la Tabla 17 con la aceleración gravitacional.

Para encontrar la ecuación de la fuerza cortante, es necesario equilibrar las fuerzas verticales en cada sección, dando como resultado el diagrama de esfuerzos cortantes para la base superior, visto en la Figura 20.



Figura 20. Esfuerzos cortantes en la base superior

Para encontrar la ecuación del momento flector, de igual manera es necesario balancear el momento en cada sección, obteniendo el resultado de la Figura 21.

Para el proceso de selección del material, los requerimientos básicos son el patrón de carga, el perfil y sus dimensiones. Analizando la Figura 21, se puede obtener el momento flexionante máximo en la base superior:

$$M_{1_{max}} = 0,0008 \text{ Nm}$$

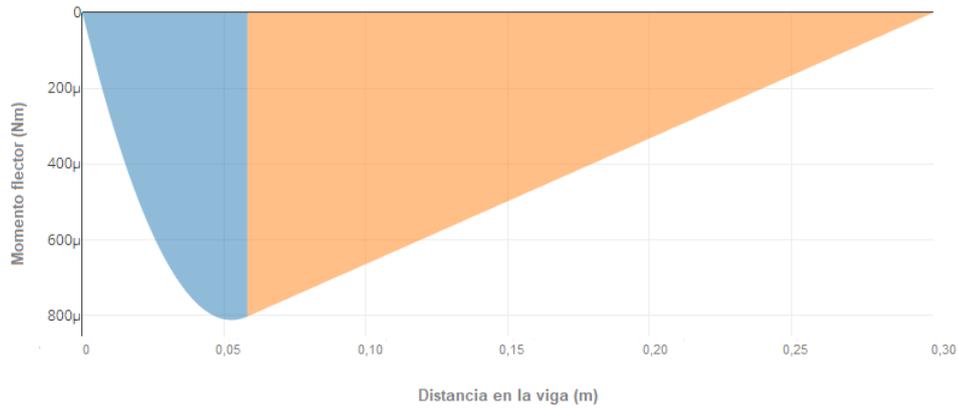


Figura 21. Momentos flectores en la base superior

Donde

$M_{1_{max}}$ es el momento flexionante máximo en la base superior, en Nm.

Con ello, se calcula el primer momento de área el cual viene dado por (24):

$$S_{1_x} = \frac{b_1 \cdot h_1^2}{24} \quad (24)$$

Donde

S_{1_x} es el módulo de sección de la sección transversal de la base superior, en m^3 .

b_1 es la distancia de base de la base superior, en m.

h_1 es la altura de la base superior, en m.

En el diseño de la propuesta realizada en modelo CAD 3D se dimensionó con la siguientes medidas para la base superior los cuales son: base 241,4 mm y altura 0,7 mm.

Reemplazando los valores correspondientes en (24), se obtiene el siguiente resultado:

$$S_{1_x} = \frac{(241,4)(0,7)^2}{24}$$

$$S_{1_x} = 4,93 \text{ mm}^3$$

Con ello, se calcula el esfuerzo flexionante máximo con la fórmula de flexión, dado por (25).

$$\sigma_{1_{max}} = \frac{M_{1_{max}}}{S_{1_x}} \quad (25)$$

Donde

$\sigma_{1_{max}}$ es el esfuerzo flexionante máximo en la base superior, en Pa.

$$\sigma_{1_{max}} = \frac{0,0008 \text{ Nm}}{4,93 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{1_{max}} = 0,16 \text{ MPa}$$

Obteniendo el esfuerzo flexionante máximo, se debe especificar el esfuerzo de diseño por medio de la Tabla 22, tomado de [24], donde se recomienda un factor de seguridad según el patrón de carga y el material a utilizar.

Tabla 22. Esfuerzos de diseño

Patrón de carga	Material dúctil	Material frágil
Estática	$\sigma_d = \frac{S_y}{2}$	$\sigma_d = \frac{S_u}{6}$
Repetida	$\sigma_d = \frac{S_u}{8}$	$\sigma_d = \frac{S_u}{10}$
Impacto o choque	$\sigma_d = \frac{S_u}{12}$	$\sigma_d = \frac{S_u}{15}$

Se considera que para éste proyecto, el patrón de carga es repetida por estar en constante movimiento soportando las cargas sometidas y se utilizará un material dúctil para que no se presente una fractura a la mínima deformación. El proceso de selección de material determina que hay que igualar el esfuerzo máximo calculado con respecto al esfuerzo de diseño como se define en (26).

$$\sigma_{1_{max}} = \sigma_{1_d} = \frac{S_{1_u}}{8} \quad (26)$$

Donde

σ_d es el esfuerzo de diseño, en Pa.

S_{1_u} es resistencia máxima del material, en Pa.

$$0,16 \text{ MPa} = \frac{S_{1_u}}{8}$$

$$S_{1_u} = 1,28 \text{ MPa}$$

Ahora con el valor de la resistencia máxima del material, se selecciona el tipo de material con el cual se va a fabricar la base superior, el cual se analiza en la sección 12.1.8.

Se realiza un análisis estructural para la pieza por medio del software CAD Solidworks, ejecutando una simulación y obteniendo un esfuerzo máximo de 0,19 MPa. En la Figura 22 se muestra el resultado de la simulación.

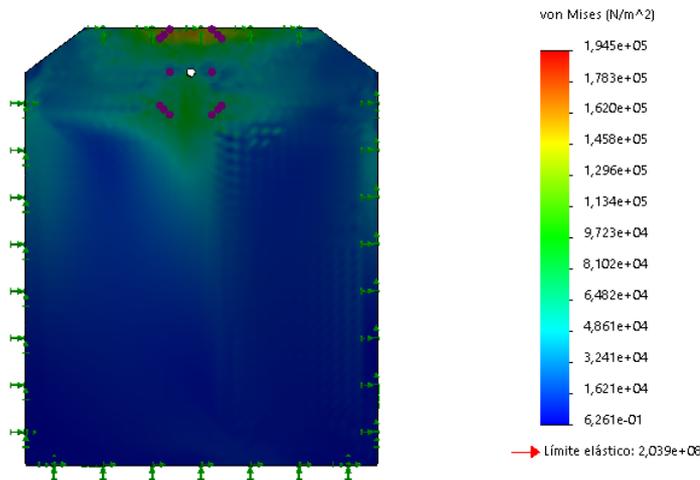


Figura 22. Simulación de la base superior

Con esto, se comprueba que la base superior soportará el esfuerzo de diseño calculado de 0,16 MPa provocado por los elementos.

12.1.6. Diseño de la base inferior

Para el diseño de la base inferior, se realiza un análisis de esfuerzos y momentos en viga que representará a la pieza. En la Figura 23, se muestra el diagrama de cuerpo libre con soportes fijos que simbolizan el apoyo del contorno y los pesos que actúan como son la batería y los motores.

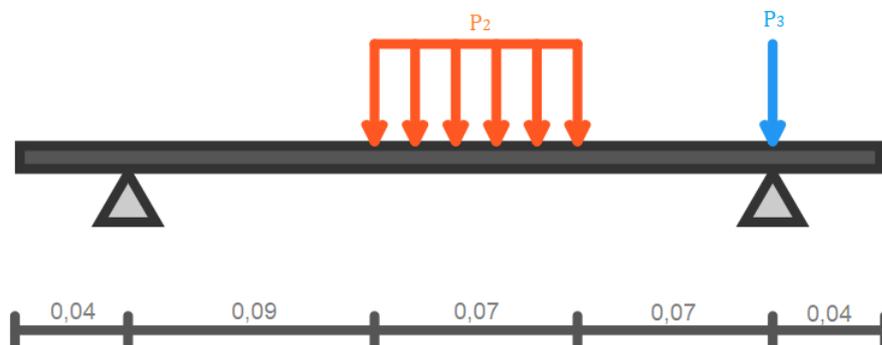


Figura 23. Diagrama de cuerpo libre de la base inferior, en m

Donde

P_2 es el peso de la batería con un valor de 1,67, en N.

P_3 es la suma del peso de los motores izquierdo y derecho con un valor de 4,12, en N

Los pesos de los elementos fueron calculados al multiplicar su masa respectiva detallada en la Tabla 17 con la aceleración gravitacional.

Para encontrar la ecuación de la fuerza cortante, es necesario equilibrar las fuerzas verticales en cada sección, dando como resultado el diagrama de esfuerzos cortantes para la base inferior, visto en la Figura 24.

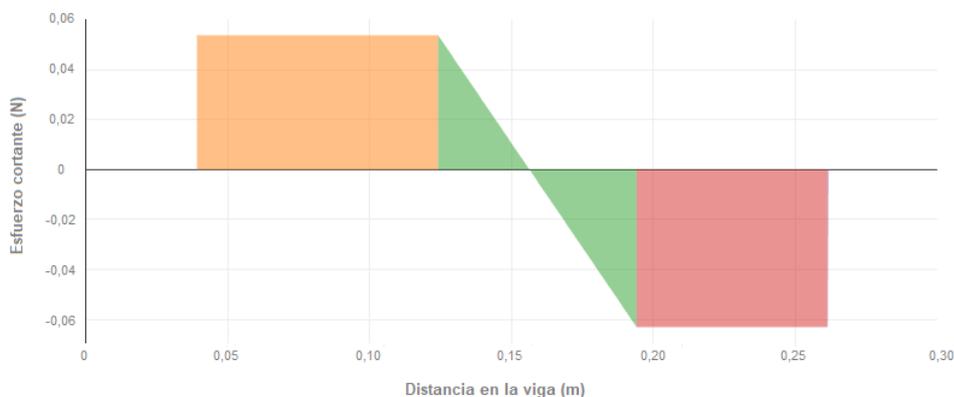


Figura 24. Esfuerzo cortante en la base inferior

Para encontrar la ecuación del momento flector, de igual manera se balancea el momento en cada sección, obteniendo el resultado de la Figura 25.

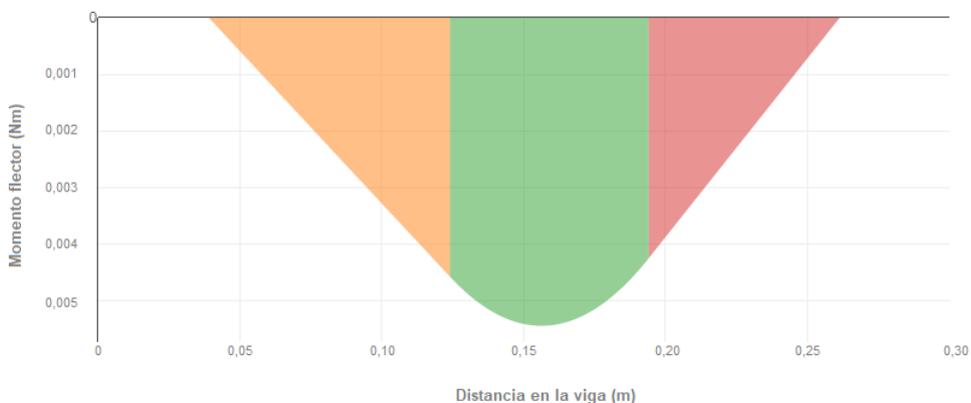


Figura 25. Momento Flector de la base inferior

Para el proceso de selección del material, los requerimientos básicos son el patrón de carga, el perfil (determinados en la sección 12.1.5) y sus dimensiones. Analizando la Figura 25, se puede obtener el momento flexionante máximo en la base inferior:

$$M_{2_{max}} = 0,0054 \text{ Nm}$$

Con ello, se calcula el primer momento de área, el cual viene dado por (24). Reemplazando los valores de la base de 240 mm y su altura de 0,70 mm que se diseñaron en el modelo CAD 3D, se obtiene el siguiente resultado:

$$S_{2_x} = \frac{(240)(0,7)^2}{24}$$

$$S_{2_x} = 4,90 \text{ mm}^3$$

Con el módulo de sección de la sección transversal, se calcula el esfuerzo flexionante máximo con la fórmula de flexión, dado por (25).

$$\sigma_{2_{max}} = \frac{0,0054 \text{ Nm}}{4,90 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{2_{max}} = 1,10 \text{ MPa}$$

Calculado el esfuerzo flexionante máximo, por medio de la Tabla 20, se determinó en la sección 12.1.5 que el patrón de carga es repetida y se utilizará un material dúctil, por lo que, el esfuerzo de diseño viene dado por (26). Reemplazando los valores correspondientes para la base inferior se obtiene lo siguiente:

$$1,10 \text{ MPa} = \frac{S_{2_u}}{8}$$

$$S_{2_u} = 8,82 \text{ MPa}$$

Ahora con el valor de la resistencia máxima del material, se selecciona el tipo de material con el cual se va a fabricar la base inferior, el cual se analiza en la sección 12.1.8.

Se realiza un análisis estructural para la pieza por medio del software CAD Solidworks, ejecutando una simulación y obteniendo un esfuerzo máximo de 0,92 MPa. En la Figura 26 se muestra el resultado de la simulación.

Con esto, se comprueba que la base superior soportará el esfuerzo de diseño calculado de 1,10 MPa provocado por los elementos.

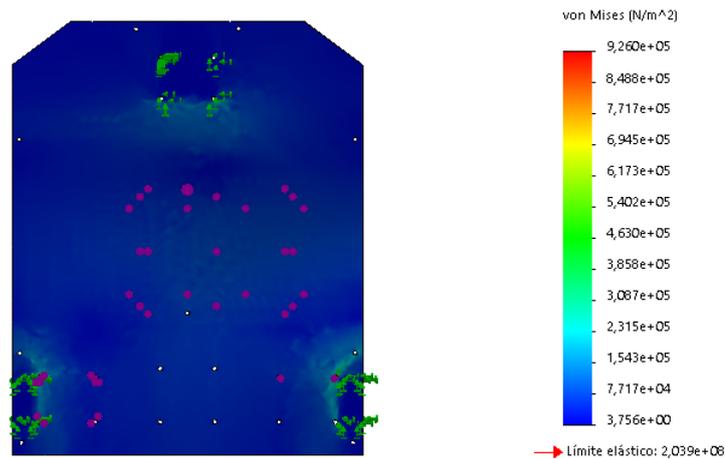


Figura 26. Simulación de la base inferior

12.1.7. Diseño de la base intermedia

Para el diseño de la base intermedia, se realiza el diagrama de cuerpo libre para analizar las fuerzas que actúan sobre ella, como se muestra en la Figura 27.

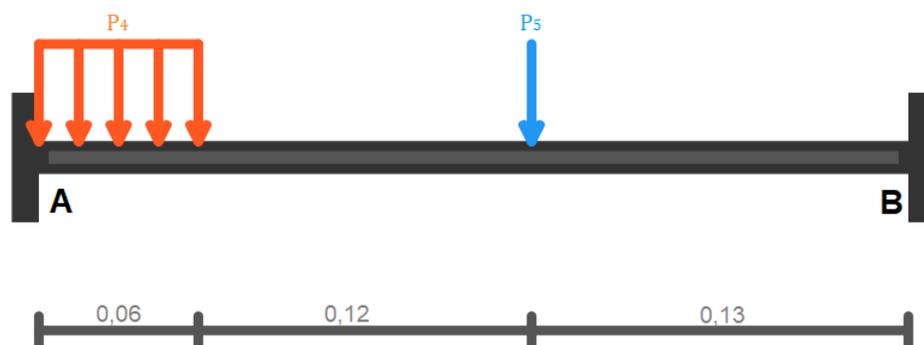


Figura 27. Diagrama de cuerpo libre de la base intermedia, en m

Donde

P_4 es el peso de los parlantes con un valor de 2,26, en N.

P_5 es el peso del Raspberry Pi 4 Modelo B con un valor de 1,31, en N.

Los pesos de los elementos fueron calculados al multiplicar su masa respectiva detallada en la Tabla 17 con la aceleración gravitacional.

El caso de la base intermedia está considerándose como una viga doblemente empotrada al estar sujeta en los extremos, lo cual da a resolverlo como una viga hiperestática al tener un grado de hiperestaticidad de 2 al analizar las fuerzas redundantes de la pieza.

Para ello primero se aplica lo que es el teorema de Mohr. El primer teorema explica que el giro de un punto de una viga con respecto a otro se puede obtener mediante el área de momentos flectores entre A y B, dividido por la rigidez de flexión, [25], expresado en (27).

$$\theta_B - \theta_A = \frac{A_{AB}}{EI} \quad (27)$$

Donde

θ_A es la inclinación que existe en el punto A al sometimiento de las fuerzas, en $^\circ$.

θ_B es la inclinación que existe en el punto B al sometimiento de las fuerzas, en $^\circ$.

A_{AB} es el área de momentos de un punto A hacia un punto B, en m^2 .

EI es la rigidez a flexión, en Nm^2 .

El segundo teorema de Mohr dice que la desviación desde un punto B a la tangente de un punto A es igual al momento estático del área del diagrama interceptada por las verticales trazadas por los puntos A y B, [25], expresado a través de (28).

$$\delta_{AB} = \frac{A_{AB} \cdot \bar{x}}{EI} \quad (28)$$

Donde

δ_{AB} es la longitud del segmento de desviación de la base intermedia, en m.

\bar{x} es la distancia del centroide del área de momentos, en m.

Continuando con el proceso de diseño, se utiliza el principio de superposición para dividir el caso principal de la Figura 27 en tres casos como se muestran en la Figura 28, Figura 29 y Figura 30, con el fin de obtener los valores de las reacciones en el punto B.

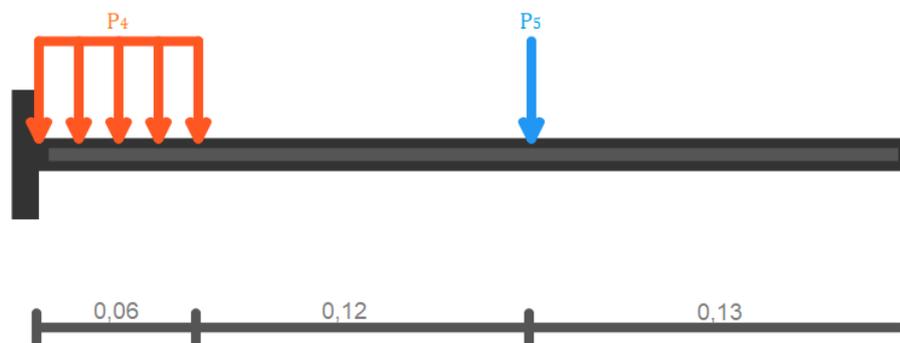


Figura 28. Diagrama de cuerpo libre para el caso 1 en B, en m

Donde

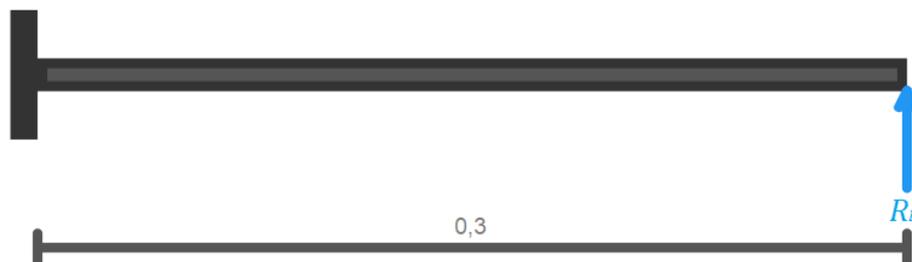


Figura 29. Diagrama de cuerpo libre para el caso 2 en B, en m

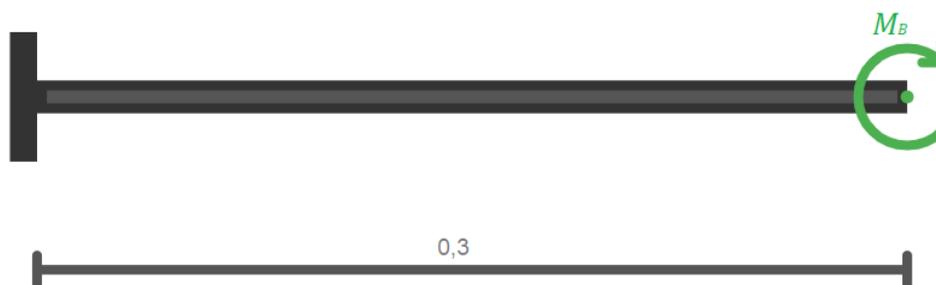


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre para el caso 3 en B, en m

R_B es la fuerza de reacción generada en el punto B, en N.

M_B es el momento de reacción generada en el punto B, en N.

Se analizan los tres casos de las vigas y se obtienen sus diagramas de momento flector dados de la Figura 31, Figura 32 y Figura 33.

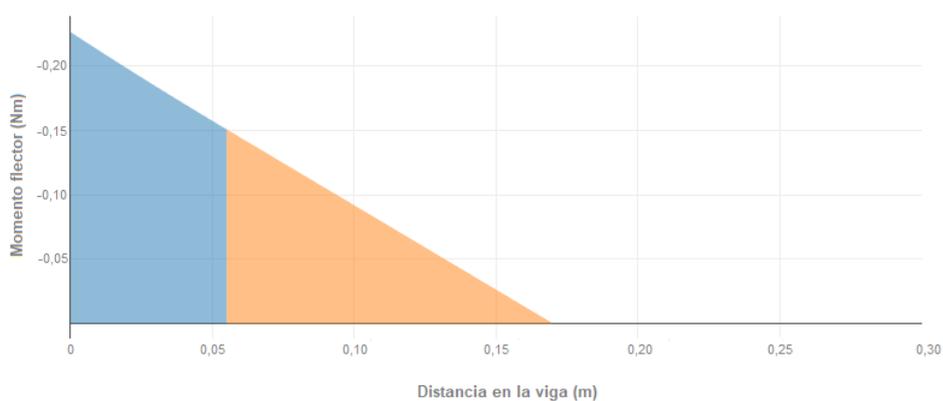


Figura 31. Momento flector para el caso 1 en B

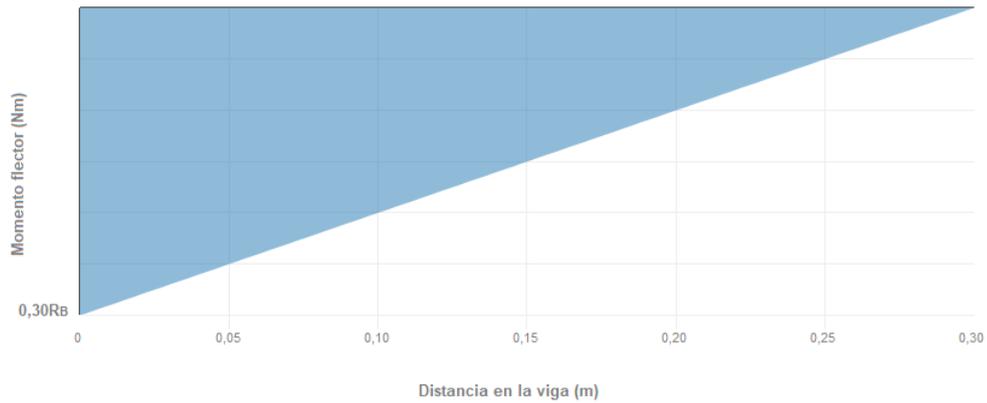


Figura 32. Momento flector para el caso 2 en B

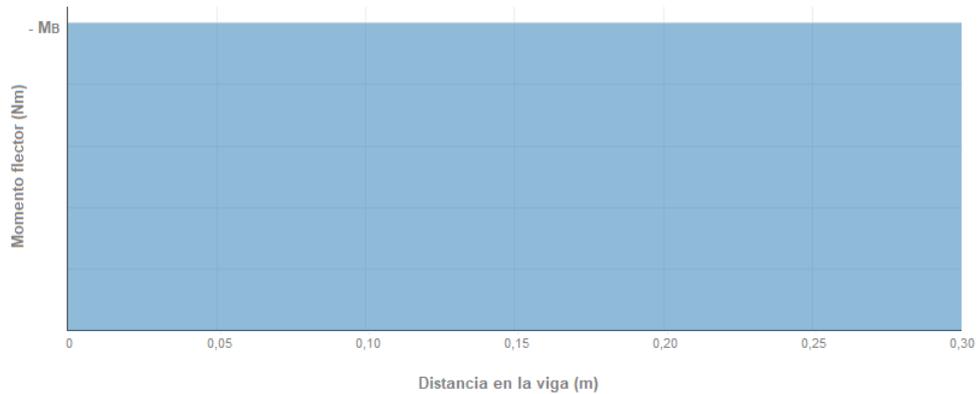


Figura 33. Momento flector para el caso 3 en B

A partir de los diagramas de momentos flectores, se calcula el área respetando sus respectivos signos y la distancia del punto B a los centroides para cada caso particular dando los siguientes resultados:

- Área de momento de caso 1 en B: $-0,02 \text{ m}^2$
- Distancia del punto B al centroide de caso 1 en B: $0,24 \text{ m}$
- Área de momento de caso 2 en B: $0,05R_B \text{ m}^2$
- Distancia del punto B al centroide de caso 2 en B: $0,20 \text{ m}$
- Área de momento de caso 3 en B: $-0,30M_B \text{ m}^2$
- Distancia del punto B al centroide de caso 3 en B: $0,15 \text{ m}$

Ahora se aplica (27) sumando todas las áreas de momento obtenidas teniendo en cuenta que como la viga es doblemente empotrada, las rotaciones en los puntos A y B son nulos, dando como resultado (29).

$$\theta_B - \theta_A = \frac{-0,02 + 0,05R_B - 0,30M_B}{EI}$$

$$0 = \frac{-0,02 + 0,05R_B - 0,30M_B}{EI}$$

$$0,02 = 0,05R_B - 0,30M_B \quad (29)$$

De igual manera se aplica (28) teniendo en cuenta que la desviación que tengan los puntos A y B son nulos debido que la viga es doblemente empotrada, obteniendo (30).

$$\delta_{AB} = \frac{(-0,02)(0,24) + (0,05R_B)(0,20) - 0,30M_B(0,15)}{EI}$$

$$0 = \frac{(-0,02)(0,24) + (0,05R_B)(0,20) - (0,30M_B)(0,15)}{EI}$$

$$0,0048 = 0,01R_B - 0,05M_B \quad (30)$$

Realizando un sistema de ecuaciones con (29) y (30) se obtiene los valores de las reacciones en el punto B, dando así el siguiente resultado:

$$R_B = 0,88 \text{ N}$$

$$M_B = 0,08 \text{ Nm}$$

Para obtener las reacciones en A, se realiza el mismo proceso aplicando los teoremas de Mohr, teniendo en cuenta que el punto de referencia será desde el punto A.

Se utiliza el principio de superposición para dividir el caso principal de la Figura 27 en tres casos como se muestran de la Figura 34, Figura 35 y Figura 36, con el fin de obtener los valores de las reacciones en el punto A.

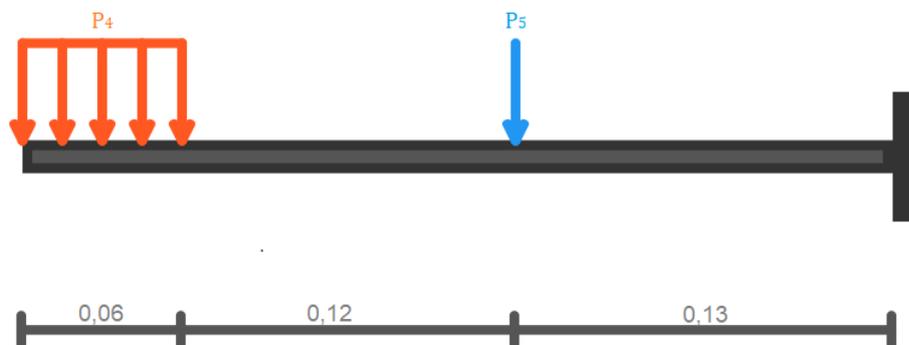


Figura 34. Diagrama de cuerpo libre para el caso 1 en A, en m

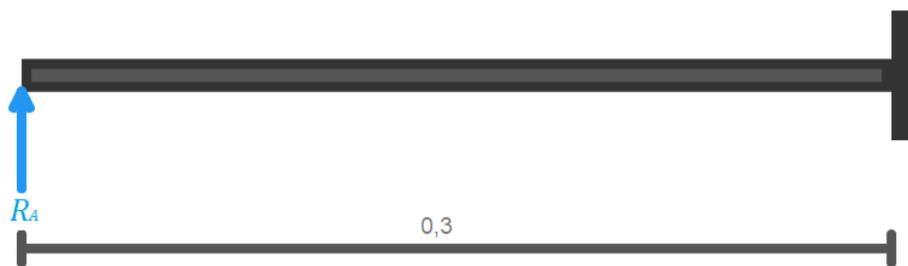


Figura 35. Diagrama de cuerpo libre para el caso 2 en A, en m

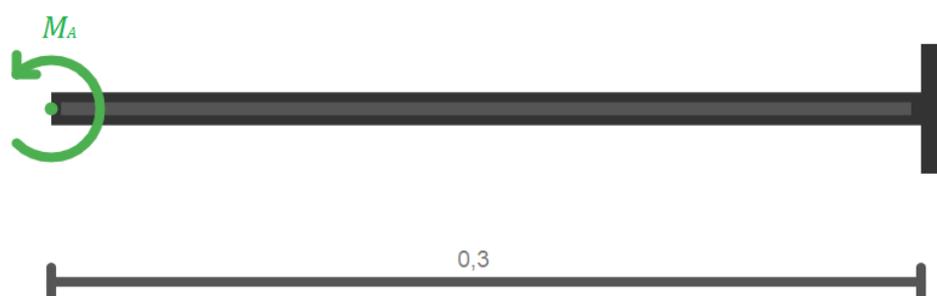


Figura 36. Diagrama de cuerpo libre para el caso 3 en A, en m

Donde

R_A es la fuerza de reacción generada en el punto A, en N.

M_A es el momento de reacción generada en el punto A, en N.

Se analizan los tres casos de las vigas y se obtienen sus diagramas de momento flector dados de la Figura 37, Figura 38 y Figura 39.

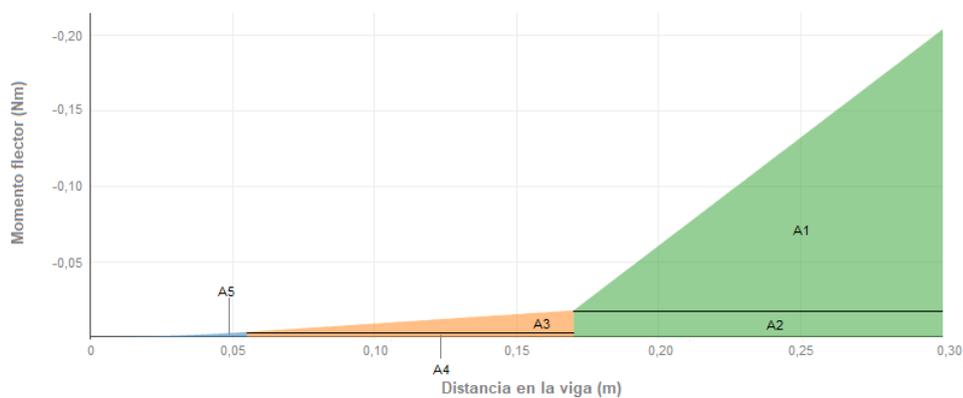


Figura 37. Momento flector para el caso 1 en A

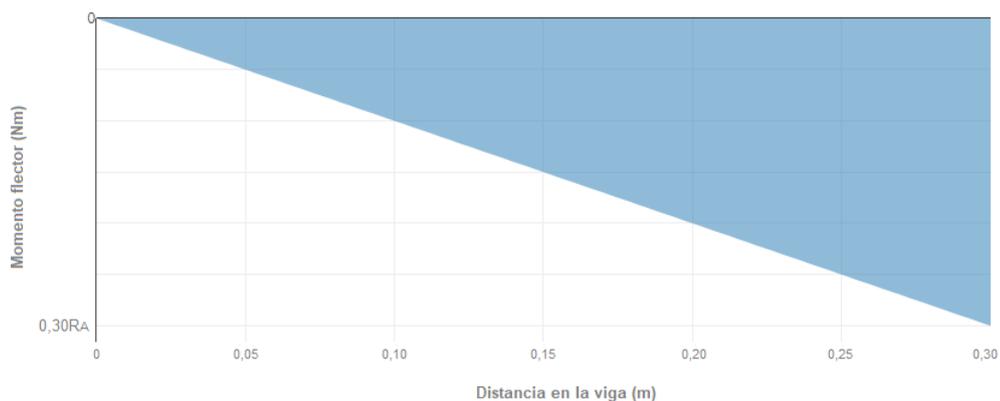


Figura 38. Momento flector para el caso 2 en A

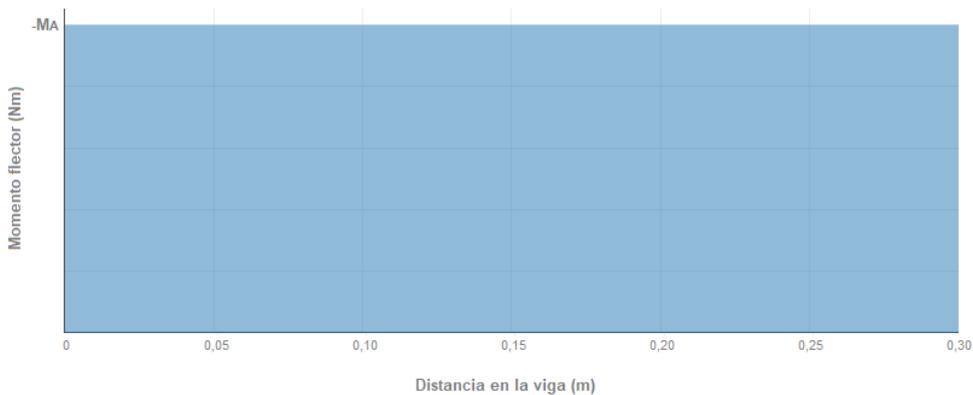


Figura 39. Momento flector para el caso 3 en A

A partir de los diagramas de momentos flectores, se calcula el área respetando sus respectivos signos y la distancia del punto A a los centroides para cada caso particular. En la Figura 37 se dividió en 5 partes el diagrama de momento flector para obtener el área de momento total del caso 1 en A, dando los siguientes resultados:

- Área de momento 1 de caso 1 en A: $-0,01 \text{ m}^2$
- Distancia del punto A al centroide del área 1 del caso 1 en A: $0,26 \text{ m}$
- Área de momento 2 de caso 1 en A: $-2,30 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
- Distancia del punto A al centroide del área 2 del caso 1 en A: $0,24 \text{ m}$
- Área de momento 3 de caso 1 en A: $-8,20 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Distancia del punto A al centroide del área 3 del caso 1 en A: $0,13 \text{ m}$
- Área de momento 4 de caso 1 en A: $-4,00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

- Distancia del punto A al centroide del área 4 del caso 1 en A: 0,11 m
- Área de momento 5 de caso 1 en A: $-9,50 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
- Distancia del punto A al centroide del área 5 del caso 1 en A: 0,04 m
- Área de momento de caso 2 en A: $0,05R_A \text{ m}^2$
- Distancia del punto A al centroide de caso 2 en A: 0,20 m
- Área de momento de caso 3 en A: $-0,30M_A \text{ m}^2$
- Distancia del punto A al centroide de caso 3 en A: 0,15 m

Ahora se aplica (27) sumando todas las áreas de momento obtenidas teniendo en cuenta que como la viga es doblemente empotrada, las rotaciones en los puntos A y B son nulos, dando como resultado (31).

$$\theta_A - \theta_B = \frac{-0,01 - (2,30 \times 10^{-3}) - (8,20 \times 10^{-4}) - (4,00 \times 10^{-4}) - (9,50 \times 10^{-5}) + 0,05R_A - 0,30M_A}{EI}$$

$$0 = \frac{-0,01 - (2,30 \times 10^{-3}) - (8,20 \times 10^{-4}) - (4,00 \times 10^{-4}) - (9,50 \times 10^{-5}) + 0,05R_A - 0,30M_A}{EI}$$

$$0,01 = 0,05R_A - 0,30M_A \quad (31)$$

De igual manera se aplica (28) teniendo en cuenta que la desviación que tengan los puntos A y B son nulos debido que la viga es doblemente empotrada, obteniendo (32).

$$\delta_{AB} = \frac{(-0,01)(0,26) + (-2,30 \times 10^{-3})(0,24) + (-8,20 \times 10^{-4})(0,13) + (-4,00 \times 10^{-4})(0,11) + (-9,50 \times 10^{-5})(0,04) + (0,05R_A)(0,20) + (-0,30M_A)(0,15)}{EI}$$

$$0 = 0,01R_A - 0,05M_A - 3,30 \times 10^{-3}$$

$$3,30 \times 10^{-3} = 0,01R_A - 0,05M_A \quad (32)$$

Realizando un sistema de ecuaciones con (31) y (32) se obtiene los valores de las reacciones en el punto B, dando así el siguiente resultado:

$$R_A = 0,51 \text{ N}$$

$$M_A = 0,04 \text{ Nm}$$

Con las reacciones obtenidas en cada empotramiento de la Figura 27 se obtienen los diagramas de esfuerzos cortantes y momento flector para la base intermedia en la Figura 40 y la Figura 41 respectivamente.

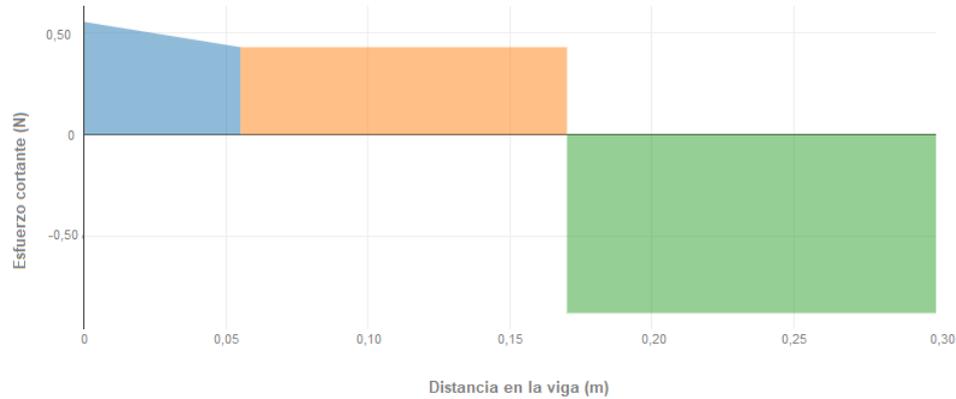


Figura 40. Esfuerzo cortante en la base intermedia

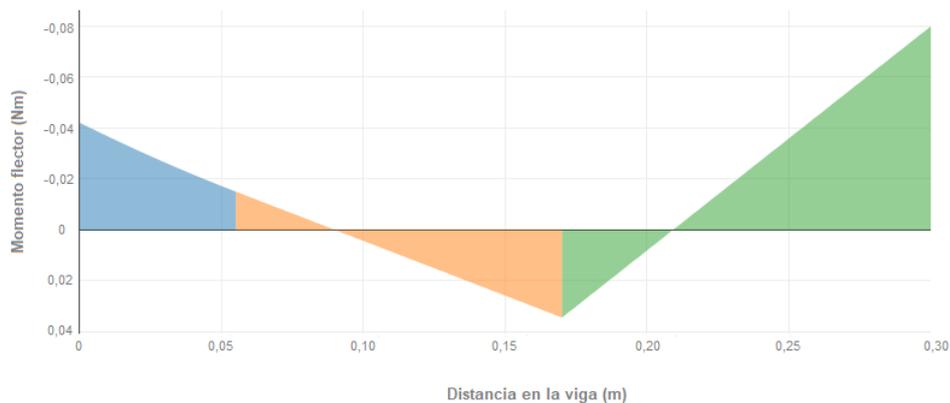


Figura 41. Momento flector en la base intermedia

Para el proceso de selección del material, los requerimientos básicos a necesitar son: el patrón de carga, el perfil (determinados en la sección 12.1.5) y sus dimensiones. Utilizando la Figura 41, se puede obtener el momento flexionante máximo en la base superior:

$$M_{3_{max}} = 0,034 \text{ Nm}$$

Se calcula el primer momento de área, el cual viene dado por (24). Para el caso de la base intermedia, las dimensiones de la base son de 237,30 mm y altura de 0,7 mm.

Reemplazando los valores correspondientes en (24), se obtiene el siguiente resultado:

$$S_{3_x} = \frac{237,3 \cdot 0,7^2}{24}$$

$$S_{3_x} = 4,84 \text{ mm}^3$$

Con ello, se calcula el esfuerzo flexionante máximo con la fórmula de flexión, dado por (25).

$$\sigma_{3_{max}} = \frac{0,034 \text{ Nm}}{4,84 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_{3_{max}} = 7,02 \text{ MPa}$$

Calculado el esfuerzo flexionante máximo, por medio de la Tabla 20, se determinó en la sección 12.1.5 que el patrón de carga es repetida y se utilizará un material dúctil, por lo que, el esfuerzo de diseño viene dado por (26). Reemplazando los valores correspondientes para la base inferior se obtiene lo siguiente:

$$7,02 \text{ MPa} = \frac{S_{3_u}}{8}$$

$$S_{3_u} = 56,10 \text{ MPa}$$

Ahora con el valor de la resistencia máxima del material, se selecciona el tipo de material con el cual se va a fabricar la base superior, el cual se analiza en la sección 12.1.8.

Se realiza un análisis estructural para la pieza por medio del software CAD Solidworks, ejecutando una simulación y obteniendo un esfuerzo máximo de 5,27 MPa. En la Figura 42 se muestra el resultado de la simulación.

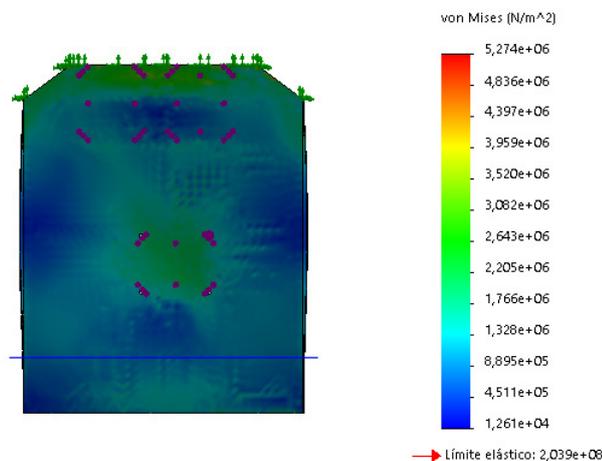


Figura 42. Simulación de la base intermedia

Con esto, se comprueba que la base superior soportará el esfuerzo de diseño calculado de 7,02 MPa provocado por los elementos.

12.1.8. Selección de material de la estructura mecánica

En base a los cálculos realizados para los elementos mecánicos del robot móvil, se presenta la resistencia máxima de cada uno de ellos:

- Base superior: 1,28 MPa
- Base inferior: 8,82 MPa
- Base intermedia: 56,10 MPa

Con esto, se selecciona el material en base al mayor valor de resistencia máxima entre los tres elementos con el fin de que el material de la estructura del robot móvil sea homogéneo. En la Tabla 23, se presenta alternativas de materiales.

Tabla 23. Alternativas de materiales

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo mínimo de ruptura (MPa)
Acero galvanizado G60	250	400
Acero inoxidable tipo 304	310	620
Aluminio 6061	125	276

Se escoge el acero galvanizado G60 ya que presenta una resistencia a la fluencia suficiente para el robot móvil.

Las partes de la estructura mecánica serán sujetadas con tornillos de rosca métrica de 10 x 2 mm. Los demás elementos como la cámara, batería, microcontrolador, motores, etc., no requieren de soportes que deban ser diseñados ya que son sostenidos con pernos M3. El motor seleccionado cuenta con un accesorio de soporte en L para sujetarlo mediante pernos M3 hacia una superficie plana. El acoplamiento de las llantas con los motores se hace de igual manera con un adaptador hexagonal, accesorio mismo de las llantas seleccionadas.

12.2. Dimensionamiento Electrónico

El dimensionamiento electrónico comprende todos los elementos necesarios para el pleno funcionamiento del prototipo, los cuales se complementan con el sistema mecánico para producir el movimiento deseado. En la Figura 43, se muestra un diagrama de bloques donde se citan los componentes electrónicos a utilizar.

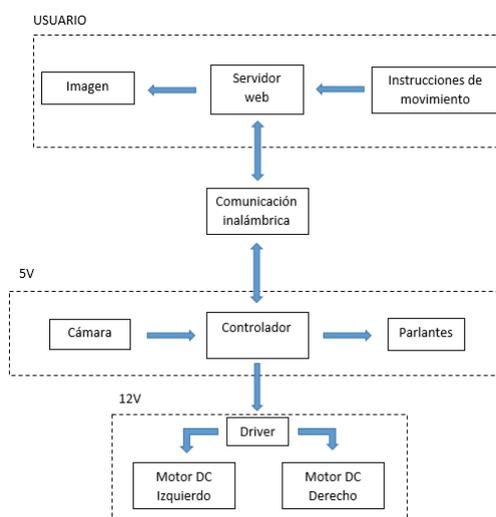


Figura 43. Diagrama de bloques de los componentes electrónicos

12.2.1. Selección del microcontrolador

El análisis para la selección del microcontrolador se lo realiza en la sección 11.6 dando como conclusión el uso del Raspberry Pi 4 Modelo B. En la Tabla 24 se presentan las entradas y salidas del microcontrolador.

Tabla 24. Listado de variables I/O

Nombre	I/O	Descripción	Tipo
BCM17	Salida	Señal 1 de control de giro de motor A	Digital
BCM22	Salida	Señal 2 de control de giro de motor A	Digital
BCM23	Salida	Señal 1 de control de giro de motor B	Digital
BCM24	Salida	Señal 2 de control de giro de motor B	Digital

Nombre	I/O	Descripción	Tipo
USB1	Entrada	Puerto USB de parlante	-
USB2	Entrada	Puerto USB de cámara	-
JACK	Entrada	Puerto Jack 3,5 mm de parlante	-
USB-C	Entrada	Alimentación de Raspberry	-

En la Figura 44, [26], se muestra el microcontrolador seleccionado.



Figura 44. Diagrama de bloques de los componentes electrónicos

12.2.2. Selección de driver para motores

Para el control de los motores, en base al tipo de motores que se han seleccionado, se requiere un controlador que permita realizar el cambio de giro y por lo cual se elige el módulo L298N, como se ve en la Figura 45. Soporta corrientes hasta de 2 A y facilita alimentar a los motores con 12 V. El módulo controla el sentido y velocidad de giro de motores mediante señales que se obtienen de microcontroladores. La velocidad de giro se regula haciendo uso de modulación por ancho de pulso (PWM). En la Tabla 25, se observan sus especificaciones técnicas, [27].



Figura 45. Módulo L298N

Tabla 25. Especificaciones técnicas del módulo L298N

Especificación	Descripción
Canales	2
Voltaje lógico	5V
Voltaje de potencia	5V - 35V DC
Consumo de corriente lógico	0 a 36mA
Capacidad de corriente	2A
Potencia máxima	25W
Dimensiones	43 × 43 × 27 mm
Peso	30g

12.2.3. Selección de parlantes

Los parlantes son los encargados de emitir un mensaje pre-grabado el cual es dado la instrucción a través del servidor web. La condición que debe tener los parlantes es que se alimenten por medio de USB y la recepción del archivo de sonido sea a través de un conector jack de 3,50 mm. En el mercado existen una gran variedad de parlantes por lo que el factor principal a seleccionar este elemento es su costo. A continuación se presentan tres alternativas:

- Parlantes Trust Leto 2.0: En la Figura 46 se aprecia los parlantes con sus especificaciones técnicas en la Tabla 26.



Figura 46. Parlantes trust leto 2.0

Tabla 26. Especificaciones técnicas de los parlantes

Especificación	Descripción
Rango de frecuencia	150Hz - 20kHz
Alimentación	USB 5V 0,5 A
Conectores	3,50 mm y USB para alimentación
Dimensiones	73 × 62 × 55 mm
Peso	230 g

- Parlantes Genius Sp-hf180: En la Figura 47 se muestran los parlantes con sus especificaciones técnicas en la Tabla 27.



Figura 47. Parlantes Genius Sp-hf180

Tabla 27. Especificaciones técnicas de los parlantes

Especificación	Descripción
Rango de frecuencia	160Hz - 18KHz
Alimentación	USB 5V 0,5 A
Conectores	3,50 mm y USB para alimentación
Dimensiones	84 × 129 × 84 mm
Peso	644 g

- Parlantes Kisonli V360: En la Figura 48 se muestran los parlantes con sus especificaciones técnicas en la Tabla 28.

**Figura 48.** Parlantes Kisonli V360**Tabla 28.** Especificaciones técnicas de los parlantes

Especificación	Descripción
Rango de frecuencia	20Hz-20 kHz
Alimentación	USB 5V 0,5 A
Conectores	3,50 mm y USB para alimentación
Dimensiones	85 × 85 × 110 mm
Peso	340 g

Se selecciona los parlantes trust leto 2.0 por tener un tamaño que alcance en su ubicación en el

robot, el cual se aprecia en la Figura 15. Además, presenta un peso ligero con respecto a las otras alternativas y un mejor rango de frecuencia.

12.2.4. Selección de cámara

La cámara es el elemento que captura la imagen y el microcontrolador la envía hacia el servidor web para que el operador tenga una visualización del entorno del robot móvil. Un factor de selección en la cámara es que la señal de imagen y su alimentación deben ser transmitidas por medio de cable USB, además de su resolución. A continuación, se presentan tres alternativas de cámaras para el prototipo:

- ECam 8000: Se muestra en la Figura 49 con sus especificaciones técnicas en la Tabla 29 tomado de [28].



Figura 49. ECam 8000

Tabla 29. Especificaciones técnicas de ECam 8000

Especificación	Descripción
Interfaz	USB
Sensor de imagen	CMOS de 2MP píxeles
Resolución (PPP)	2 MP / 1920 x 1080 / 1280 x 720 / 640 x 480 píxeles
Peso	Aprox. 82 g (Incluye clip y cable)
Dimensiones	54,50 × 90,60 × 67,50 mm

- Cámara web empresarial BRIO ULTRA HD PRO: Se observa en la Figura 50 con sus especificaciones técnicas en la Tabla 30 tomado de [29].



Figura 50. Cámara web empresarial BRIO ULTRA HD PRO

Tabla 30. Especificaciones técnicas de cámara BRIO

Especificación	Descripción
Interfaz	USB
Cámara mega pixel	13
Resolución (PPP)	4K/30 fps (hasta 4096 x 2160 píxeles) 1080p/30 o 60 fps (hasta 1920 o 1080 píxeles) 720p/30, 60 o 90 fps (hasta 1280 x 720 píxeles)
Peso	63 g
Dimensiones	27,00 × 102,00 × 27,00 mm

- Cámara para PC mini PACKING: En la Figura 51 se aprecia la cámara con sus especificaciones técnicas en la Tabla 31 tomado de [30].



Figura 51. Cámara para PC mini PACKING

Tabla 31. Especificaciones técnicas de la cámara para PC mini PACKING

Especificación	Descripción
Interfaz	USB
Cámara pixel	480
Resolución de video	640 x 480
Peso	57 g
Dimensiones	76,00 x 54,00 x 57,00 mm

Se selecciona la cámara Ecam 8000, que presenta suficientes características que permitan un óptimo funcionamiento del robot móvil.

12.2.5. Selección de batería

Con los elementos electrónicos seleccionados, se realiza en base a la corriente y voltaje el dimensionamiento de la batería a través de la Tabla 32.

Tabla 32. Elementos electrónicos

Elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
Raspberry Pi 4 Modelo B	0,70	5,00	3,50
Ecam 8000 Ge- nius	0,50	5,00	2,50
Parlantes 3,50 mm, alimentado por USB	0,50	5,00	2,50

Elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
Motor pololu 37Dx73L 100:1	0,20	12,00	5,00
Motor pololu 37Dx73L 100:1	0,20	12,00	5,00
Driver Puente H L298N	0,04	5,00	0,18
		Total	18,68

Para obtener la corriente necesaria de la batería, se utiliza (33) teniendo en cuenta que se elige un voltaje de alimentación de 12 V, debido a que el mayor consumo que tiene es a este voltaje.

$$P_e = VI \quad (33)$$

Donde

P_e es la potencia eléctrica del prototipo, en W.

V es el voltaje de alimentación, en V.

I es la corriente requerida por el prototipo, en A.

$$I = \frac{18,68 \text{ W}}{12 \text{ V}}$$

$$I = 1,56 \text{ A}$$

Utilizando (34) se calcula un valor estimado de la capacidad de la batería.

$$C_b = I \cdot t_d \quad (34)$$

Donde

C_b es la capacidad de la batería, en Ah.

t_d es el tiempo de funcionamiento, en h.

$$C_b = 1,56 \text{ A} \cdot 1,00 \text{ h}$$

$$C_b = 1,56 \text{ Ah}$$

En base al cálculo anterior, se presentan dos alternativas de batería en la Figura 52 y la Figura 53 con sus respectivas especificaciones técnicas por medio de la Tabla 33 y la Tabla 34 [31].



Figura 52. Batería 12v 2,0Ah Seca Recargable

Tabla 33. Especificaciones técnicas de la Batería Seca Recargable

Especificación	Descripción
Voltaje Nominal	12 VDC
Capacidad	2 Ah
Peso	740 g
Dimensiones	70,00 x 47,00 x 98,00 mm



Figura 53. Mini UPS DC de Forza

Tabla 34. Especificaciones técnicas de la mini UPS DC de Forza

Especificación	Descripción
Voltaje Nominal	12V, 9V y 5V
Capacidad	2 Ah
Peso	400 g
Dimensiones	73,00 x 116,00 x 24,00 mm

Se selecciona la batería mini UPS DC de Forza que presenta tres salidas de voltajes variado

lo cual permite alimentar independientemente al microcontrolador y los motores, además de tener protección contra sobrecargas, sobretensión, descarga y cortocircuito, y lleva un indicador LED de encendido, de carga y de conexión de entrada. La batería cuenta con un interruptor de encendido y apagado para lo cual se aplicará a todo el robot.

12.2.6. Componentes electrónicos seleccionados

En resumen, a continuación se detallan los componentes electrónicos seleccionados, analizados en la sección 12.2.

- Raspberry Pi 4 Modelo B
- Módulo L298N
- Parlantes trust leto 2.0
- Cámara ECAM 8000 Marca Genius
- Batería Mini UPS DC de Forza

12.3. Desarrollo de la programación

La programación del robot móvil de tracción diferencial para el monitoreo de distanciamiento social frente al Covid-19 se lo realiza a través de un servidor web, mediante el cual el usuario observa la imagen enviada por la cámara del robot y manipular su movimiento con el fin de que éste se logre desenvolver en su entorno de trabajo. Al momento en que el usuario identifique un caso donde no se respete las normas vistas en la sección 9, ejecutará por medio de un botón en el servidor web un mensaje pre-grabado con el fin de advertir a aquellas personas sobre el incumplimiento de dichas normas. Cabe recalcar que existe la opción para emitir 3 mensajes que difieren en base al nivel de gravedad del comportamiento de las personas.

La lógica de programación consiste en que el usuario da una instrucción al robot a través del servidor web, donde esta se conecta internamente con PHP, lenguaje de programación desarrollado especialmente para la conexión entre distintos servidores. En PHP, la señal es enviada hacia el microcontrolador dando la instrucción para ejecutar el programa Python correspondiente a la función que el usuario desea realizar, y a través de Python se genera los comandos para llevar a cabo las funciones del robot móvil. Simultáneamente, el microcontrolador recibe la imagen capturada por la cámara y la envía directamente hacia el servidor web. En la Figura 54 se muestra el flujo de programación descrita.

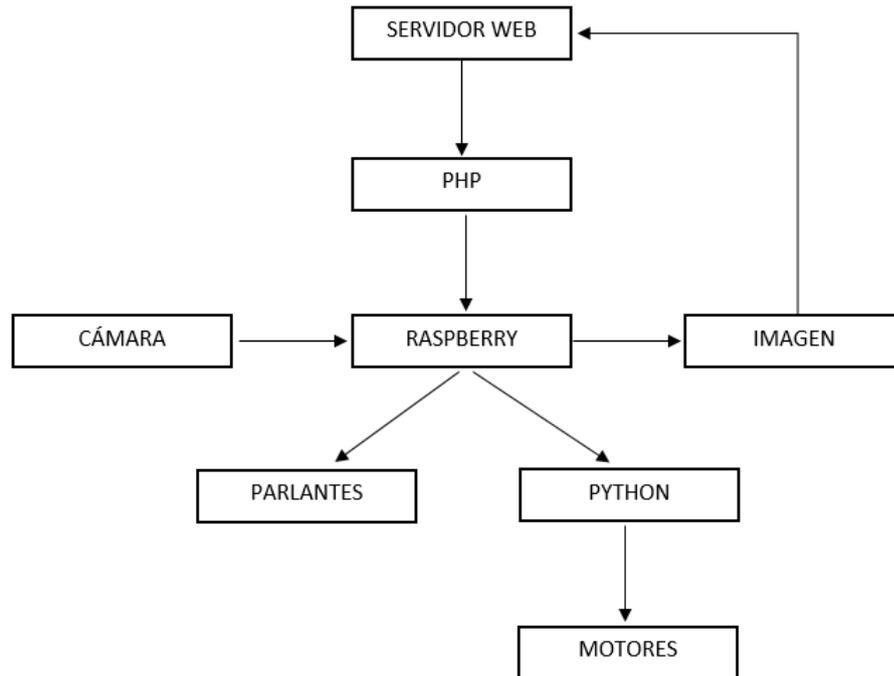


Figura 54. Lógica de programación

12.3.1. Diseño del servidor web

El servidor web se lo desarrolla en lenguaje HTML, cuenta con botones para: encendido y apagado del robot, control del desplazamiento y dirección, emisión de mensajes preventivos y recuadro para la recepción de imagen. En la Figura 55 se visualiza los componentes nombrados.

12.3.2. Transmisión de imagen hacia el servidor web

Para el envío de imagen captado por la cámara del robot móvil hacia el servidor web, se trabaja con un complemento diseñado para el Raspberry Pi. Se utiliza el complemento "MOTION", creado para capturar y almacenar imágenes (o video) de una o varias cámaras. Este complemento genera un URL relacionada con la dirección IP del Raspberry para la visualización de la imagen. Dentro del servidor web, se captura esa dirección en un recuadro y se despliega en una posición específica de la ventana donde se acople con los demás botones.

12.3.3. Reproducción de mensaje preventivo

Para la reproducción del mensaje preventivo frente al Covid-19, se generó a través de un convertidor online de texto a voz 3 mensajes de alerta para que el usuario los emita, a su criterio, al momento de no cumplir las normas de bioseguridad sobre el distanciamiento social detalladas en la sección 9. Los mensajes son los siguientes:

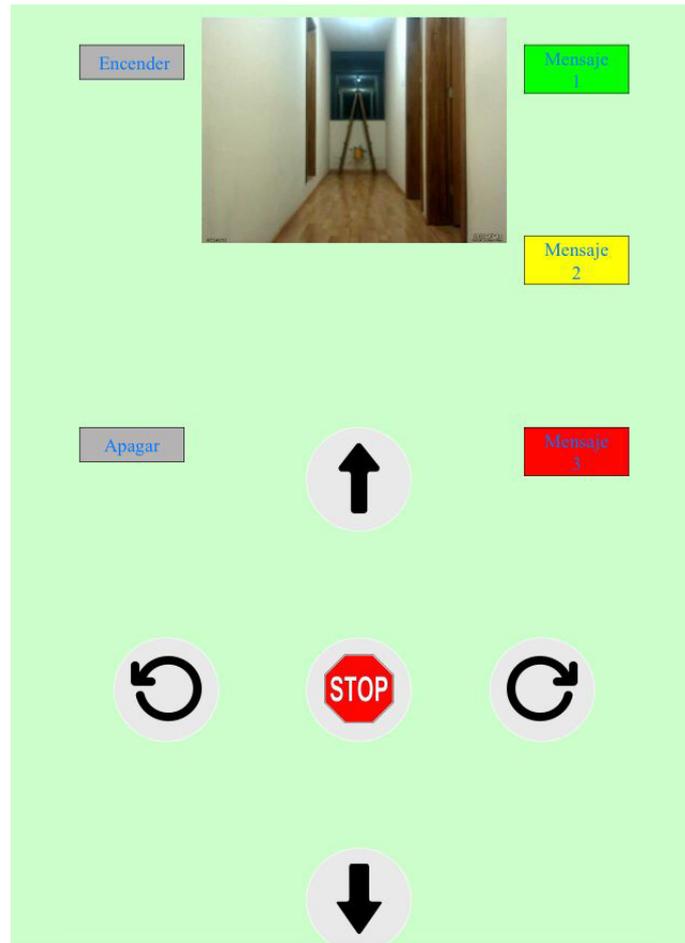


Figura 55. Diseño del servidor web

- Mensaje 1: Mantén una sana distancia. Sí te cuidas tú, nos cuidamos todos.
- Mensaje 2: Evite el contacto directo con personas. Mantenga como mínimo dos metros de distancia en espacios cerrados.
- Mensaje 3: Por favor, guarda tu distancia. Nuestra salud está en tus manos.

Dentro del Raspberry, se utiliza el complemento "OMXPLAYER" para reproducir los mensajes pregrabados en formato wav. El usuario, al momento de querer emitir el mensaje, se enviará una instrucción por medio de PHP hacia el Raspberry y emitirá el sonido en los parlantes. Los mensajes podrán ser modificados según el usuario lo crea conveniente, siguiendo el proceso descrito para la grabación de un nuevo mensaje.

12.3.4. Control de motores

Para el control de motores, el usuario emite la instrucción en el servidor web con su botón respectivo y ésta es enviada mediante PHP hacia Python en el Raspberry. Existen cinco botones para el control de los motores que son: hacia adelante, hacia atrás, giro antihorario, giro horario y dete-

ner. En Python, se declara las librerías correspondientes y se manda señales de dirección hacia el módulo L298N para el sentido de giro de ambos motores. Cabe recalcar que en el módulo L298N está configurado para que esté habilitado ambos motores a su máxima velocidad.

13. Pruebas de Funcionamiento y Resultados

Para las pruebas de funcionamiento se realiza ensayos en las superficies planteados para analizar el comportamiento de robot y evaluar parámetros como: velocidad del robot, tiempos de respuesta, área de funcionamiento y desenvolvimiento en lugares públicos.

En el desarrollo de las pruebas se utiliza una red móvil con las siguientes características:

- Velocidad de descarga: 6,0 Mbps
- Velocidad de carga: 4,3 Mbps

13.1. Pruebas de área de comunicación

Para las pruebas realizadas, se evalúa el robot móvil enviando comandos a diferentes distancias. Al analizar su respuesta, se determina que el robot recibe las instrucciones enviadas hasta una distancia de 25 m. Entre 25 y 30 m, el robot móvil recibe la instrucción con intermitencias y pasado los 30 m ya no percibe ninguna instrucción. Por tanto, se llegó a concluir que el área de comunicación ideal, con las condiciones planteadas, es de $1963,50 \text{ m}^2$. En la Figura 56 se aprecia el área de comunicación y en la Figura 57 se muestra la prueba realizada.



Figura 56. Área de funcionamiento



Figura 57. Prueba de área de comunicación

13.2. Pruebas de velocidad del robot

Para las pruebas de velocidad, se coloca el robot móvil en terrenos de asfalto, concreto y baldosa para analizar el tiempo que se demora en recorrer diferentes distancias y se toma la muestra del tiempo cada 5 m de distancia hasta un total de 25 m.

13.2.1. Prueba de velocidad en superficie de concreto

- Prueba 1: En la Tabla 35 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 58 se grafica la velocidad.

Tabla 35. Prueba 1 de velocidad en concreto

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,81
10	21,30
15	31,94
20	42,46
25	52,56

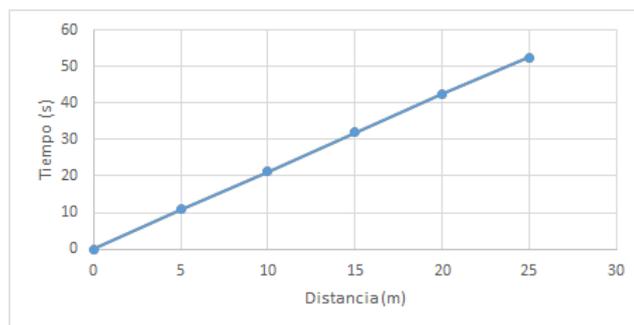


Figura 58. Prueba 1 de velocidad en concreto

- Prueba 2: En la Tabla 36 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 59 se grafica la velocidad.

Tabla 36. Prueba 2 de velocidad en concreto

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,20
10	20,59
15	32,36
20	43,67
25	54,24

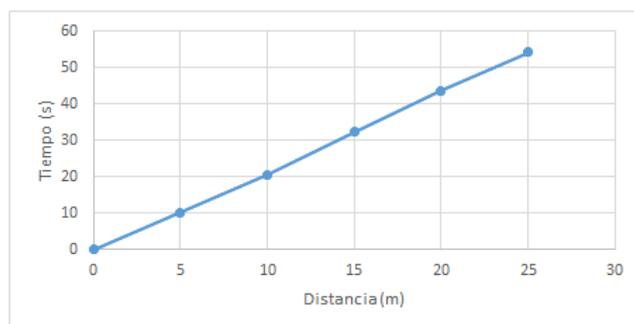


Figura 59. Prueba 2 de velocidad en concreto

- Prueba 3: En la Tabla 37 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 60 se grafica la velocidad.

Tabla 37. Prueba 3 de velocidad en concreto

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,21

Distancia (m)	Tiempo (s)
10	21,01
15	31,71
20	41,99
25	53,29

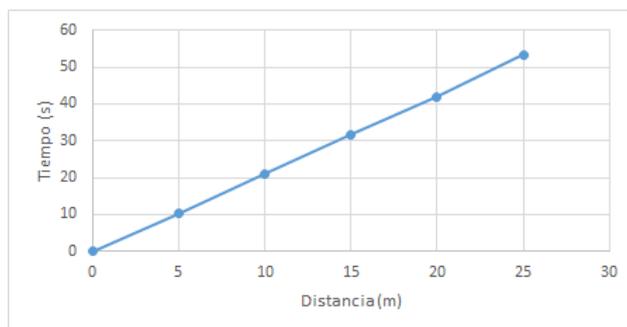


Figura 60. Prueba 3 de velocidad en concreto

13.2.2. Prueba de velocidad en superficie de asfalto

- Prueba 1: En la Tabla 38 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 61 se grafica la velocidad.

Tabla 38. Prueba 1 de velocidad en asfalto

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,77
10	21,62
15	31,96
20	43,20
25	53,72

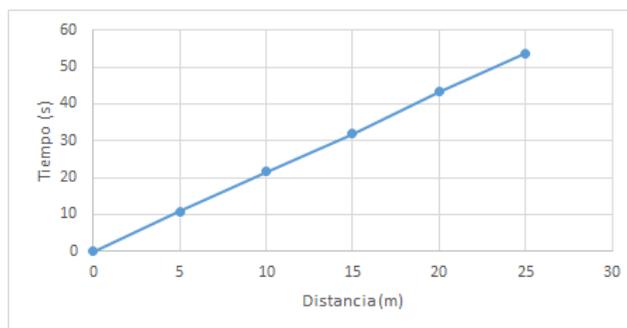


Figura 61. Prueba 1 de velocidad en asfalto

- Prueba 2: En la Tabla 39 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 62 se grafica la velocidad.

Tabla 39. Prueba 2 de velocidad en asfalto

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,51
10	22,63
15	33,54
20	43,75
25	53,50

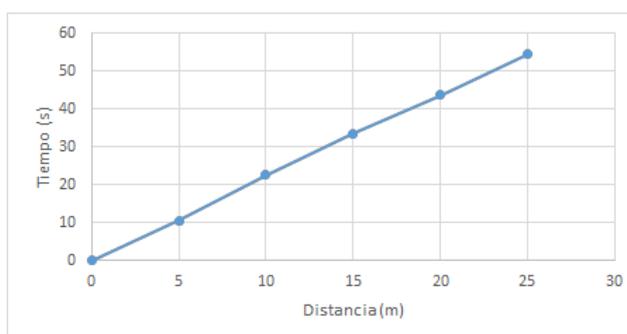
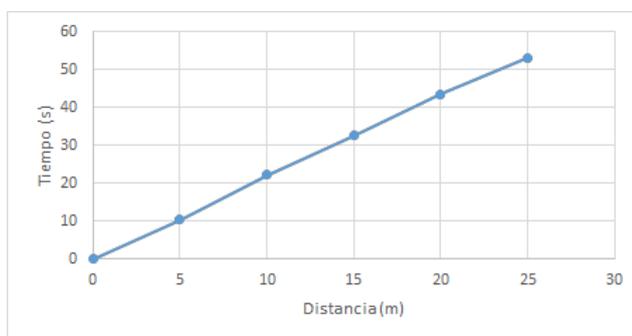


Figura 62. Prueba 2 de velocidad en asfalto

- Prueba 3: En la Tabla 40 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 63 se grafica la velocidad.

Tabla 40. Prueba 3 de velocidad en asfalto

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,45
10	22,18
15	32,65
20	43,56
25	53,14

**Figura 63.** Prueba 3 de velocidad en asfalto

13.2.3. Prueba de velocidad en superficie de baldosa

- Prueba 1: En la Tabla 41 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 64 se grafica la velocidad.

Tabla 41. Prueba 1 de velocidad en baldosa

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,54
10	20,75
15	31,25
20	41,71
25	50,40

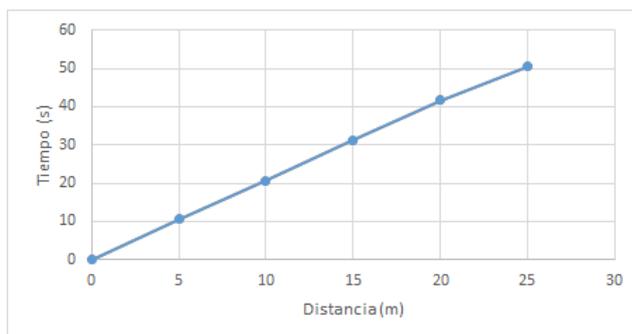


Figura 64. Prueba 1 de velocidad en baldosa

- Prueba 2: En la Tabla 42 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 65 se grafica la velocidad.

Tabla 42. Prueba 2 de velocidad en baldosa

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	10,71
10	21,56
15	32,27
20	42,76
25	51,66

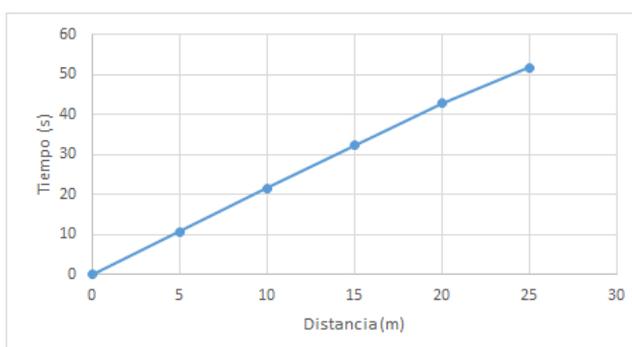
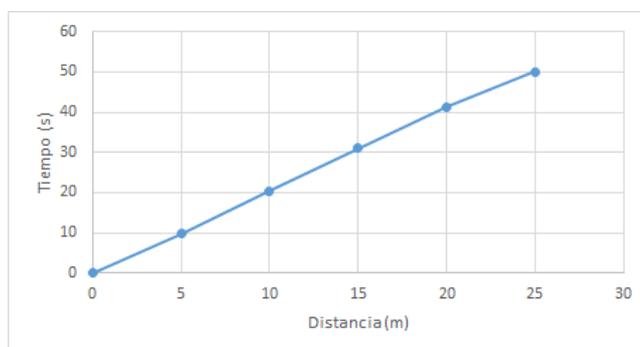


Figura 65. Prueba 2 de velocidad en baldosa

- Prueba 3: En la Tabla 43 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 66 se grafica la velocidad.

Tabla 43. Prueba 3 de velocidad en baldosa

Distancia (m)	Tiempo (s)
0	0
5	9,85
10	20,41
15	31,08
20	41,37
25	50,12

**Figura 66.** Prueba 3 de velocidad en baldosa

13.2.4. Análisis de resultados de velocidad del robot móvil

Se obtiene un promedio de velocidad en cada prueba realizada, dando los resultados detallados en la Tabla 44:

Tabla 44. Promedio de velocidad en diferentes superficies

Superficie	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
Concreto	0,471 m/s	0,466 m/s	0,474 m/s	0,470 m/s
Asfalto	0,465 m/s	0,455 m/s	0,463 m/s	0,461 m/s
Baldosa	0,485 m/s	0,472 m/s	0,491 m/s	0,483 m/s
			Promedio	0,471 m/s

Como resultado final de las pruebas realizadas, se presenta que la velocidad promedio del robot en distintos suelos como concreto, asfalto y baldosa es de 0,471 m/s o 1,70 km/h. Según la sección 12.1.3 fue planetada la velocidad en 2,50 km/h, pero al utilizar un motor de menor velocidad al calculado se presenta una variación de 0,80 km/h, la cual no representa mayor relevancia para el óptimo funcionamiento del prototipo.

En la Figura 67 se muestra al robot móvil colocado sobre una superficie de concreto, en la Figura 68 sobre una superficie asfalto y en la Figura 69 sobre una superficie de baldosa.



Figura 67. Robot móvil sobre una superficie de concreto



Figura 68. Robot móvil sobre una superficie de asfalto



Figura 69. Robot móvil sobre una superficie de baldosa

13.3. Pruebas de comunicación

Se realizan pruebas de tiempo de respuesta en la comunicación entre el robot móvil y el sitio remoto de teleoperación, tomando datos de muestra a diferentes distancias. En la Tabla 45, se presentan los datos obtenidos.

Tabla 45. Tiempos de respuesta de la comunicación, en segundos

Muestra	Tiempo de respuesta a 10 m	Tiempo de respuesta a 15 m	Tiempo de respuesta a 25 m
1	0,61 s	0,96 s	0,91 s
2	0,58 s	0,91 s	0,83 s
3	0,73 s	0,96 s	0,96 s
4	0,60 s	0,61 s	0,84 s
5	0,53 s	0,75 s	1,10 s
6	0,65 s	0,63 s	1,45 s
7	0,58 s	0,71 s	0,95 s
8	0,55 s	0,72 s	0,93 s
9	0,52 s	0,65 s	0,97 s
10	0,64 s	0,50 s	1,12 s
Promedio	0,60 s	0,74 s	1,01 s

En la Figura 70, se presenta de manera gráfica los datos obtenidos en la Tabla 45. Se determina que a la distancia de 10 m, el tiempo de respuesta tiende a ser constante, mientras que a una distancia mayor como de 25 s, se presenta una amplia fluctuación en cuanto a los tiempos de respuesta.

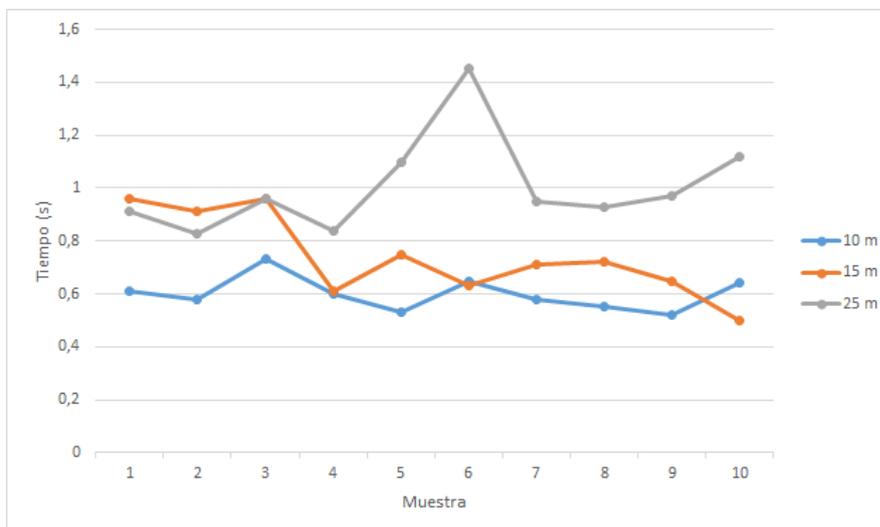


Figura 70. Tiempos de respuesta en la comunicacion

Como resultado final, se tiene que el tiempo de respuesta aumenta a medida que la distancia es mayor entre el robot móvil y el centro de teleoperación, teniendo que a los 10 m de distancia existe un tiempo promedio de 0,60 s a la respuesta del robot y a los 25 m de distancia existe un tiempo promedio de 1,01 s.

13.4. Pruebas en rampas para discapacitados

Para ésta prueba se busca verificar si el robot móvil es capaz de desplazarse en superficies con un grado de inclinación, analizado en la sección 12.1.4.

13.4.1. Prueba 1: Rampa de 4,76°

Se coloca el robot móvil en una rampa para discapacitados con una altura de 15 cm y largo de 180 cm, dando un grado de inclinación de 4,76°. En la Figura 71 se muestra la prueba realizada.



Figura 71. Prueba 1 en rampa para discapacitados

13.4.2. Prueba 2: Rampa de 7,13°

Como segunda prueba, se fabrica una rampa con altura de 15 cm y largo de 120 cm , dando un grado de inclinación de 7,13°, superando el grado de inclinación de 6,84° visto en la sección 12.1.4. En la Figura 72 se visualiza la prueba realizada.



Figura 72. Prueba 2 en rampa fabricada

13.4.3. Prueba 3: Rampa de 11,31°

Como tercera prueba, de igual manera se fabrica una rampa con altura de 15 cm y largo de 120 cm, dando un grado de inclinación de 11,31°, superando el grado de inclinación de 6,84° visto en la sección 12.1.4. En la Figura 72 se muestra la prueba realizada.



Figura 73. Prueba 3 en rampa fabricada

Como resultados obtenidos, se concluye que el robot puede superar el grado de inclinación de 6,84° obtenido de manera teórico e inclusive el doble de la inclinación planteada.

13.5. Prueba de campo

Para ésta prueba, se coloca al robot en un lugar público para el monitoreo de distanciamiento social entre personas frente al Covid-19. El lugar de prueba fue el parque Juan de Salinas, ubicado en el centro de Sangolquí, Ecuador.

Se observa que en un inicio las personas ignoran el primer mensaje de alerta dado por el robot móvil. No obstante, el operador viendo la actitud que mantienen, emite a través del robot el segundo mensaje de alerta, donde se observa que las personas ya consideraron actuar frente a la advertencia. En algunos casos, el operador evalúa si es necesario emitir el tercer mensaje cuando las personas hacen caso omiso a los mensajes previos.

De ésta manera se comprueba que el robot móvil teleoperado cumple con su funcionamiento y objetivo planteado en el presente proyecto de titulación



Figura 74. Prueba de campo

14. Análisis de costos

En la Tabla 46 se detallan los precios de los elementos y procesos utilizados para la construcción del robot móvil.

Tabla 46. Tiempos de respuesta de la comunicación, en segundos

Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Valor Total
1	ECam 8000 Genius	\$ 42,60	\$ 42,60
1	Batería mini UPS DC de Forza	\$ 33,50	\$ 33,50
1	Parlantes trust leto 2,0	\$ 11,00	\$ 11,00
1	Módulo L298N	\$ 5,25	\$ 5,25
1	Raspberry Pi 4 Modelo B con carcasa y ventilador	\$ 150,00	\$ 150,00
2	Motorreductor POLOLU 37Dx57L 100:1	\$ 40,00	\$ 80,00
1	Juego de dos LLantas Dagu Wild Thumper	\$ 25,00	\$ 25,00
2	Adaptador hexagonal 12 mm para llanta	\$ 9,00	\$ 18,00
1	Par de soportes motor 37D mm	\$ 12,00	\$ 12,00
1	Rueda garrucha 1 1/2"	\$ 2,50	\$ 2,50
1	Corte y doblado de estructura	\$ 80,00	\$ 80,00

Cantidad	Descripción	Valor Unitario	Valor total
22	Perno M3 de 10 mm con tuerca M3	\$ 0,55	\$ 12,10
26	Tornillo rosca métrica de 10x2 mm	\$ 0,20	\$ 5,20
1	Extras	\$ 5,00	\$ 5,00
		Total	\$ 439,55

Mediante la suma de los precios de cada elemento, se obtuvo un costo total de producción sin contar con la mano de obra en ingeniería de \$ 439,55. Además, es importante resaltar que los programas que se utilizaron para el desarrollo del proyecto son de software libre por lo que no es necesario la compra de ninguna licencia para la operación del robot móvil.

15. Conclusiones

- La Organización Mundial de la Salud es quien ha determinado las normas de seguridad y medidas de distanciamiento social para la prevención del contagio de Covid-19. En Ecuador, se ha regido bajo éstas disposiciones, y se concluyó que las personas principalmente no cumplen la norma de respetar una distancia de 2 metros en espacios abiertos y 1 metro en espacios cerrados.
- Existen robots a nivel mundial empleados para el monitoreo de distanciamiento social como el robot SPOT, utilizado en China. Aún así, se determinó que no existe una inclinación, por parte de entes gubernamentales, al utilizar dichos robots pese a los beneficios que éstos presentan.
- Mediante el análisis e implementación de éste proyecto, se comprueba el buen desempeño y ventajas que presenta la configuración cinemática de tracción diferencial, al permitir un control sencillo de giro y desarrollo del robot móvil, frente a otro tipo de configuraciones, por lo cual es la más estudiada por los investigadores.
- Tomando en consideración los robots móviles existentes para el distanciamiento social, se pudo determinar las dimensiones y parámetros de funcionamiento que debe tener el prototipo de robot móvil de tracción diferencial donde cumpla con la emisión de alertas sobre el Covid-19.
- El robot móvil para distanciamiento social que ha sido construido tiene las siguientes dimensiones: 677 mm x 397 mm x 323 mm. Presenta una teleoperación del usuario a través de un computador, tablet o smartphone, conectado con el robot por Wi-Fi.

- En base a las pruebas realizadas, se determina que el robot móvil es capaz de desplazarse en superficies planas de concreto y asfalto a una velocidad de 1,70 km/h.
- Se determinó que el robot móvil está en las capacidades de subir una rampa para personas discapacitadas con una inclinación de 6,84°.
- Utilizando una red móvil con las características mencionadas en la sección 13, se resuelve que el área de comunicación máximo que tiene el robot móvil es de 1963,50 m² a la redonda del operador.
- Mediante las pruebas ejecutadas del robot móvil en un lugar público, se concluyó que las personas reciben el mensaje de alerta pero hacen caso omiso sobre la advertencia, por lo que el operador debe emitir más de un mensaje para incentivar el mantener el distanciamiento social permitido.

16. Recomendaciones

- Dentro del servidor web existe un retardo en cuanto a la recepción de imagen proveniente de la cámara del robot móvil al trabajar con las condiciones planteadas en la sección 13. Por tanto, se recomienda utilizar un mejor servicio de internet inalámbrico con una velocidad de carga y descarga de 25 Mbps.
- El robot móvil al ser capaz de desplazarse en reversa, se recomienda colocar sensores de proximidad ya que el operador no logra distinguir una vista trasera del robot.
- Al realizar pruebas en exteriores, se observa que el volumen de los mensajes emitidos por el robot móvil no es el óptimo, a diferencia de los lugares internos se aprecia mejor. Por ende, se recomienda utilizar parlantes con mayor potencia a los seleccionados para el robot móvil.
- Se debe considerar que el robot móvil no ha sido diseñado para desplazarse en superficies con un alto grado de fricción como el césped. En caso de necesitar colocar al robot móvil en terrenos con mayor coeficiente de resistencia a la rodadura, visto en la Tabla 18, se recomienda realizar el mismo análisis estructural planteado en éste proyecto pero modificando el parámetro mencionado.
- Las pruebas de comunicación se realizan mediante el uso de una red móvil celular, no obstante, si se garantiza una red con características de 25 Mbps de carga y descarga, mejoraría el alcance de teleoperación, permitiendo así una locación remota más distante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. W. I. Data. Coronavirus (covid-19) cases. [En línea]. Disponible: <https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer?tab=table&facet=none&Metric=Confirmed+cases&Interval=7-day+rolling+average&Relative+to+Population=true&Color+by+test+positivity=false&country=USA~ITA~CAN~DEU~GBR~FRA~JPN> [Fecha de consulta: mar 2022]
- [2] O. M. de la Salud. Preguntas y respuestas sobre la transmisión de la covid-19. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted> [Fecha de consulta: jul 2020]
- [3] M. de Salud Pública del Ecuador. Actualización de casos de coronavirus en ecuador. [En línea]. Disponible: <https://www.salud.gob.ec/actualizacion-de-casos-de-coronavirus-en-ecuador/> [Fecha de consulta: jan 2021]
- [4] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, y R. Aracil, *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill Madrid, 1997, vol. 256.
- [5] G. H. Heras, nov 2017. [En línea]. Disponible: "<http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=733>"
- [6] E. Nuño Ortega y L. Basañez Villaluenga, "Teleoperación [de robots]: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente," 2004.
- [7] D. Galeano, "Robótica médica," Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Tech. Rep., oct 2014.
- [8] C. F. Sampedro, "Sistema quirúrgico da vinci," Ministerio de la Salud Pública, Av. República de El Salvador 36-64 y Suecia, Informe 593(2) 3814400, apr 2015.
- [9] I. E. de Estudios Estratégicos, "Usos militares de la inteligencia artificial, la automatización y la robótica (iaa&r)," Tesis de maestría, Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional, oct 2019.
- [10] L. H. L. Pérez, E. G. Pérez, y E. M. Herrera, "Estado del arte en robotica movil autonoma distribuida," *Conciencia Tecnológica*, no. 17, p. 1, 2001.
- [11] G. BERMÚDEZ. Robots mÓviles. teoria, aplicaciones y experiencias. [En línea]. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/229164924.pdf> (2002)

- [12] R. S. Ortigoza, R. G. Sánchez, R. B. Sotelo, M. A. M. Vilchis, V. M. H. Guzmán, y G. S. Ortigoza, “Una panorámica de los robots móviles,” *Télématique*, vol. 6, no. 3, pp. 1–14, 2007.
- [13] L. M. A. PAGUAY, “Planificación y seguimiento de caminos de manera autónoma para robots móviles tipo unicycle,” Trabajo de Titulación, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, RIOBAMBA-ECUADOR, nov 2017.
- [14] I. Bambino, “Una introducción a los robots móviles,” *Recuperado [http://www. aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil. pdf](http://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf)*, 2008.
- [15] D. D. Cárdenas Salas, “Teleoperación con realimentación de fuerza aplicada a un robot móvil con restricción no-holonómica,” B.S. thesis, Quito, 2016., 2016.
- [16] R. Su-woon. “el ‘robot’ del guardia de seguridad está al mando”. [En línea]. Disponible: nspna.com/news/?mode=view&newsid=6621 [Fecha de consulta: nov 2007]
- [17] R. Osorio, M. P. Cabrera, J. Savage, I. L. Juárez, y G. L. Hernández, “Aplicación de algoritmos genéticos en la navegación y evasión de obstáculos en un robot móvil srv1,” in *SOMI, Congreso de Instrumentación*. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, oct 2014, pp. 2–4.
- [18] B. D. 2020, *INFORMACIÓN DE USO DEL SPOT*, v1.0 ed., Boston Dynamics, 78 4th Ave. Waltham, MA 02451 USA, jul 2020.
- [19] O. M. de la Salud. Brote de enfermedad por coronavirus (covid-19): orientaciones para el público. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/emergencias/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public> [Fecha de consulta: oct 2020]
- [20] O. Escobar, E. Sofía, C. Rodríguez, C. Julio, D. Velasco, y O. Germán, “Despliegue de la función calidad (qfd): beneficios y limitaciones detectados en su aplicación al diseño de prótesis mioeléctrica de mano,” *Ingeniería e Investigación*, vol. 25, no. 1, pp. 30–38, apr 2005.
- [21] J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*, 3rd ed. John Wiley & Sons, INC, 2001.
- [22] INEN. Accesibilidad de las personas al medio físico. rampas. [En línea]. Disponible: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/NTE-INEN-2245-RAMPAS.pdf> [Fecha de consulta: apr 2022]
- [23] P. Robotics y Electronics. 100:1 metal gearmotor 37dx57l mm 12v (helical pinion). [En línea]. Disponible: <https://www.pololu.com/product/4745> (2022)
- [24] R. Mott, *Resistencia de Materiales*, 5th ed. PEARSON EDUCACIÓN, 2009.

- [25] M. C. Ruiz y E. B. Díaz, *Mecánica de estructuras Libro 2 Métodos de análisis*, 3rd ed. Edicions UPC, sep 2022.
- [26] R. P. Ltd. Raspberry pi model b. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (2022)
- [27] N. M. SAC. Driver puente h l298n 2a. [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/drivers/11-driver-puente-h-l298n.html>
- [28] Genius. Ecam 8000. [En línea]. Disponible: <https://us.geniusnet.com/product/ecam-8000/>
- [29] Logitech. Cámara web empresarial brio ultra hd pro. [En línea]. Disponible: <https://www.logitech.com/es-roam/products/webcams/brio-4k-hdr-webcam.960-001105.html>
- [30] mini packing. Cámara para pc mini packing. [En línea]. Disponible: <https://ciberwebsupport.com/product/camara-para-pc-mini-packing/>
- [31] Forza. Mini ups dc de forza. [En línea]. Disponible: <https://technocio.com/mini-ups-dc-de-forza/>