



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de una rueda portátil

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Huerta Villalobos Leonardo Humberto

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Vicente Borja Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich

Secretario: Dr. Leopoldo Adrián González González

Vocal: Dr. Vicente Borja Ramírez

1er Suplente: Dr. Adrián Espinosa Bautista

2do Suplente: Dr. Edmundo Gabriel Rocha Cozatl

AGRADECIMIENTOS

A la naturaleza por siempre inspirarme.

A la humanidad por siempre motivarme.

A mi país por siempre maravillarme.

A mi universidad por siempre hacerme sentir en casa.

A mi director de tesis por siempre desafiarme.

A mis profesores por siempre exigirme.

A mi familia por siempre apoyarme.

A mis mascotas por siempre acompañarme.

A mis amigos por siempre sorprenderme.

A ti por siempre.

- *No reinventes la rueda.*
- *¿Por qué no?*

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño de una rueda portátil para sillas de ruedas y bicicletas.

Inicialmente se buscó entender la problemática desde la perspectiva del usuario. Al analizar los vehículos plegables, se identificó que las ruedas son un factor limitante en el diseño de medios de transporte personal que buscan ser trasladados o guardados de forma compacta.

Para conocer el estado del arte se consultaron concursos, premios, centros de investigación y desarrollo, propuestas de la ciencia ficción, conceptos, prototipos, patentes y artículos. La información recabada se comparó mediante tablas y gráficas.

Con base en las necesidades humanas detectadas, se definieron los requerimientos y las especificaciones.

Para la generación de alternativas, se tomó inspiración de elementos naturales y artificiales que varían su forma. Las alternativas se generaron con dos objetivos: simular el movimiento de una rueda sin tener una rueda completa y compactar el tamaño de una rueda o un fragmento de la misma.

Se generaron todas las posibles combinaciones entre las ruedas simuladas con las ruedas compactas y se evaluaron bajo diferentes parámetros: compactación, resistencia, manufactura y funcionamiento. Las cuatro propuestas más sobresalientes se elaboraron en modelos a escala y éstas, a su vez, se evaluaron bajo nuevos parámetros (eficiencia y amortiguamiento) para seleccionar la alternativa final.

La alternativa seleccionada se basa en un sistema de levitación magnética que no requiere rieles, al ir sobreponiendo continuamente imanes en su trayectoria. Debido a que existen varios riesgos relacionados al emplear campos magnéticos, se analizaron los diferentes casos y se propusieron soluciones para mitigarlos, como el uso de un escudo magnético mediante una Jaula de Faraday. La visibilidad del sistema también juega un papel importante para detectar fallas, por lo cual se propone el uso de materiales transparentes o translúcidos.

Se elaboraron dos prototipos, uno con imanes de ferrita y otro con imanes de neodimio, y se sometieron a diferentes pruebas (carga, deformación, desplazamiento horizontal, superación de un obstáculo, desplazamiento con pendiente y amortiguamiento).

Por último, se propone un diseño final del sistema para sillas de ruedas y bicicletas. Este sistema se planteó de manera teórica debido a limitantes de costo y seguridad.

Tabla de contenido

	Página
Introducción	1
1. Objetivos, alcances y metodología o proceso	6
1.1 Objetivos	
1.2 Alcances	
1.3 Metodología o proceso	
2. Estado del arte	9
2.1 Concursos y premios	
2.2 Centros de investigación y desarrollo	
2.3 Propuestas de la ciencia ficción	
2.4 Conceptos	
2.5 Prototipos	
2.6 Productos	
2.7 Patentes	
2.8 Artículos	
3. Estudio comparativo	23
3.1 Reducción de dimensiones	
3.2 Suspensión integrada	
3.3 Pedaleo asistido	
3.4 Requerimientos y especificaciones	
4. Conceptualización	36
4.1 Alternativas en papel	
4.2 Modelos de funcionalidad limitada	
5. Configuración	48
5.1 Alternativas de solución	
5.2 Modelos a escala	
5.3 Subsistemas de las alternativas	
5.4 Selección de material	
6. Medidas de seguridad	59
6.1 Escudo magnético, configuración y desprendimiento	
6.2 Visibilidad	
7. Construcción de los prototipos	61
7.1 Prototipo 1	
7.2 Prototipo 2	
8. Validación de las estructuras	71
8.1 Prototipo 1	
8.2 Prototipo 2	
9. Diseño final	74
9.1 Configuración	
10. Sistemas análogos y nuevos materiales	81
10.1 Sistemas análogos	

10.2 Nuevos materiales	
10.3 Ventajas y áreas de oportunidad	
10.4 Conocimiento adquirido y generado	
Conclusiones	88
Referencias	89

Introducción

Los avances tecnológicos han permitido disminuir de manera drástica el volumen y peso de aparatos que empleamos de forma cotidiana. El ejemplo más claro es el teléfono inteligente. Las primeras computadoras eran del tamaño de edificios y, sin embargo, ahora caben en nuestros bolsillos.

El contar con un teléfono inteligente en cualquier momento ha abierto un sinfín de posibilidades. Desde las redes de servicios compartidos como Uber, hasta la integración de tecnologías de realidad aumentada y virtual en videojuegos como Pokémon Go.

¿Cómo sería una revolución similar en el ámbito de la movilidad personal? La posibilidad de contar en cualquier momento con tu medio de transporte personal. No tener la necesidad de sacar tu celular para emplear una aplicación, ni de caminar al más próximo medio de transporte compartido, ni de buscar estacionamiento, ni de preocuparte de robos, etc.

Este cambio ayudaría a disminuir el tráfico en las ciudades, liberaría calles con vehículos estacionados, aumentaría el uso del transporte público, disminuiría las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y mejoraría la calidad del aire.

El boceto de la *exobike* en la figura 1 ilustra una revolución en la movilidad personal.



FIGURA 1. *Exobike*.

Problemática

¿Qué es lo que nos detiene de una revolución en la movilidad personal similar a la de los teléfonos inteligentes? Básicamente se reduce a dos factores: peso y volumen.

El peso y volumen son dos factores cruciales en cualquier medio de transporte plegable. Si cualquiera de esos factores supera ciertos límites, el medio de transporte se vuelve poco práctico. Los dos principales vehículos plegables para medios de transporte personal son las sillas de ruedas y las bicicletas.

Al analizar estos medios de transporte plegables se identificó que las ruedas son un factor limitante en el diseño de medios de transporte personal que buscan ser trasladados o guardados de forma compacta. Como se muestra en la figura 2, los fabricantes de bicicletas plegables han optado por emplear ruedas más pequeñas, las cuales transmiten más las irregularidades en el suelo, en lugar de emplear algún diseño de ruedas plegables. En el caso de las sillas de ruedas, se ha mantenido el mismo diámetro de la rueda.



FIGURA 2. Bicicleta plegable de la marca Brompton. (Brompton, 2019)

Aunque existen varios medios de carga o transporte que se podrían beneficiar con el diseño de una rueda portátil (carriolas, vehículos alternativos, robots móviles, diablitos, carretillas de carga, remolques, mochilas de golf, maletas de equipaje, negocios ambulantes, etc.), el presente trabajo se va a enfocar en diseñar una rueda portátil para sillas de ruedas y bicicletas debido a que comparten dimensiones y cargas similares.

Estadísticas

Una población cercana a la de México requiere una silla de ruedas:

- Aproximadamente 131,800,000 personas en el mundo requieren una silla de ruedas. *(Wheelchair Foundation, 2017)*

El uso de una silla de ruedas puede darse desde una edad muy temprana e impactar en el desarrollo mental de las personas:

- El 90% de los niños con discapacidad en los países en desarrollo no asisten a la escuela de acuerdo a la UNESCO. *(Wheelchair Foundation, 2017)*

Hay cerca de una bicicleta por cada ocho personas:

- Se estima que hay más de mil millones de bicicletas en el mundo, con cerca de la mitad en China. *(Worldometers, 2005)*

El diseño de la bicicleta plegable de la marca Brompton no ha cambiado fundamentalmente desde su patente en 1979:

- Brompton produce aproximadamente 40,000 bicicletas plegables al año. *(Smale, 2013)*

Propuesta de valor

Aunque hay un mayor número de bicicletas que sillas de ruedas en el mundo, la realidad es que los más beneficiados por una rueda portátil serían los usuarios de sillas de ruedas. Para un ciclista puede resultar conveniente contar con ruedas portátiles, pero para un usuario de silla de ruedas puede resultar un cambio radical en su vida. Pocos países, como Canadá, cuentan con la infraestructura necesaria para usuarios de sillas de ruedas como la que se muestra en la figura 3.



FIGURA 3. Rampa en el transporte público. *(Cyber Sciences, 2016)*

Además de brindar una mayor flexibilidad al guardar o trasladar un medio de transporte personal, también se busca generar beneficios adicionales. Por ejemplo, la suspensión integrada en las ruedas sería de gran ayuda porque la mayoría de las sillas de ruedas y bicicletas plegables no cuentan con un sistema de suspensión. Otro beneficio adicional podría ser el pedaleo asistido en el caso de las bicicletas, ya que permite realizar recorridos más largos, subir inclinaciones más pronunciadas y llegar a la escuela o trabajo sin tanto sudor.

Estructura de la tesis

En cada capítulo se realizaron las siguientes actividades:

- Capítulo 1. Objetivos, alcances y metodología o proceso - con base en la problemática, se plantearon los objetivos, alcances y la metodología o proceso del proyecto.
- Capítulo 2. Estado del arte - para conocer las propuestas más novedosas, se investigaron concursos y premios, centros de investigación y desarrollo, propuestas de la ciencia ficción, conceptos, prototipos, productos, patentes y artículos.
- Capítulo 3. Estudio comparativo - se compararon todas las propuestas con reducción de dimensiones, las propuestas con suspensión integrada y las propuestas con pedaleo asistido. Al finalizar cada comparativo, se mencionaron las propuestas que mostraron un mejor desempeño. Los requerimientos y especificaciones se determinaron en base a las necesidades de los usuarios.
- Capítulo 4. Conceptualización - se realizó una abstracción de la rueda para generar las alternativas en papel y los modelos de funcionalidad limitada. Se plantearon propuestas que disminuyen sus dimensiones o simulan el movimiento de una rueda.
- Capítulo 5. Configuración - se combinaron las propuestas que disminuyen sus dimensiones con las que simulan el movimiento de una rueda. Se empleó una matriz de selección para escoger las alternativas de solución. Se generaron modelos a escala, se identificaron los subsistemas de las alternativas y se seleccionaron los materiales para los prototipos.
- Capítulo 6. Medidas de seguridad - se propusieron medidas de seguridad para minimizar las circunstancias de riesgo.
- Capítulo 7. Construcción de los prototipos - se construyeron dos prototipos a una menor escala para probar el funcionamiento de los dos subsistemas con distintos materiales.
- Capítulo 8. Validación de las estructuras - los dos prototipos se sometieron a pruebas para analizar su comportamiento.
- Capítulo 9. Diseño final - se planteó de manera teórica la configuración para un sistema de escala 1:1. Se revisó el cumplimiento de las especificaciones.
- Capítulo 10. Sistemas análogos y nuevos materiales - se propuso un sistema análogo con electroimanes y uno híbrido. Se considera el uso de nuevos materiales. Se describen las ventajas del sistema y las áreas de oportunidad. Se presenta el conocimiento adquirido y generado.

1. Objetivos, alcances y metodología o proceso

Con base en la problemática detectada, se plantearon los objetivos, alcances y una metodología o proceso para desarrollar una propuesta de solución que genere un valor agregado.

1.1 Objetivos

Los objetivos se dividieron en objetivos generales y específicos.

Generales

Los objetivos generales están enfocados al desarrollo del país, de la ingeniería y del futuro profesionista y son:

- Resolver una problemática social en el ámbito de la movilidad.
- Contribuir a la generación de conocimiento en el ámbito de la ingeniería.
- Aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Específicos

Los objetivos específicos están enfocados al proyecto y son:

- Diseñar una rueda portátil para un medio de transporte personal de baja velocidad.
- Igualar o superar las especificaciones técnicas de ruedas que cambian o disminuyen sus dimensiones.
- Facilitar el almacenamiento o traslado del medio de transporte personal al ir caminando, en vehículos, transporte público o aviones.
- Generar beneficios adicionales para los usuarios como la suspensión integrada o pedaleo asistido.

1.2 Alcances

En un lapso de seis meses, se plantea alcanzar los siguientes resultados:

- Identificar los mecanismos más eficientes para reducir las dimensiones de una rueda.
- Diseñar una rueda portátil para sillas de ruedas y bicicletas.
- Igualar o superar el comportamiento de una rueda convencional.
- Generar un beneficio adicional como la suspensión integrada o pedaleo asistido.

Es importante aclarar que estos alcances se encuentran en función de limitantes económicas y de factores que pongan en riesgo la seguridad del tesista.

1.3 Metodología o proceso

La metodología o proceso consta de los siguientes pasos:

- Problemática - se identifica una problemática social que pueda ser resuelta mediante la ingeniería.
- Investigación del estado del arte - se identifican las principales propuestas para resolver esta problemática y, de ser posible, se clasifican en categorías.
- Estudio comparativo - se comparan las propuestas que comparten los mismos parámetros y se identifican las propuestas con un mejor desempeño.
- Conceptualización - se parte de la abstracción de la problemática para plantear alternativas que no estén, forzosamente, relacionadas con las propuestas encontradas anteriormente.
- Elaboración de modelos - se realizan modelos de funcionalidad limitada de las alternativas y se comparan con las propuestas existentes.
- Selección de la alternativa- se emplea una matriz de selección para escoger la alternativa final en base a varios criterios, los cuales deben estar estrechamente ligados a las especificaciones.
- Selección de materiales - se elige el material o materiales de los prototipos, tomando en cuenta las especificaciones.
- Medidas de seguridad - se busca minimizar las circunstancias de riesgo.
- Prototipos - se generan por lo menos dos prototipos de la alternativa final, los cuales pueden diferir en cuanto a la configuración de los elementos o a los materiales empleados.
- Pruebas - se someten los prototipos a las condiciones de trabajo para contrastar su comportamiento e identificar áreas de oportunidad.
- Diseño final - se plantea un diseño final que cumpla con las especificaciones.
- Próximos pasos - se propone el uso de diferentes configuraciones o materiales para dar solución a las áreas de oportunidad.

2. Estado del arte

Para tener un panorama de 360° del estado del arte, se investigaron artículos, patentes, productos, prototipos, conceptos e incluso propuestas encontradas en la ciencia ficción. Aunado a esto, se identificaron los principales concursos, premios y centros de investigación y desarrollo.

2.1 Concursos y premios

Para conocer las propuestas más innovadoras en el diseño de ruedas, se identificaron los principales concursos y premios en materia de movilidad. La mayoría de estos eventos se realizan de manera anual con categorías para propuestas de diseño y/o productos comerciales. En la figura 4 se muestran algunos de los concursos y premios más destacados. En el apartado 2.4 Conceptos, se encuentran propuestas destacadas que integran nuevas funcionalidades. Dentro de las propuestas premiadas, no se presentó un diseño de una rueda con reducción de dimensiones.



FIGURA 4. Concursos y premios. (Next Visionaries, 2017), (Red Dot Award, 2018), (iF DESIGN AWARD, 2018), (iDSA, 2018)

2.2 Centros de investigación y desarrollo

Los concursos y premios permitieron identificar los principales centros de investigación y desarrollo. Tanto agencias gubernamentales, como empresas privadas y universidades destacan en el diseño de ruedas. Esta labor puede tener múltiples fines como la exploración espacial, lanzar productos comerciales o cuidar el ambiente. En la figura 5 se muestran algunos de los centros de investigación y desarrollo más importantes. Las propuestas que han generado, forman parte de los apartados 2.4 Conceptos, 2.5 Prototipos y 2.6 Productos.



FIGURA 5. Centros de investigación y desarrollo. (NASA), (MIT), (Michelin, 2017), (Hankook, 2016), (Bridgestone, 2017), (Goodyear, 2018)

2.3 Propuestas de la ciencia ficción

La ciencia ficción es una poderosa herramienta para anticipar el futuro lejano. En estas visiones del futuro, comúnmente se plantean novedosos medios de transporte con tecnologías en desarrollo o aún inexistentes como la *light cycle* de Tron Legacy o las cápsulas de Dragon Ball. Conocer estas propuestas puede servir de inspiración para generar ideas.

En una historieta creada por Singularity University, una institución educativa creada por Google y la Nasa, se plantean las hazañas de una periodista nómada de 101 años de edad. En la figura 6 se muestra un boceto de las ruedas expansibles de su medio de transporte plegable.

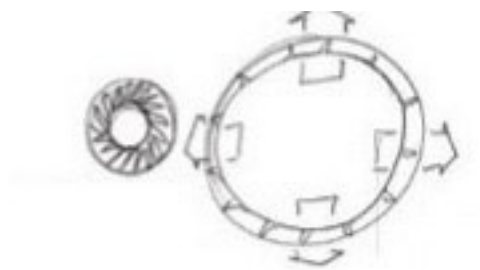


FIGURA 6. Rueda expansible. (Singularity University, 2018)

2.4 Conceptos

Los conceptos buscan explorar nuevas posibilidades para el futuro próximo. Algunos conceptos se convertirán en productos en los próximos años. Esto dependerá de la viabilidad económica, factibilidad tecnológica e interés del mercado. En la tabla 1 se muestran conceptos que buscan reinventar la rueda.

TABLA 1. Conceptos.

Imagen	Fabricante/ Diseñador	Modelo	Características
 <p>(Hankook, 2012)</p>	Hankook	Mag-Trac	<ul style="list-style-type: none"> • suspensión magnética • polos opuestos por corriente instantánea hacen que la rueda gire
 <p>(Hankook, 2014)</p>	Hankook	Boostac	<ul style="list-style-type: none"> • neumático adaptable al terreno • cambio de altura
 <p>(Hankook, 2016)</p>	Hankook	Flexup	<ul style="list-style-type: none"> • peldaños divididos para subir escaleras

Imagen	Fabricante/ Diseñador	Modelo	Características
 <p data-bbox="224 569 453 604"><i>(Goodyear, 2018)</i></p>	Goodyear	Oxygene	<ul data-bbox="1003 369 1419 590" style="list-style-type: none"> • la estructura hueca de la llanta capta agua para el musgo y mejora el contacto en superficies húmedas • fotosíntesis
 <p data-bbox="224 827 453 863"><i>(Goodyear, 2017)</i></p>	Goodyear	Eagle 360	<ul data-bbox="1003 669 1252 852" style="list-style-type: none"> • omnidireccional • conectividad • auto-reparación
 <p data-bbox="224 1194 453 1230"><i>(Goodyear, 2015)</i></p>	Goodyear	BH-03	<ul data-bbox="1003 1016 1377 1161" style="list-style-type: none"> • genera energía eléctrica • material termoeléctrico y piezoeléctrico
 <p data-bbox="232 1465 444 1501"><i>(Michelin, 2017)</i></p>	Michelin	Visionary Concept	<ul data-bbox="1003 1291 1435 1507" style="list-style-type: none"> • dibujo impreso en 3D con un material biodegradable • llanta no neumática • materiales reciclables
 <p data-bbox="207 1797 467 1833"><i>(Bridgestone, 2017)</i></p>	Bridgestone	Air Free Concept	<ul data-bbox="1003 1698 1305 1734" style="list-style-type: none"> • llanta no neumática

Imagen	Fabricante/ Diseñador	Modelo	Características
 <p data-bbox="181 598 495 661"><i>(Mendes, 2009)</i></p>	Víctor Alemán	Eco 7 Folding Bike	<ul style="list-style-type: none"> • rueda plegable • llanta no neumática
 <p data-bbox="181 903 495 972"><i>(Cro-Raos, 2018)</i></p>	Boris Raos	Folding Bike Wheel	<ul style="list-style-type: none"> • rueda plegable
 <p data-bbox="181 1260 495 1360"><i>(Collapsible Bicycle Concept, 2018)</i></p>	Blair Hasty	Collapsible Bicycle Concept	<ul style="list-style-type: none"> • rueda plegable
 <p data-bbox="181 1638 495 1703"><i>(Noe, 2013)</i></p>	Ackeem Ngwenya	Roadless	<ul style="list-style-type: none"> • cambio de diámetro, ancho y altura

El material biodegradable con el que se imprime en 3D el dibujo de la llanta de la Visionary Concept de Michelin no se ha especificado.

2.5 Prototipos

Los prototipos cuentan con casi todas las funcionalidades del producto final. El avance en tecnologías digitales como los programas CAD y la impresión 3D han permitido reducir el tiempo de desarrollo de prototipos. La posibilidad de probar los prototipos de forma virtual mediante programas de análisis de ingeniería basados en el método del elemento finito (FEM), ha permitido acelerar aún más el proceso. En la tabla 2 se muestran prototipos que han pasado por varias iteraciones de diseño.

TABLA 2. Prototipos.

Imagen	Fabricante/ Diseñador	Modelo	Características
 <p data-bbox="289 1226 388 1255">(NASA)</p>	NASA	Superelastic Tire	<ul style="list-style-type: none"> • memoria de forma (NiTi y sus derivados) • llanta no neumática
 <p data-bbox="188 1545 483 1575">(Revolve Wheel, 2017)</p>	Andrea Mocellin	Revolve Wheel	<ul style="list-style-type: none"> • rueda plegable • llanta no neumática

2.6 Productos

Los productos representan a la competencia en el mercado primario o secundario. El mercado primario está integrado por ruedas portátiles para sillas de ruedas y bicicletas. El mercado secundario está conformado por ruedas con funcionalidades innovadoras para sillas de ruedas y bicicletas. En la tabla 3 se pueden apreciar productos para medios de transporte personal.

TABLA 3. Productos.







Imagen	Fabricante	Modelo	Características
 <p>(Michelin, 2018)</p>	Michelin	Tweel	<ul style="list-style-type: none"> • radios de poliuretano flexibles • llanta no neumática
 <p>(Loopwheels, 2018)</p>	Loopwheels	Loopwheel	<ul style="list-style-type: none"> • suspensión integrada mediante un compuesto de carbono recubierto de plástico
 <p>(Softwheel, 2018)</p>	Softwheel	Acrobat	<ul style="list-style-type: none"> • suspensión integrada mediante cilindros de compresión

Imagen	Fabricante	Modelo	Características
 <p>(MIT)</p>	MIT	Copenhagen Wheel	<ul style="list-style-type: none"> • pedaleo asistido • freno regenerativo • conectividad con el celular
 <p>(GeoOrbital, 2017)</p>	GeoOrbital	GeoOrbital Wheel	<ul style="list-style-type: none"> • pedaleo asistido • freno regenerativo
 <p>(The Morph Wheel, 2014)</p>	Morph	Morph Wheel	<ul style="list-style-type: none"> • rueda plegable

A diferencia de los conceptos, que suelen mencionar varias características adicionales, los productos se enfocan en una característica en particular.

Sólo la Tweel de Michelin está diseñada para vehículos de cuatro ruedas como cuatrimotos, carritos de golf, tractores y vehículos.

2.7 Patentes

Las patentes protegen el uso de mecanismos plegables en productos dentro de límites geográficos. Es posible generar patentes a nivel nacional por medio del IMPI o a nivel internacional por medio de la OMPI. En la tabla 4 se muestran mecanismos para ruedas o estructuras circulares que son plegables.

TABLA 4. Patentes.

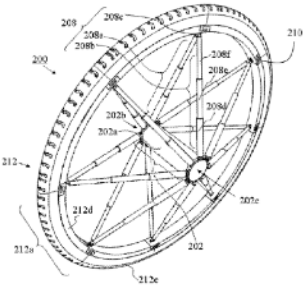

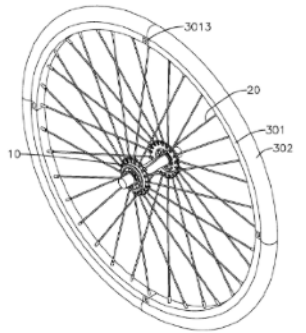
Imagen	Inventor(es)	Patente	Características
 <p>(Sheu y Lee, 2010)</p>	Sheu y Lee	Foldable Wheel	<ul style="list-style-type: none"> • Brazos retráctiles con puntos de giro en los extremos.
 <p>(Kyung-soo, 2014)</p>	Kyung-soo	Foldable Wheel, Bicycle and Wheelchair Having the Same	<ul style="list-style-type: none"> • Brazos con puntos de giro en los extremos.
 <p>(Sheu, 2013)</p>	Sheu	Spoke reorientable wheel	<ul style="list-style-type: none"> • Rayos reorientables.

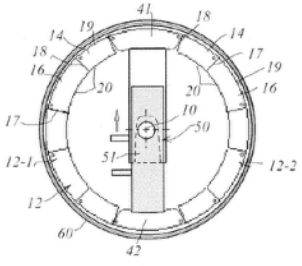
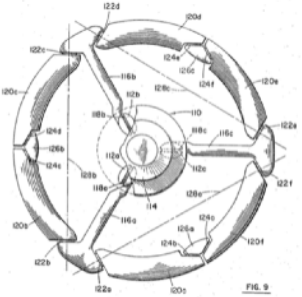
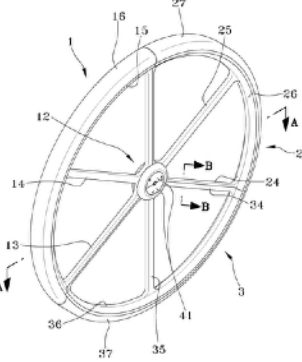
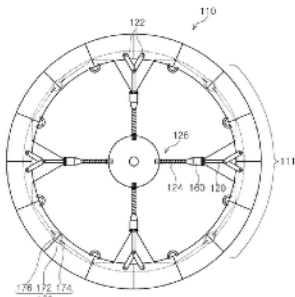
Imagen	Inventor(es)	Patente	Características
 <p data-bbox="224 598 453 636"><i>(Jacquilot, 2016)</i></p>	Jacquilot	Foldable Wheel	<ul style="list-style-type: none"> Mecanismos de enlace permiten cambiar la forma de la rueda.
 <p data-bbox="215 976 457 1014"><i>(Cummings, 1964)</i></p>	Cummings	Foldable structure	<ul style="list-style-type: none"> Arcos con puntos de giro.
 <p data-bbox="212 1438 466 1503"><i>(Jin-gyu, Du-man y serom, 2011)</i></p>	Jin-gyu, Du-man y serom	The folding type bicycle's wheel	<ul style="list-style-type: none"> Punto de giro adicional en el centro permite plegar la rueda como un abanico.

Imagen	Inventor(es)	Patente	Características
 <p>(Seung-young y Nam, 2012)</p>	Seung-young y Nam	Foldable Wheel	<ul style="list-style-type: none"> Mecanismos de enlace permiten cambiar la forma de la rueda a una cruz.

2.8 Artículos

Los artículos son la punta de lanza dentro de la investigación y desarrollo. Existe un gran interés en el diseño de ruedas portátiles para los futuros rovers debido a que en las misiones espaciales el volumen y peso se deben mantener al mínimo. En la tabla 5 se muestran artículos de ruedas que varían su forma.

TABLA 5. Artículos.

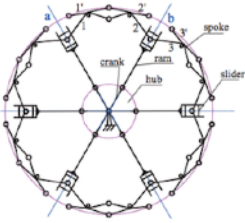
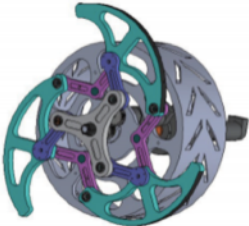
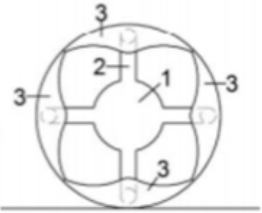
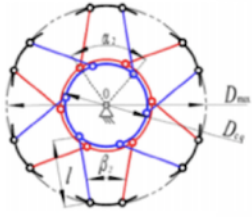
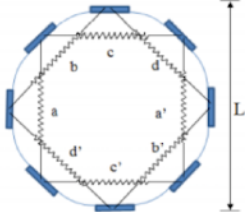
Imagen	Investigadores	Artículo	Características
 <p>(Wenhua et al., 2010)</p>	<p>Wenhua, Qihong, Ming, Jun y Changzu</p>	<p>Design and Analysis for The Configuration of A Radially Foldable Wheel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Radialmente plegable.
 <p>(Zheng et al., 2011)</p>	<p>Zheng, Zhang, Hu, Yu, Song y Zhang.</p>	<p>A Novel High Adaptability Outdoor Mobile Robot with Diameter-variable Wheels</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro variable.
 <p>(Mostyn et al., 2018)</p>	<p>Mostyn, Krys, Kot, Bobovsky y Novak</p>	<p>The synthesis of a segmented stair-climbing wheel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sube escaleras.

Imagen	Investigadores	Artículo	Características
 <p data-bbox="215 556 456 590"><i>(Zeng et al., 2018)</i></p>	<p data-bbox="521 436 722 541">Zeng, Gao, Jiang, Huang, Liu y Li</p>	<p data-bbox="764 327 992 653">Design and analysis of a compliant variable-diameter mechanism used in variable-diameter wheel for lunar rover</p>	<ul data-bbox="1057 474 1341 508" style="list-style-type: none"> • Diámetro variable.
 <p data-bbox="228 898 448 932"><i>(Koh et al, 2012)</i></p>	<p data-bbox="513 804 730 837">Koh, Lee y Cho</p>	<p data-bbox="764 709 992 930">Design of the Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator for the Soft Deformable Wheel Robot</p>	<ul data-bbox="1057 804 1349 837" style="list-style-type: none"> • Memoria de forma.

3. Estudio comparativo

Se compararon todas las ruedas que tenían reducción de dimensiones y las propuestas con características similares. Sólo los prototipos y productos se pudieron contrastar bajo diferentes criterios debido a que los conceptos, patentes y artículos no cuentan con un listado de especificaciones técnicas.

3.1 Reducción de dimensiones

Para comparar las propuestas con reducción de dimensiones, se consideraron dos planos perpendiculares:

- Plano O - plano paralelo al circunferencia de la rueda.
- Plano I - plano del eje de la rueda.

En la tabla 6 se muestran las reducciones de dimensiones en los dos planos y las siguientes imágenes:

- Imagen 1: estado con mayores dimensiones.
- Imagen 2: transición.
- Imagen 3: estado con menores dimensiones.

Para asignar un valor a la reducción o aumento de dimensiones en cada plano, se emplearon porcentajes:

- Porcentaje positivo: disminución de dimensiones.
- Porcentaje negativo: aumento de dimensiones.

Ejemplos:

- Si una propuesta disminuye a la mitad su área en un plano, corresponde un valor del 100%.
- Si una propuesta aumenta al doble su área en un plano, corresponde un valor del -100%.

TABLA 6. Reducción de dimensiones.

Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Plano O	Plano I
 <p>(Singularity University, 2018)</p>	-	 <p>(Singularity University, 2018)</p>	100%	0%
 <p>(Mendes, 2009)</p>	 <p>(Mendes, 2009)</p>	 <p>(Mendes, 2009)</p>	300%	-250%
 <p>(Cro-Raos, 2018)</p>	 <p>(Cro-Raos, 2018)</p>	 <p>(Cro-Raos, 2018)</p>	200%	-100%
 <p>(Collapsible Bicycle Concept, 2018)</p>	 <p>(Collapsible Bicycle Concept, 2018)</p>	 <p>(Collapsible Bicycle Concept, 2018)</p>	200%	-150%
 <p>(Noe, 2013)</p>	 <p>(Noe, 2013)</p>	 <p>(Noe, 2013)</p>	100%	-150%



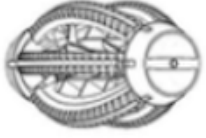


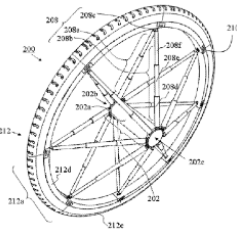
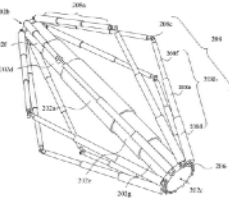
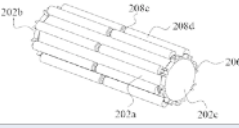

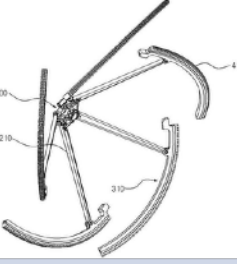

Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Plano O	Plano I
 <p data-bbox="196 533 415 604">(Revolve Wheel, 2017)</p>	 <p data-bbox="448 533 667 604">(Revolve Wheel, 2017)</p>	 <p data-bbox="699 506 919 577">(Revolve Wheel, 2017)</p>	100%	-250%
 <p data-bbox="220 835 391 907">(The Morph Wheel, 2014)</p>	-	 <p data-bbox="724 751 894 823">(The Morph Wheel, 2014)</p>	50%	0%
 <p data-bbox="180 1167 431 1207">(Sheu y Lee, 2010)</p>	 <p data-bbox="431 1136 683 1176">(Sheu y Lee, 2010)</p>	 <p data-bbox="683 1052 935 1092">(Sheu y Lee, 2010)</p>	200%	0%
 <p data-bbox="180 1486 431 1526">(Kyung-soo, 2014)</p>	 <p data-bbox="431 1524 683 1564">(Kyung-soo, 2014)</p>	 <p data-bbox="683 1419 935 1459">(Kyung-soo, 2014)</p>	300%	-250%

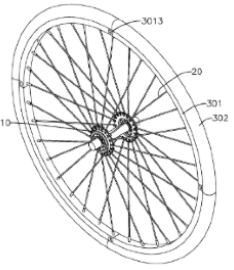
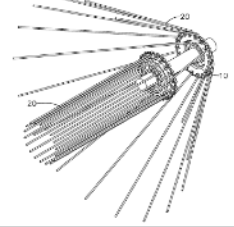
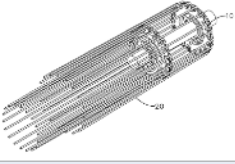
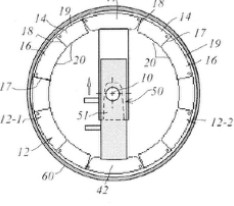
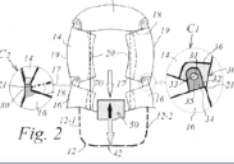
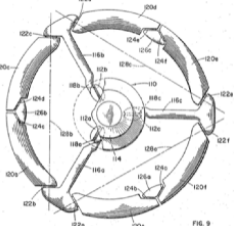
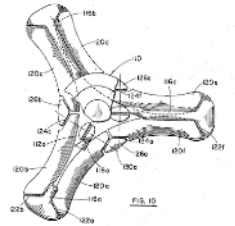
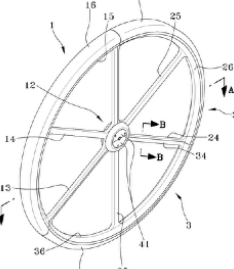
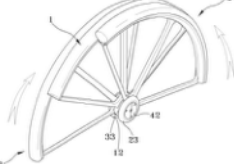
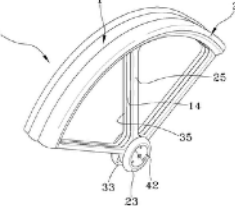
Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Plano O	Plano I
 <p>(Sheu, 2013)</p>	 <p>(Sheu, 2013)</p>	 <p>(Sheu, 2013)</p>	200%	-250%
 <p>(Jacquelot, 2016)</p>	 <p>(Jacquelot, 2016)</p>	-	100%	0%
 <p>(Cummings, 1964)</p>	-	 <p>(Cummings, 1964)</p>	100%	0%
 <p>(Jin-gyu, Du-man y serom, 2011)</p>	 <p>(Jin-gyu, Du-man y serom, 2011)</p>	 <p>(Jin-gyu, Du-man y serom, 2011)</p>	200%	-150%

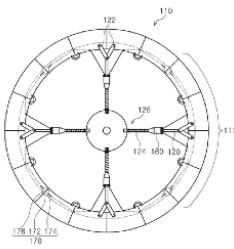
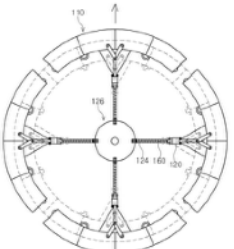
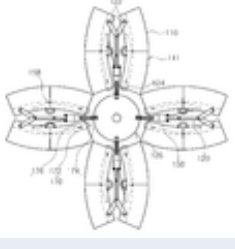
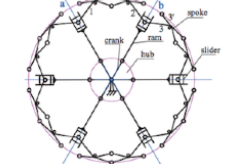
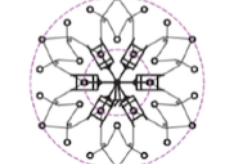
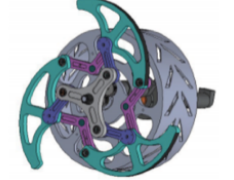
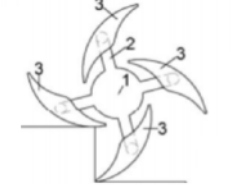
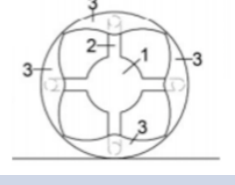
Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Plano O	Plano I
			100%	0%
(Seung-young y Nam, 2012)	(Seung-young y Nam, 2012)	(Seung-young y Nam, 2012)		
	-		100%	0%
(Wenhua et al., 2010)		(Wenhua et al., 2010)		
	-	-	50%	0%
(Zheng et al., 2011)				
	-		50%	0%
(Mostyn et al., 2018)		(Mostyn et al., 2018)		

Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Plano O	Plano I
 <p data-bbox="188 510 427 548">(Zeng et al., 2018)</p>	-	 <p data-bbox="693 485 932 522">(Zeng et al., 2018)</p>	100%	0%
 <p data-bbox="188 787 427 825">(Koh et al, 2012)</p>	-	 <p data-bbox="693 730 932 768">(Koh et al, 2012)</p>	50%	0%

Se colocaron las propuestas en una gráfica que relaciona la reducción en el plano O (eje vertical) y la reducción en el plano I (eje horizontal). La posición de algunas de las propuestas es aproximada debido a que las imágenes se encimarían. Las propuestas enmarcadas en la figura 7 tienen la mayor reducción en el plano O.

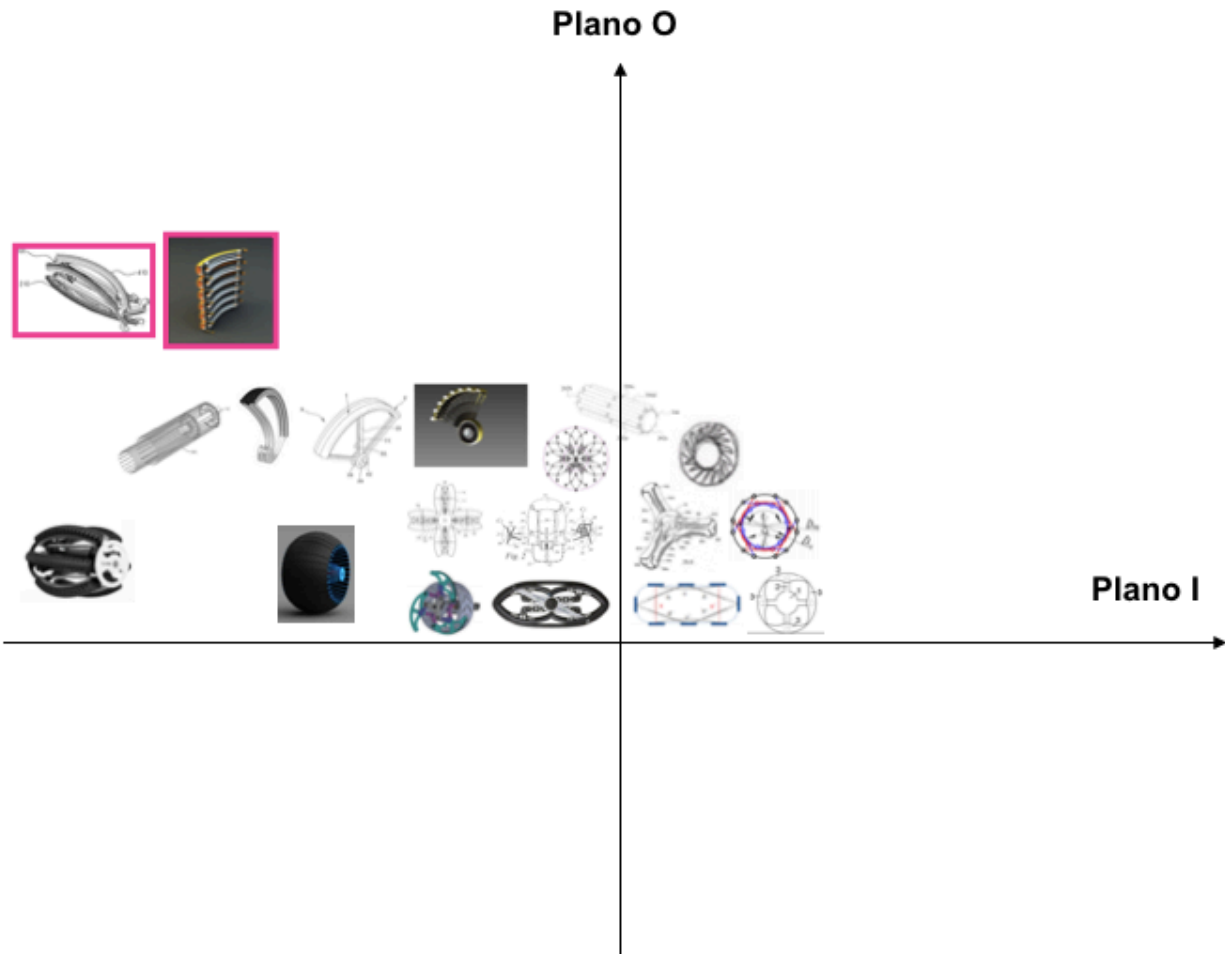




FIGURA 7. Gráfica de las propuestas con reducción de dimensiones.

Las propuestas con la mayor reducción en el plano O, generan un aumento drástico en el plano I. Ninguna de las propuestas logra una reducción de área en el plano I.

En la tabla 7 se compararon dos propuestas con especificaciones técnicas que disminuyen sus dimensiones.

TABLA 7. Morph Wheel vs Revolve Wheel.

Parámetro	Revolve Wheel	Morph Wheel
Imagen	 <p>(Revolve Wheel, 2017)</p>	 <p>(The Morph Wheel, 2014)</p>
Diámetro	26" (66.5 cm)	24" (61 cm)
Dimensiones al estar compactada	22.6 cm	32 x 12.5" (81.3 x 31.8 cm)
Volumen	-	22 l
Volumen al estar compactada	-	12 l
Capacidad de carga	-	300 lb (136.4 kg)
Peso por rueda	-	7.5 lb (3.4 kg)
Material	marco de aluminio	aluminio y nylon relleno de vidrio
Material del borde de mano	-	PP (polipropileno)
Llanta	no neumática	neumática
Certificaciones	-	pruebas de impacto RESNA/ANSI, prueba de caída y estándares de prueba de doble tambor.
Compatibilidad	centro universal	centro de silla de ruedas
Uso	bicicletas y sillas de ruedas	silla de ruedas
Precio por par	-	\$949 USD

Ambas propuestas emplean aluminio y son compatibles con sillas de ruedas, pero la Revolve Wheel no cuenta con certificaciones ni con el borde de mano. La Revolve Wheel es compatible con bicicletas y tiene una llanta no neumática con un diámetro de 26", a diferencia de la Morph Wheel que no es compatible con bicicletas y tiene una llanta neumática con un diámetro de 24". En la figura 8 se encuentran enmarcadas ambas propuestas.

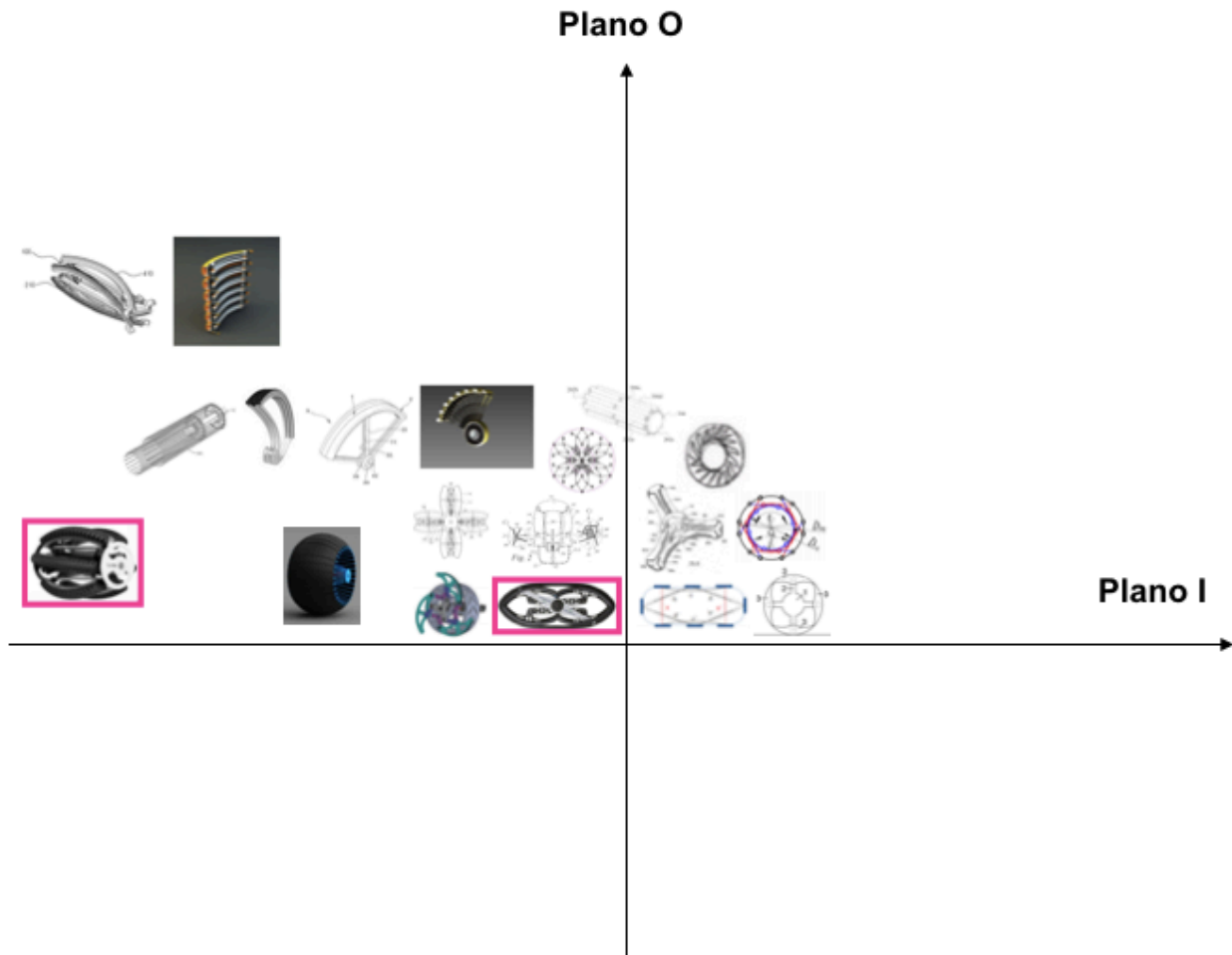




FIGURA 8. Gráfica de las propuestas de reducción de dimensiones con las propuestas de Revolve Wheel y Morph Wheel enmarcadas.

Ambas propuestas no logran disminuir de manera drástica sus dimensiones. La *Morph Wheel* disminuye su área en el plano O y no altera su área en el plano I. La *Revolve Wheel* logra una reducción en el plano O, pero aumenta su área en el plano I.

3.2 Suspensión integrada

En la tabla 8 se compararon dos propuestas con especificaciones técnicas que tienen suspensión integrada.

TABLA 8. Loopwheel vs Acrobat.



Parámetro	Loopwheel	Acrobat
Imagen	 <i>(Loopwheels, 2018)</i>	 <i>(Softwheel, 2018)</i>
Suspensión	compuesto de carbono recubierto de plástico	cilindros de compresión
Estructura	aluminio	compuesto de aluminio, magnesio o fibra de carbono
Peso	1.8 - 1.85 kg	1.6 - 2.2 kg
Peso mínimo	50 kg	-
Peso máximo	120 kg	95 - 130 kg
Tamaños	24", 25"	24", 25"
Precio por par	\$1,026 USD	\$2,250 - \$2,680 USD

Ambas propuestas tienen prestaciones similares, son compatibles con los mismos tamaños y emplean tres elementos en cada rueda para absorber impactos en toda la periferia. Las Acrobat están a más del doble del precio de las Loopwheels.

3.3 Pedaleo asistido

En la tabla 9 se compararon dos propuestas con especificaciones técnicas de pedaleo asistido.

TABLA 9. Copenhagen Wheel vs GeoOrbital.

Parámetro	Copenhagen Wheel	GeoOrbital
Imagen	 <p>(MIT)</p>	 <p>(GeoOrbital, 2017)</p>
Material	-	aluminio
Peso	-	17 - 22 lbs
Peso de la masa	16.8 lbs	
Potencia del motor	250 - 300 W	500 - 600 W
Capacidad de la batería	279 Wh	205 - 504 Wh
Tiempo de carga	2 - 4 h	-
Duración de la batería	1000 ciclos	-
Velocidad máxima	-	20 mph
Velocidad máxima al pedalear	25 mph	-
Rango	30 mi	-
Rango sin pedalear	-	12 - 27 mi
Rango al pedalear	-	30 - 60 mi
Herramientas para instalar	-	ninguna

Parámetro	Copenhagen Wheel	GeoOrbital
Tiempo de instalación	+1 min	1 min
Compatibilidad	26", 700c	26", 700c, 29er
Llanta	-	no neumática
Material de la llanta	-	espuma con una banda de rodadura de hule
Precio	\$1,749 USD	\$995 - \$1,495 USD

Ambas propuestas cuentan con frenos regenerativos. La Copenhagen Wheel se coloca en la rueda trasera y se conecta al celular mediante Bluetooth para elegir entre varias opciones de manejo, a diferencia de la GeoOrbital que se coloca en la rueda frontal y se controla de forma directa mediante un acelerador. La GeoOrbital brinda mejores prestaciones a un menor precio.

3.4 Requerimientos y especificaciones

Partiendo de las necesidades humanas involucradas, se definieron los requerimientos y las especificaciones.

Requerimientos

Los usuarios requieren que las ruedas sean:

- R1. Compatibles - se puedan emplear con sillas de ruedas o bicicletas.
- R2. Portátiles - facilidad para trasladar o almacenar.
- R3. Comfortables - no transmitan las irregularidades de la superficie al usuario.
- R4. Silenciosas - no generan ruidos molestos al rodar.
- R5. Seguras - no se ponchen o doblen.
- R6. Ecológicas - utilicen materiales reciclados o materiales que se puedan reciclar.
- R7. Accesibles - un precio menor al de productos similares.
- R8. Prácticas - no generen fatiga al iniciar el movimiento.

Especificaciones

Con base en los requerimientos, se establecieron las especificaciones:

- Centro: universal - compatible con sillas de ruedas y bicicletas. (R1)
- Diámetro: 24 - 26" - el diámetro que emplean las sillas de ruedas es de 24 ó 25", a diferencia del diámetro de las bicicletas que es de 26 ó 29". (R1)
- Volumen al estar compactada: < 12 l - se toma como referencia la Morph Wheel. (R2)
- Peso: < 3.4 kg - se toma como referencia la Morph Wheel. (R2)
- Suspensión: integrada - absorbe los impactos con la superficie. (R3 y R4)
- Carga: > 130 kg - se toma como referencia la Morph Wheel. (R5)
- Tipo de llanta: no neumática - elimina la posibilidad de pinchaduras y tiene una menor resistencia al rodamiento. (R5 y R8)
- Dibujo de la llanta: hueco - brinda una mejor adherencia en superficies húmedas. (R5)
- Materiales: reciclados y/o reciclables - reducen el impacto al ambiente. (R6)
- Fabricación: aditiva - la fabricación aditiva permite reducir el número de elementos y genera un menor desperdicio de material. (R6)
- Precio por el par: < \$949 USD - se toma como referencia la Morph Wheel. (R7)

La Morph Wheel se toma como referencia en varios casos por ser un producto que disminuye sus dimensiones.

4. Conceptualización

Con la finalidad de explorar nuevas propuestas para reducir las dimensiones de una rueda, se investigaron mecanismos empleados en elementos naturales y artificiales.

Elementos naturales que cambian su forma

Muchos sistemas vivos alteran sus propiedades físicas, como el tamaño, la forma, la masa o el volumen. Estas modificaciones ocurren en respuesta a las necesidades del sistema vivo y/o las condiciones ambientales cambiantes.

Estas modificaciones requieren tasas de respuesta y niveles apropiados. La modificación de cualquiera de estas propiedades requiere materiales para habilitar dichos cambios, señales para realizar los cambios y mecanismos para controlarlos.

(AskNature, 2018)

En la tabla 10 se describen elementos naturales que cambian su forma.

TABLA 10. Elementos naturales que cambian su forma.


Imagen	Descripción
 <p data-bbox="217 1621 461 1654"><i>(AskNature, 2016)</i></p>	<p data-bbox="646 1470 1292 1503">Hojas que se despliegan de manera eficiente.</p>

Imagen	Descripción
 <p data-bbox="217 531 461 569"><i>(AskNature, 2016)</i></p>	<p data-bbox="753 432 1182 470">Probóscide que se desenrolla.</p>
 <p data-bbox="217 825 461 863"><i>(AskNature, 2016)</i></p>	<p data-bbox="688 722 1247 760">Esqueletos articulados para protección.</p>
 <p data-bbox="217 1106 461 1144"><i>(AskNature, 2016)</i></p>	<p data-bbox="548 1010 1390 1047">Hojas con memoria de forma para el cambio de estaciones.</p>
 <p data-bbox="217 1497 461 1535"><i>(AskNature, 2016)</i></p>	<p data-bbox="662 1346 1273 1383">DNA empaquetado densamente sin nudos.</p>
 <p data-bbox="217 1841 461 1879"><i>(AskNature, 2017)</i></p>	<p data-bbox="760 1711 1175 1749">Hojas que se doblan al tacto.</p>

Imagen	Descripción
 <p data-bbox="217 506 461 543">(AskNature, 2016)</p>	<p data-bbox="643 422 1292 459">Piel que permite moverse y cambiar de forma.</p>
 <p data-bbox="217 770 461 808">(AskNature, 2016)</p>	<p data-bbox="794 684 1141 722">Colmillos que se doblan.</p>
 <p data-bbox="217 1079 461 1117">(AskNature, 2016)</p>	<p data-bbox="669 968 1268 1005">Hojas que resisten cargas gravitacionales.</p>
 <p data-bbox="217 1352 461 1390">(AskNature, 2016)</p>	<p data-bbox="799 1262 1136 1299">Hojas con cierre rápido.</p>
 <p data-bbox="217 1656 461 1694">(AskNature, 2016)</p>	<p data-bbox="831 1549 1104 1587">Alas desplegadas.</p>

Los elementos naturales que cambian su forma se colocaron en una gráfica que relaciona su reducción en el plano O (eje vertical) y su reducción en el plano I (eje horizontal). Se considera que el plano O es donde el elemento tiene un atributo similar a una circunferencia o donde se logra la mayor disminución de área. El plano I es un plano perpendicular al plano O. El elemento enmarcado en la figura 9 tiene la mayor reducción de dimensiones en ambos planos.

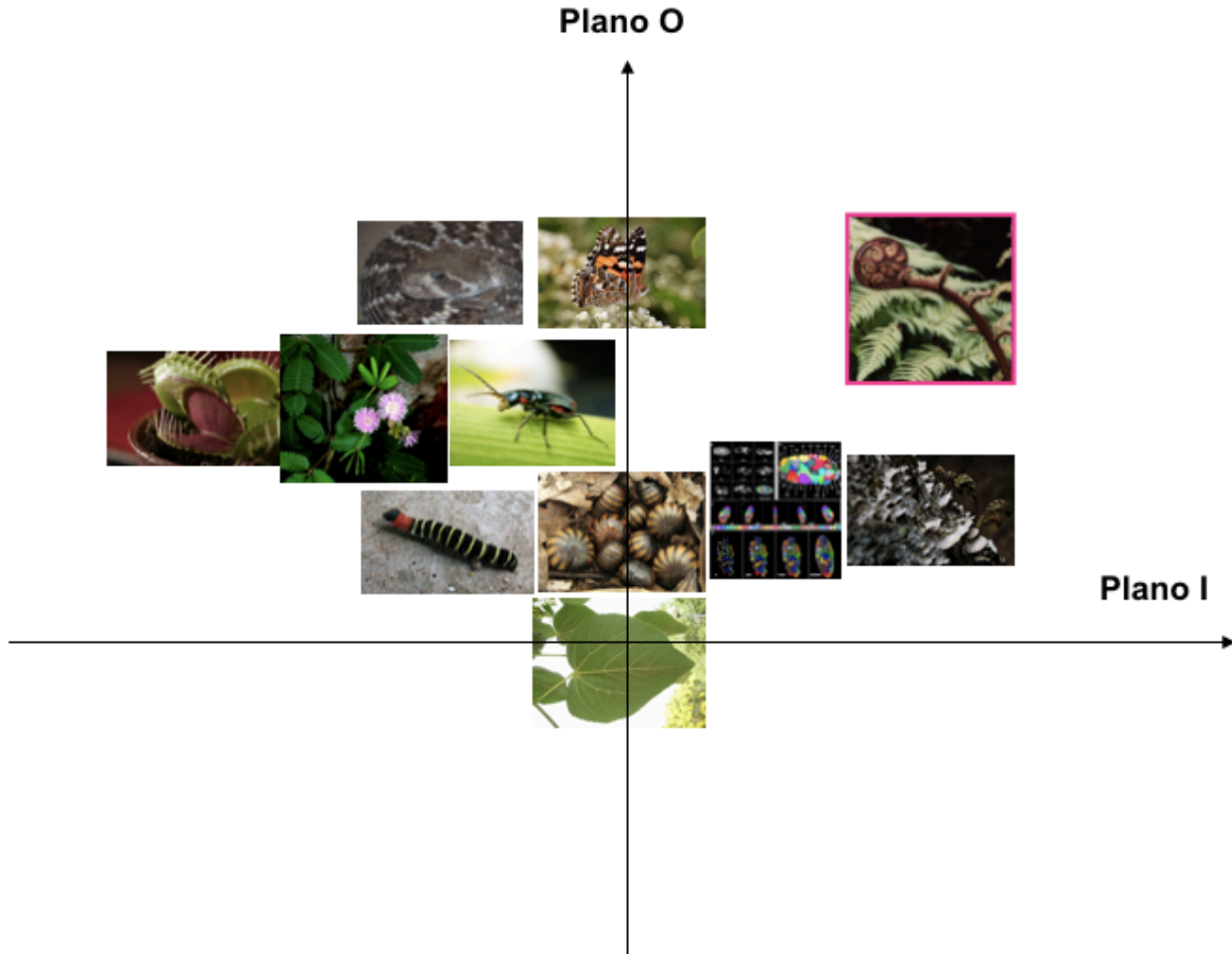


FIGURA 9. Gráfica de reducción de dimensiones de elementos naturales.

De los elementos naturales, el mecanismo más eficiente para reducir dimensiones en ambos planos es plegarse en forma de espiral como las hojas que se despliegan de manera eficiente. El mecanismo empleado por los esqueletos articulados es similar, pero sólo se enrolla hasta formar un círculo y no genera un espiral.

Elementos artificiales que cambian su forma

En la tabla 11 se describen elementos artificiales que modifican sus dimensiones.

TABLA 11. Elementos artificiales que cambian su forma.

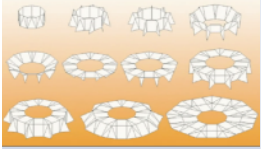
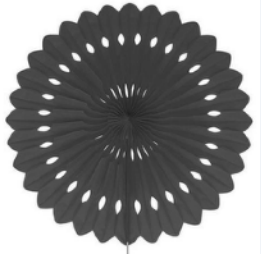



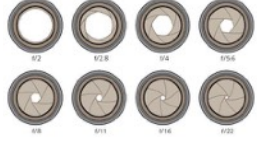

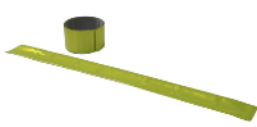

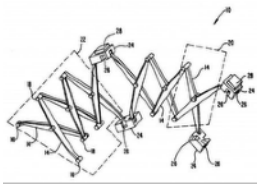
Imagen	Descripción
 <p>(TED, 2008)</p>	Origami
 <p>(La Fiesta de Olivia, 2018)</p>	Abanico
 <p>(Zapals, 2018)</p>	Sombrilla
 <p>(NHTSA)</p>	Bolsa de aire

Imagen	Descripción
 <p data-bbox="204 552 412 583"><i>(Amazon, 2018)</i></p>	Parasol
 <p data-bbox="204 753 412 785"><i>(De Blois, 2015)</i></p>	Diafragma
 <p data-bbox="188 1014 428 1077"><i>(The Home Depot, 2018)</i></p>	Abrazadera
 <p data-bbox="204 1262 412 1293"><i>(Benotto, 2018)</i></p>	Brazaletes reflejante
 <p data-bbox="204 1587 412 1619"><i>(Amazon, 2018)</i></p>	Antena
 <p data-bbox="188 1829 428 1860"><i>(Hoberman, 2003)</i></p>	Esfera de Hoberman

Los elementos artificiales se colocaron en una gráfica que relaciona su reducción en el Plano O (eje vertical) y su reducción en el Plano I (eje horizontal). Se considera que el plano O es donde el elemento tiene un atributo similar a una circunferencia o donde se logra la mayor disminución de área. El plano I es un plano perpendicular al plano O. El elemento enmarcado en la figura 10 tiene la mayor reducción en ambos planos.

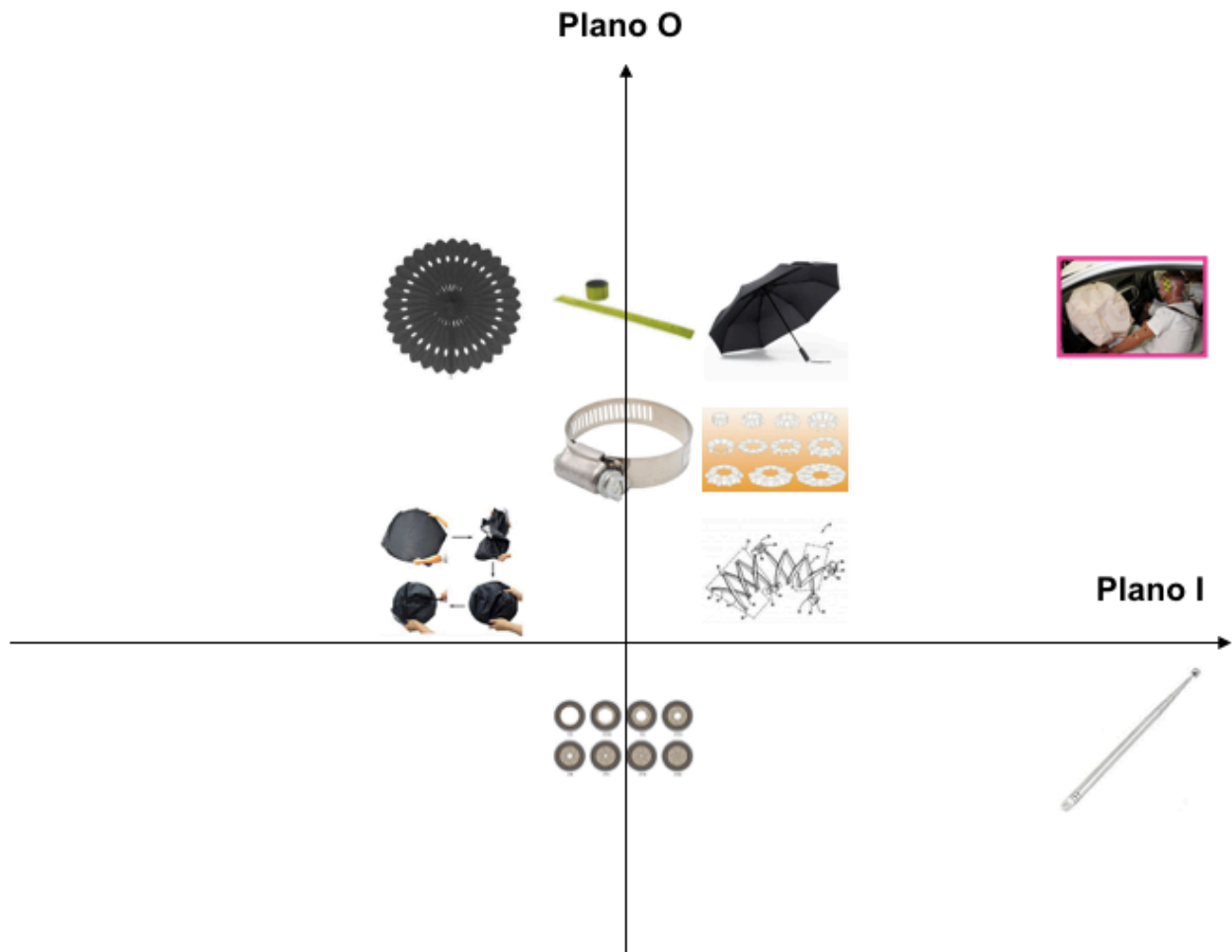


FIGURA 10. Gráfica de reducción de dimensiones de elementos artificiales.

De los elementos artificiales, el mecanismo más eficiente para reducir dimensiones en ambos planos es utilizar dobleces como en las bolsas de aire.

4.1 Alternativas en papel

Para generar las alternativas, se partió de la abstracción de una rueda. Una rueda se puede considerar una sucesión de puntos que viajan a la misma velocidad angular, como se muestra en la figura 11.

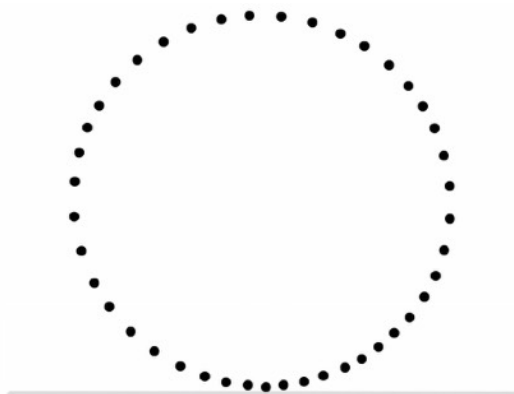


FIGURA 11. Abstracción de una rueda.

Al ir rodando, constantemente va cambiando el punto de contacto. En la figura 12 se muestra un acercamiento del punto de contacto.

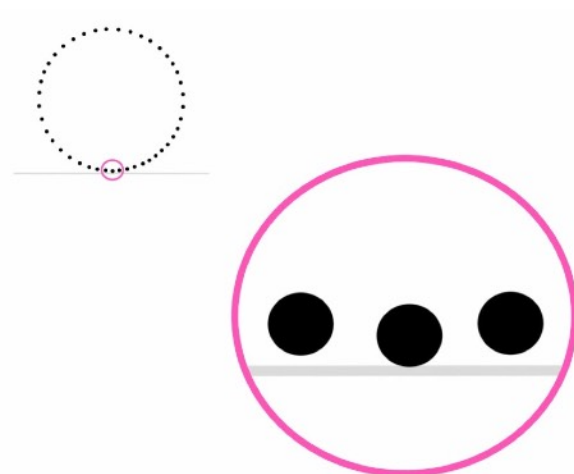








FIGURA 12. Punto de contacto.

Ruedas simuladas

Con base en la abstracción de una rueda, se desarrollaron alternativas para simular su movimiento. Las alternativas se ejemplifican en la tabla 12.
















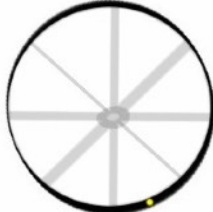




TABLA 12. Ruedas simuladas.

Imagen	Alternativa
	RS1
	RS2
	RS3
	RS4
	RS5
	RS6

Ruedas compactas

Con base en las gráficas de reducción de dimensiones, tanto de propuestas como de elementos naturales y artificiales, se generaron alternativas para compactar una rueda. En la tabla 13 se ejemplifican las alternativas.

TABLA 13. Ruedas compactas.

Imagen				Alternativa
				RC1
				RC2
				RC3
				RC4
				RC5

4.2 Modelos de funcionalidad limitada


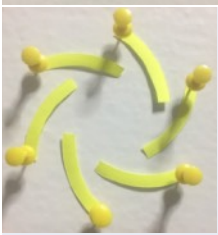

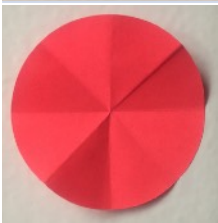
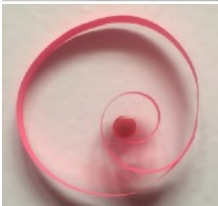
Se elaboraron modelos de funcionalidad de las alternativas de ruedas simuladas y de ruedas compactas. En la tabla 14 se muestran las alternativas de ruedas simuladas.

TABLA 14. Modelos de funcionalidad limitada de ruedas simuladas.

Imagen	Alternativa	Descripción
	RS1	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda simulada con dos segmentos de arco que siguen una trayectoria de revolución.
	RS2	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda simulada con dos segmentos de arco que siguen una trayectoria parcial de revolución.
	RS3	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda simulada con un elemento continuo en forma de segmento de arco.
	RS4	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda simulada con un toroide en forma de segmento de arco.
	RS5	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda simulada con seis segmentos de arco superpuestos.
	RS6	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda simulada con tres segmentos lineales superpuestos.

En la tabla 15 se muestran las alternativas de ruedas compactas.

TABLA 15. Modelos de funcionalidad limitada de ruedas compactas.

Imagen	Alternativa	Descripción
	RC1	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda de compactación en revolución - los elementos están anclados al eje, conservan su longitud y se van abriendo en forma de abanico.
	RC2	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda de compactación radial - los elementos están anclados a varios ejes en la periferia y se juntan en el eje central.
	RC3	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda de compactación axial - es similar a la compactación en revolución, pero los elementos pueden variar su longitud como una antena.
	RC4	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda de compactación plegable - disminuye sus dimensiones mediante dobleces.
	RC5	<ul style="list-style-type: none"> • Rueda de compactación en espiral - se desenrolla al diámetro deseado.

La propuesta RC2 disminuye sus dimensiones al quedar hueca en el centro y por lo mismo, puede ser una rueda con o sin centro. RC3 y RC5 permiten un diámetro variable.

La alternativa que más simplifica el movimiento de una rueda es la RS6 y la rueda con el mayor grado de compactación es la RC5.

5. Configuración

Para generar alternativas de solución que redujeran al máximo las dimensiones de una rueda, se combinaron alternativas de ruedas simuladas con alternativas de ruedas compactas. Posteriormente, las alternativas de solución se evaluaron respecto a diversos criterios.

Combinaciones

En total se generaron 14 alternativas de solución, ya que algunas de las combinaciones no eran factibles. RS1 y RS2 se pudieron combinar con las 5 alternativas de ruedas compactas. RS3 sólo se pudo combinar con RC5. RS4, RS5 y RS6 no se pudieron combinar con alternativas de ruedas compactas.

Las alternativas de solución resultantes fueron:

- RS1-RC1, RS1-RC2, RS1-RC3, RS1-RC4, RS1-RC5, RS2-RC1, RS2-RC2, RS2-RC3, RS2-RC4, RS2-RC5, RS3-RC5, RS4, RS5 y RS6.

Selección de alternativas de solución

Se empleó una matriz de selección para escoger las alternativas de solución. La evaluación para cada criterio fue de 0 a 5, donde 5 fue la puntuación más alta. Las 4 alternativas enmarcadas obtuvieron el puntaje más alto.

Criterios:

- Compactación - volumen mínimo ocupado. Es un criterio que conjunta la reducción de dimensiones en el Plano O y en el Plano I.
- Resistencia - rigidez estructural al aplicar una carga. Se considera que todas las alternativas están fabricadas con el mismo material.
- Manufactura - viabilidad de manufacturarse con equipos y herramientas disponibles.
- Funcionamiento - existe o se puede desarrollar la tecnología para su operación.

En la tabla 16 se enlistan las diferentes combinaciones con sus puntajes y evaluación total.

TABLA 16. Evaluación de combinaciones.

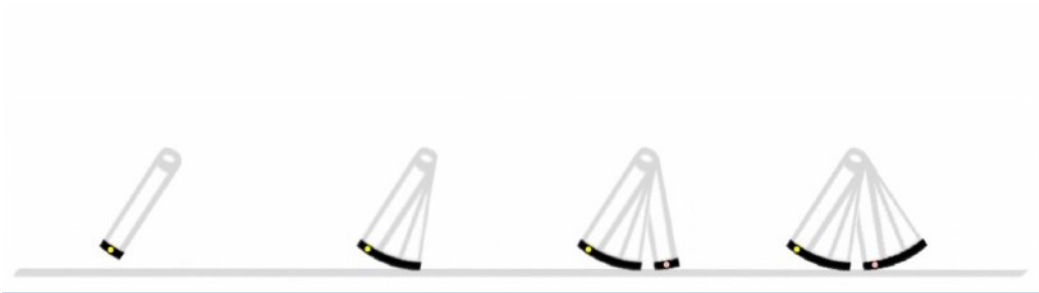

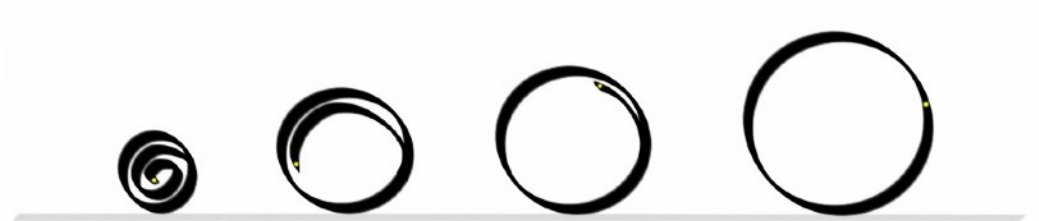
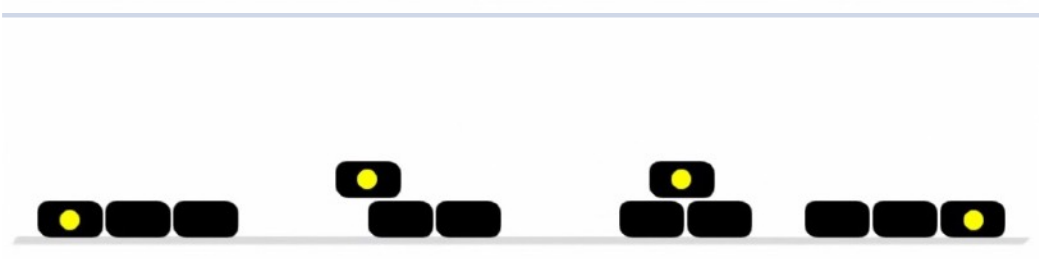
Alternativas	Compactación	Resistencia	Manufactura	Funcionamiento	Total
RS1-RC1	5	4	5	4	18
RS1-RC2	5	4	5	4	18
RS1-RC3	4	4	4	4	16
RS1-RC4	5	3	4	5	17
RS1-RC5	5	3	3	3	14
RS2-RC1	5	4	5	3	17
RS2-RC2	5	4	5	3	17
RS2-RC3	4	4	4	3	15
RS2-RC4	5	3	4	4	16
RS2-RC5	5	3	3	2	13
RS3-RC5	5	4	5	4	18
RS4	4	5	4	4	17
RS5	5	4	4	4	17
RS6	5	5	4	4	18

Las propuestas RS1-RC1, RS1-RC2, RS3-RC5 y RS6 obtuvieron un puntaje total de 18.

5.1 Alternativas de solución

En la tabla 17 se ejemplifica cómo funcionarían las alternativas de solución.


TABLA 17. Alternativas de solución.

Imagen	Alternativa
	RS1-RC1
	RS1-RC2
	RS3-RC5
	RS6

5.2 Modelos a escala

En la tabla 18 se presentan los modelos a escala que se elaboraron de las alternativas de solución.

TABLA 18. Modelos a escala.

Imagen	Alternativa	Descripción
	RS1-RC1	<ul style="list-style-type: none">• Rueda simulada mediante dos segmentos de arco cuya trayectoria y compactación es en revolución.
	RS1-RC2	<ul style="list-style-type: none">• Rueda simulada mediante dos segmentos de arco con una trayectoria en revolución que se compactan de forma radial.
	RS3-RC5	<ul style="list-style-type: none">• Rueda sin centro de diámetro variable que se compacta en forma de espiral.
	RS6	<ul style="list-style-type: none">• Rueda simulada mediante tres segmentos lineales sobrepuestos.

Las alternativas de solución RS1-RC1 y RS1-RC2 simulan el movimiento de una rueda de aproximadamente 25". La alternativa de solución RS3-RC5 simula una rueda de diámetro variable. La alternativa de solución RS6 no se pudo realizar a escala porque se desconocen las medidas que va a tener el sistema.

Comparativo de los modelos a escala con las propuestas de reducción de dimensiones

Los modelos a escala se colocaron en la gráfica de propuestas con reducción de dimensiones. Las alternativas de solución se encuentran enmarcadas en la figura 13.

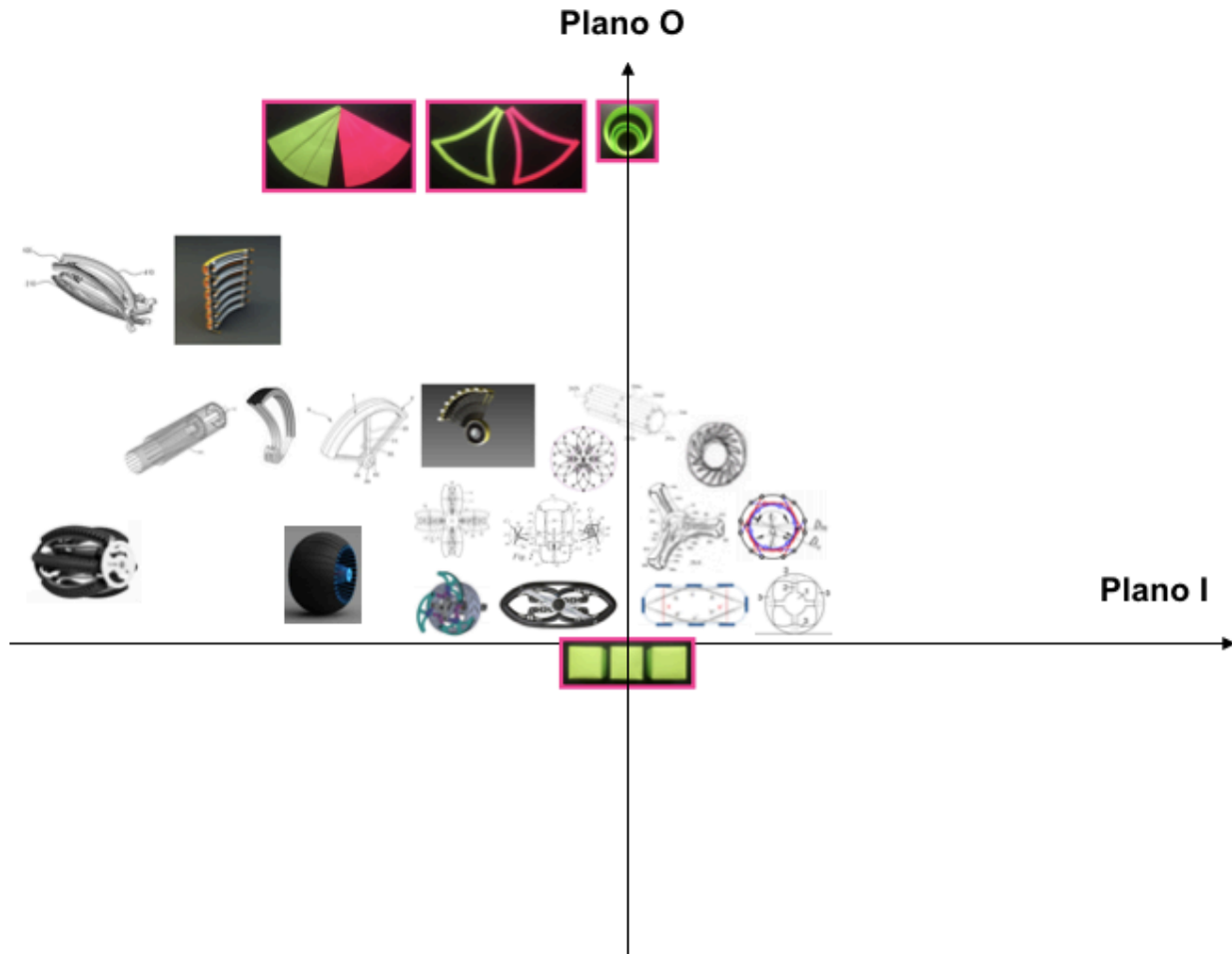


FIGURA 13. Gráfica de modelos a escala y de propuestas con reducción de dimensiones.




Las propuestas RS1-RC1, RS1-RC2 y RS3-RC5 logran una mayor reducción en el Plano O que las propuestas encontradas, sin aumentar drásticamente en el Plano I.

Aunque la propuesta RS6 no modifica sus dimensiones, podría tener menores dimensiones a las propuestas encontradas.

Selección de alternativas de solución por caso

Las alternativas de solución presentan diferente compatibilidad, por lo cual se seleccionó la mejor alternativa para cada caso. De las cuatro alternativas sólo dos presentaban la misma compatibilidad, RS1-RS2 y RS1-RC1, para una rueda con centro. Para este caso, se eligió la alternativa con el mayor grado de compactación: RS1 - RC2. En la tabla 19 se muestran los diferentes casos con sus respectivas alternativas de solución.

TABLA 19. Alternativas de solución por caso.

Imagen	Alternativa	Caso
	RS1 - RC2	Rueda con centro
	RS3 - RC5	Rueda sin centro
	RS6	Sistema nuevo

Actualmente casi todos los sistemas con ruedas emplean un eje en el centro, pero es común encontrar en diseños de vehículos conceptuales el uso de ruedas sin centro.

5.3 Subsistemas de las alternativas

Se identificaron los subsistemas necesarios para las alternativas de solución y maneras de resolverlos.

Subsistema para RS1-RC2

Subsistema de colocación

El subsistema de colocación mantiene los brazos de los segmentos de arco conectados al eje y los va sobreponiendo mediante un mecanismo de engranes magnéticos para reducir la fricción. En la figura 14 se muestra un mecanismo de engranes magnéticos equivalente a un mecanismo de engranaje planetario.

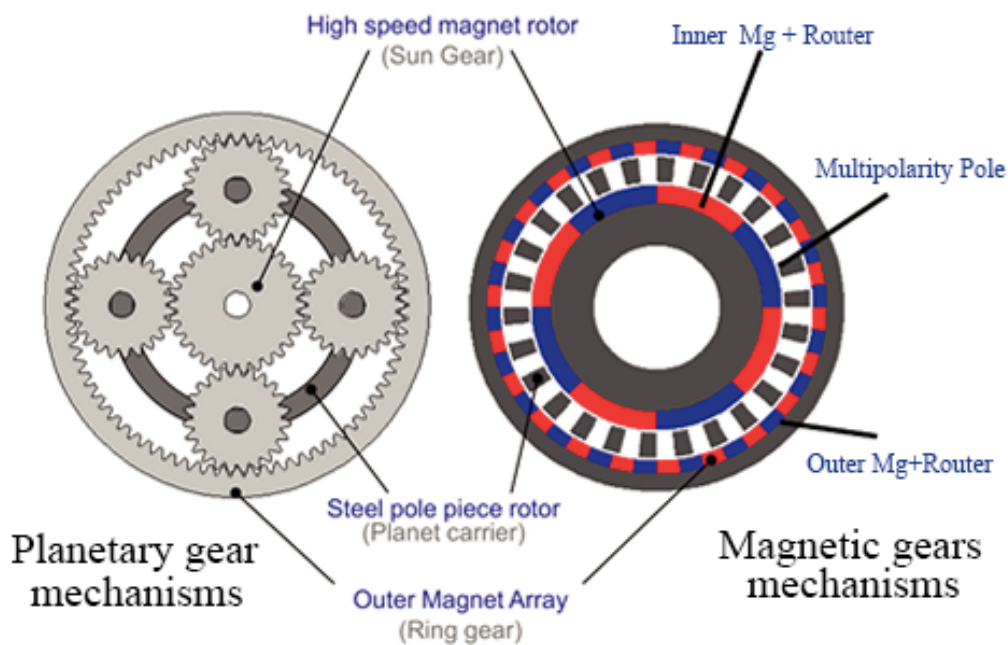


FIGURA 14. Mecanismo de engranes magnéticos. (THE PINSTA, 2018)

Debido a que se van a tener los dos segmentos de arco girando entorno al eje, esto generará vibraciones que deberán ser contrarrestadas o mitigadas.

Subsistemas para RS3-RC5

Subsistema de apertura/cierre

El subsistema de apertura/cierre permite ampliar o disminuir el diámetro de la rueda simulada mediante un material con memoria de forma como el Nitinol que se muestra en la figura 15.



FIGURA 15. Nitinol. (*Stanford Materials*)

Subsistema de anclaje

El subsistema de anclaje mantiene el diámetro de la rueda mediante una cinta magnética como la que se muestra en la figura 16.

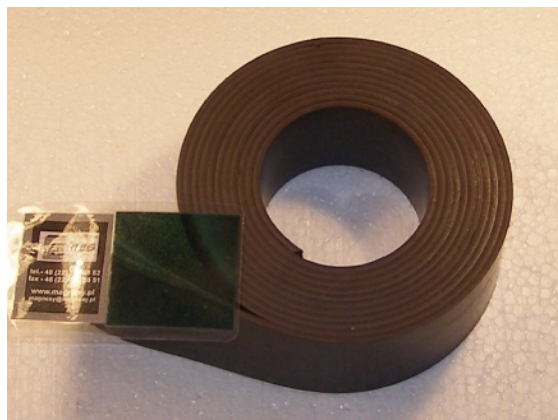


FIGURA 16. Cinta magnética. (*ENES Magnets, 2016*)

Subsistemas para RS6

Subsistema de colocación

El subsistema de colocación toma el punto A y lo pasa a la posición B mediante una cadena magnética, como se ejemplifica en la figura 17.



FIGURA 17. Subsistema de colocación.

Subsistema de carga

El subsistema de carga mantiene el punto de carga D sobre un punto de contacto C mediante repulsión magnética, como se ilustra en la figura 18.

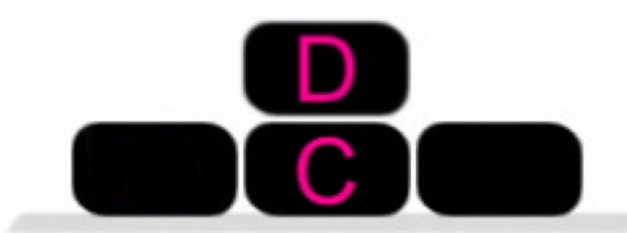


FIGURA 18. Subsistema de carga.

Selección de alternativa final

Para escoger la alternativa final se empleó una matriz de selección. La evaluación para cada criterio fue de 0 a 5, donde 5 fue la puntuación más alta. La alternativa enmarcada en la tabla 20 obtuvo el puntaje más alto.

Criterios:

- Eficiencia - facilidad para superar la fricción estática. Se considera que las alternativas de solución emplean llantas no neumáticas.
- Amortiguamiento - tiempo necesario para absorber las vibraciones después de un impacto.

TABLA 20. Evaluación de alternativas de solución.

	Eficiencia	Amortiguamiento	Total
RS1 - RC2	3	3	6
RS3 - RC5	3	3	6
RS6	5	5	10

La propuesta RS6 obtiene mejores puntajes en ambos criterios debido a la levitación magnética y al amortiguamiento magnético.

Actualmente, los únicos medios de transporte que emplean la levitación magnética son los Maglev y el Hendo Hoverboard, los cuales requieren rieles o superficies metálicas para levitar (aluminio o cobre), respectivamente. Esta propuesta abre la posibilidad de diseñar medios de transporte de levitación magnética que puedan utilizar la infraestructura existente, ya sea concreto hidráulico, asfalto, adoquín, caminos de tierra, etc.

5.4 Selección de material

Los materiales se pueden clasificar en tres categorías en función de sus propiedades magnéticas:

- Paramagnéticos
- Ferromagnéticos
- Diamagnéticos

Los principales materiales ferromagnéticos duros naturales que se pueden emplear como imanes permanentes son:

- Alnico, el cual es una mezcla de aluminio-níquel-cobalto.
- Materiales magnéticos cerámicos (ferrita dura), los cuales consisten de mezclas de estroncio y ferrita de bario.
- Samario-cobalto.
- Neodimio (neodimio, hierro y boro son los componentes principales de la mezcla con cantidades pequeñas de otros compuestos).

El alnico y los materiales de imanes permanentes de ferrita cerámica son los tipos de menor costo y tienen una fuerza magnética menor, comparados con el samario y el neodimio. El costo de los materiales de imanes permanentes aumenta a medida que el nivel de energía magnética aumenta.

La principal ventaja del samario-cobalto sobre el neodimio, es que puede operar a mayores temperaturas.

Los imanes de alnico, de cerámica y de samario son resistentes a la corrosión, en tanto que los imanes de neodimio son muy susceptibles a ella.

Los imanes de neodimio se dilatan en la dirección magnetizada y se contraen en la otras direcciones con el aumento de la temperatura.

(Cetinkunt, 2007)

Se propone emplear imanes permanentes debido a que los electroimanes requieren energía de una batería, la cual tiene un peso y volumen considerables.

Para la construcción de los prototipos, se van a utilizar imanes de ferrita y de neodimio, por su relación de costo-fuerza de magnetización y la amplia disponibilidad de tamaños.

6. Medidas de seguridad

Se proponen medidas de seguridad para minimizar las circunstancias de riesgo, tanto para usuarios como para el personal técnico, ocasionadas por el uso de imanes permanentes, principalmente de neodimio.

6.1 Escudo magnético, configuración y desprendimiento

Los campos magnéticos podrían atraer objetos metálicos que porten los usuarios, como joyería, o que tengan dentro de su cuerpo, como marcapasos, implantes metálicos y neuroestimuladores. Para evitar esta problemática, se puede emplear un escudo magnético mediante una Jaula de Faraday. Al implementar esta medida, también se impide que los imanes atraigan, o queden atraídos, a objetos metálicos que se encuentren en los alrededores.

El escudo magnético ayudaría a disminuir el contacto físico con la parte interna del sistema, pero aún existen circunstancias que se deben prever. Tal es el caso cuando se realiza mantenimiento, una reparación o en caso de un accidente. Para evitar que una parte del cuerpo quede atrapada entre dos o más imanes, los campos magnéticos van a estar colocados a manera de repulsión.

En caso de un impacto con otro medio de transporte, el sistema debe ser capaz de absorber parte de la energía, sin comprometer su rigidez estructural, y desprenderse sin afectar al usuario.

6.2 Visibilidad

La visibilidad del sistema puede reducir riesgos innecesarios, como la necesidad de desmontar piezas para realizar una inspección. Esto se puede lograr empleando materiales transparentes o translúcidos, como el acrílico empleado en la carrocería del vehículo en la figura 19. Idealmente se emplearía un metal transparente que permita la visibilidad, pero que restrinja el flujo magnético. Actualmente se realiza investigación en esta área.



FIGURA 19. Vehículo con carrocería transparente. (SAPIDMAG, 2016)

7. Construcción de los prototipos

Se construyeron dos prototipos, uno con imanes de ferrita y otro con imanes de neodimio. A continuación, se especifican los componentes, número de piezas, características de los imanes, procesos de ensamble y el principio de funcionamiento.

7.1 Prototipo 1

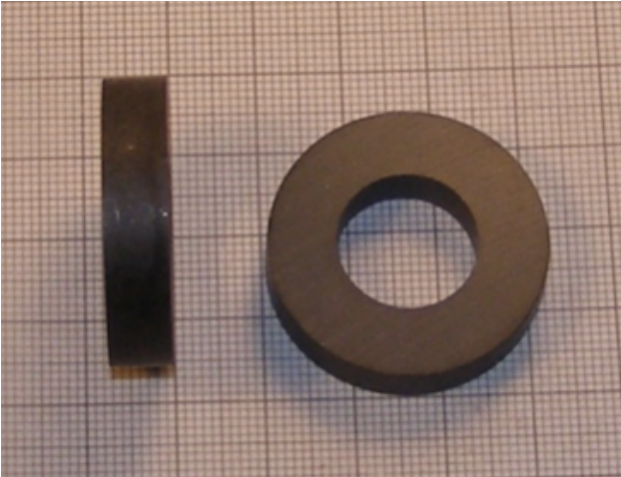
Los componentes del prototipo 1 se enlistan en la tabla 21.

TABLA 21. Componentes del prototipo 1.

Imagen	Piezas	Componente
	8	Imanes de anillo de ferrita
	6	Mallas de PEHD (Polietileno de alta densidad)
	6	Círculos de EVA (etilvinilacetato)
	2	Rectángulos de PP (polipropileno)
	1	Tubo hexagonal de PEHD (Polietileno de alta densidad)

Los imanes de ferrita tienen un menor costo y fuerza magnética. Las características de los imanes de anillo de ferrita del prototipo 1 se muestran en la tabla 22.


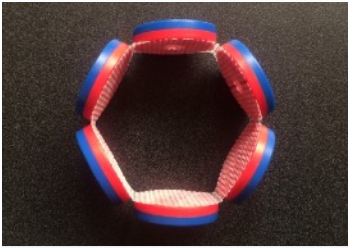


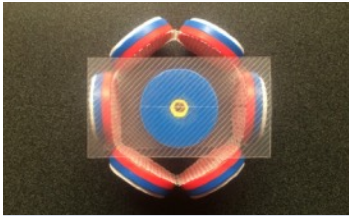
TABLA 22. Imanes de anillo de ferrita del prototipo 1.

Parámetro	Valor
Imagen	
Diámetro externo	30 mm +2.5%/-2.5%
Diámetro interno	16 mm +2.5%/-2.5%
Altura	5 mm +0.1/-0.1 mm
Dirección de magnetización	en dirección de la altura
Máxima fuerza de atracción	≈ 1.1 kg
Peso	≈ 11 g
Precio	\$0.1 EUR

(ENES Magnets, 2016)

El proceso de ensamble del prototipo 1 se describe en la tabla 23.

TABLA 23. Ensamble del prototipo 1.

Imagen	Descripción
	<p>Unión de la malla de PEHD con los imanes.</p>
	<p>Unión de los extremos.</p>
	<p>Unión de los círculos de EVA.</p>
	<p>Unión de los rectángulos de PP con dos imanes.</p>
	<p>Unión de los dos imanes con el tubo hexagonal de PEHD.</p>

La forma hexagonal facilitó el proceso de ensamble, al permitir contraponer pares de imanes.

Principio de funcionamiento del prototipo 1

El principio de funcionamiento parte del siguiente fenómeno físico:

- Los polos magnéticos opuestos se atraen y los polos magnéticos iguales se repelen.

El imán o los imanes que hacen contacto con la superficie generan una fuerza hacia arriba que contrarresta a la de la gravedad en el subsistema de carga y los demás imanes brindan estabilidad, junto con los rectángulos de PP. Debido a que se emplean medios mecánicos en conjunto con fuerzas magnéticas para levitar al subsistema de carga, se considera pseudolevitación.

La malla de PEHD mantiene unidos a los imanes y actúa como bisagra. Los círculos de EVA amortiguan los impactos de los imanes. Los rectángulos de PP y el tubo hexagonal de PEHD mantienen el subsistema de carga dentro del sistema de colocación. En la figura 20 se muestra el prototipo 1 con el subsistema de carga pseudolevitando mediante repulsión magnética.

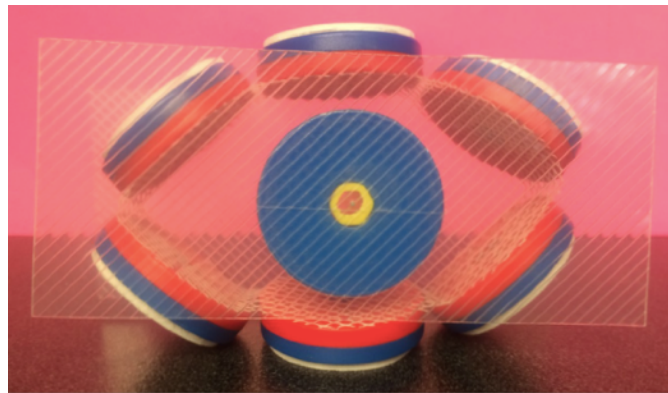


FIGURA 20. Prototipo 1.

Al mover el subsistema de carga hacia un lado o hacia el otro, se deforma el hexágono mediante fuerzas de repulsión y se genera un nuevo punto de contacto como se ejemplifica en la figura 21. Este tipo de deformación se podría lograr con un pentágono, pero quedaría en mucha proximidad o en contacto el subsistema de carga con el subsistema de colocación.










FIGURA 21. Deformación del sistema de colocación.

7.2 Prototipo 2

Los componentes del prototipo 2 se enlistan en la tabla 24.

TABLA 24. Componentes del prototipo 2.

Imagen	Piezas	Componente
	6	Imanes de bloque de neodimio
	2	Imanes de anillo de neodimio
	6	Soportes de PVC (policloruro de vinilo) espumado
	6	Mallas de PEHD (polietileno de alta densidad)
	6	Rectángulos de EVA (etilvinilacetato)
	3	Tubos de acrílico
	4	Rectángulos de acrílico

Los imanes de neodimio tienen un mayor costo y fuerza magnética. Las características de los imanes de bloque de neodimio del prototipo 2 se encuentran en la tabla 25.

TABLA 25. Imanes de bloque de neodimio del prototipo 2.

Parámetro	Valor
Imagen	
Largo	20 mm +0.1/-0.1 mm
Ancho	10 mm +0.1/-0.1 mm
Altura	5 mm +0.1/-0.1 mm
Dirección de magnetización	en dirección de la altura
Máxima fuerza de atracción	≈ 5.3 kg
Peso	≈ 7.5 g
Precio	\$0.57 EUR

(ENES Magnets, 2016)

Los imanes de anillo de neodimio se eligieron con un diámetro cercano a la longitud de los imanes de bloque de neodimio para mantener unas proporciones geométricas que eviten que los subsistemas entren en contacto. Las características de los imanes de anillo de neodimio del prototipo 2 se muestran en la tabla 26.

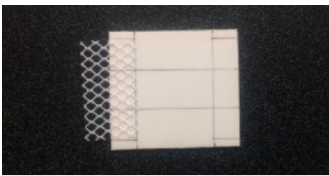
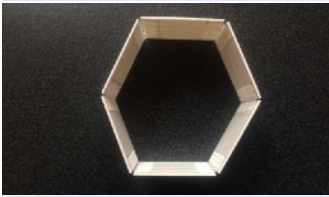
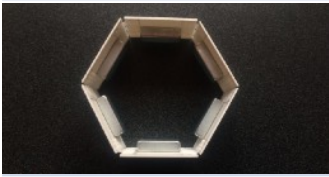
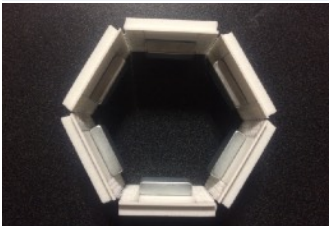

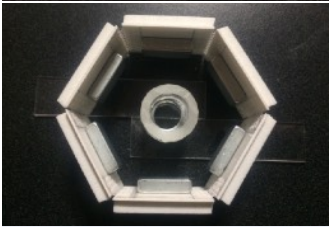
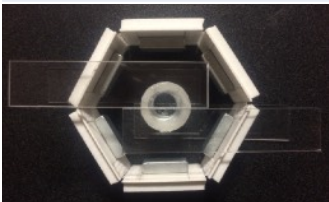
TABLA 26. Imanes de anillo de neodimio del prototipo 2.

Parámetro	Valor
Imagen	
Diámetro externo	16 mm +0.1/-0.1 mm
Diámetro interno	12 mm +0.1/-0.1 mm
Altura	2 mm +0.1/-0.1 mm
Dirección de magnetización	en dirección de la altura
Máxima fuerza de atracción	≈ 1.7 kg
Peso	≈ 1.32 g
Precio	\$0.18 EUR

(ENES Magnets, 2016)

En la tabla 27 se describe el proceso de ensamble del prototipo 2.

TABLA 27. Ensamble del prototipo 2.

Imagen	Descripción
	Unión de la malla de PEHD con los soportes de PVC espumado.
	Unión de los extremos.
	Unión de los imanes a los soportes de PVC espumado.
	Unión de los rectángulos de EVA a los soportes de PVC espumado.
	Unión de los tubos de acrílico con los imanes de anillo.
	Unión del extremo inferior del tubo de acrílico con los rectángulos de acrílico.
	Unión del extremo superior del tubo acrílico con los rectángulos de acrílico.

Principio de funcionamiento del prototipo 2

El principio de funcionamiento es similar al del prototipo 1. La malla de PEHD mantiene unidos a los soportes de PVC espumado y actúa como bisagra. Los rectángulos de EVA amortiguan los impactos de los imanes. Los rectángulos de acrílico y los tubos de acrílico mantienen el sistema de carga dentro del sistema de colocación. En la figura 22 se muestra el prototipo 2 con el subsistema de carga pseudolevitando mediante fuerzas de repulsión.

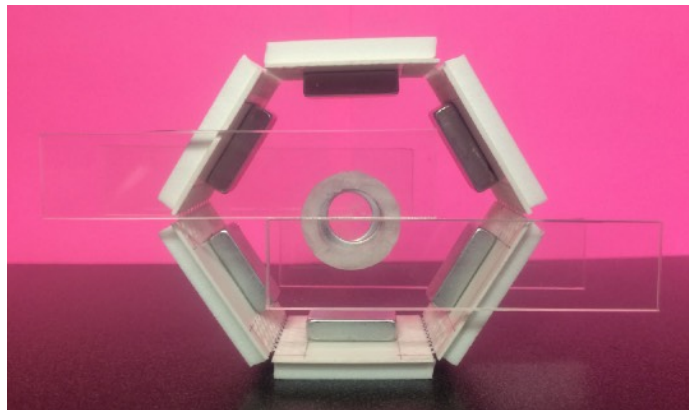


FIGURA 22. Prototipo 2.

Al mover el sistema de carga hacia un lado o hacia el otro, se deforma el hexágono mediante fuerzas de repulsión y se genera un nuevo punto de contacto.

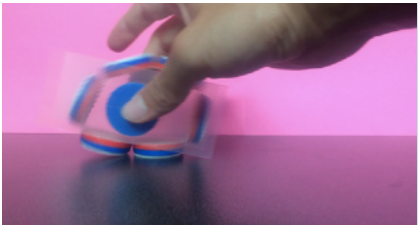
8. Pruebas de los prototipos

Las pruebas permitieron conocer las funciones que podían desempeñar los prototipos.

8.1 Prototipo 1

En la tabla 28 se especifica la prueba a la que estuvo sometido el prototipo 1.

TABLA 28. Prueba del prototipo 1.

Imagen	Prueba
	Desplazamiento sobre una superficie horizontal

El prototipo 1 no logra mantener su forma hexagonal al estar en una posición estática. Esto es debido al peso de los imanes y a los débiles campos magnéticos.

Al desplazar el prototipo en la prueba, se generaba una torsión en las bisagras de los imanes. Esto se debe a la forma circular de los imanes y a la flexibilidad del PEHD. Al desplazarse también existe un pequeño roce entre los imanes del subsistema de colocación y los rectángulos de PP, el cual se podría eliminar con un subsistema magnético que restrinja ese grado de libertad de traslación.

La principal problemática detectada es que el sistema frena el impulso hacia adelante. Esto se debe a la configuración de los imanes del subsistema de colocación. La configuración actual ayuda a que los imanes se separen y no que se junten. Alternar la polaridad de los imanes sólo invertiría la problemática. Para favorecer el movimiento, los imanes que están a ambos lados del imán que actúa como punto de contacto deben realizar acciones contrarias. Si el movimiento es hacia el lado derecho y se parte de una posición estática en forma hexagonal, el imán que está del lado izquierdo se debe separar y el imán que está del lado derecho se debe juntar.

8.2 Prototipo 2

En la tabla 29 se especifican las pruebas a las que estuvo sometido el prototipo 2.

TABLA 29. Pruebas del prototipo 2.

Imagen	Prueba
	Aplicación de una carga
	Deformación al mover el sistema de carga
	Desplazamiento sobre una superficie horizontal
	Desplazamiento sobre una superficie con pendiente
	Superación de un obstáculo
	Amortiguamiento

Este prototipo se pudo someter a más pruebas porque los dos subsistemas no entran en contacto. A diferencia del prototipo 1, el prototipo 2 logra mantener su forma hexagonal al estar en una posición estática y al aplicar una carga. También fue capaz de recuperar su forma hexagonal después de una caída. Esto es debido a un menor peso con respecto a los imanes de ferrita y a los fuertes campos magnéticos.

Al desplazar el prototipo 2 de un lado para otro, no se genera ninguna torsión entre los imanes del subsistema de colocación, como en el prototipo 1. Esto se debe a la forma rectangular de los soportes de PVC espumado.

Al colocar un nuevo punto de contacto, no hay una buena transición debido a que los imanes se encuentran muy separados de las bisagras. A pesar de esto, el prototipo 2 fue capaz de desplazarse en una superficie con pendiente y de superar un obstáculo.

Existe un pequeño roce entre los imanes del subsistema de colocación y los rectángulos de acrílico, el cual se podría eliminar con un subsistema magnético que restrinja ese grado de libertad de traslación. El sistema aún mantendría un grado de libertad de rotación en el eje, el cual se podría eliminar al conectar otro sistema en paralelo. Si se coloca otro sistema en el mismo eje, se seguiría manteniendo un grado de libertad de rotación.

Al igual que el prototipo 1, el prototipo 2 presenta la principal problemática que la configuración de los imanes del subsistema de colocación frenan el impulso hacia delante. Idealmente, se esperaría que el subsistema de carga se pudiera deslizar sobre el subsistema de colocación de manera análoga a un Maglev sobre su riel.

Al haber utilizado materiales magnéticos distintos en los dos prototipos, se lograron identificar las problemáticas que se pueden resolver con el uso de un material magnético distinto y las áreas de oportunidad que son ajenas al material magnético.

9. Diseño final

Este diseño se plantea para probar de manera teórica que es posible levitar el peso de una persona con el sistema propuesto para su uso en sillas de ruedas o bicicletas. Es necesario resolver varias complejidades del sistema, como el escudo magnético y restringir el grado de libertad de traslación en el eje, antes de realizar un prototipo a escala. Este prototipo se podría ensamblar de manera segura con imanes que aún no han sido magnetizados.

9.1 Configuración

En la tabla 30 se muestran los componentes que se emplearían para el diseño final.

TABLA 30. Componentes y número de piezas.

Piezas	Componentes
6	imanes de bloque de neodimio
2	imanes de anillo de neodimio
6	bisagras magnéticas
6	superficies de hule
2	anclajes magnéticos
6	bases de policarbonato
2	soportes de policarbonato
3	perfiles de policarbonato

Las características de los imanes de bloque de neodimio del diseño final se muestran en la tabla 31.

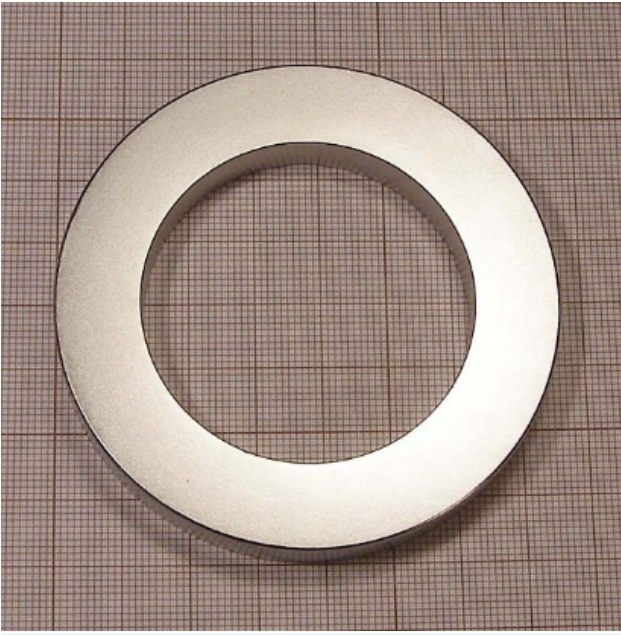
TABLA 31. Imanes de bloque de neodimio del diseño final.

Parámetro	Valor
Imagen	
Largo	80 mm +0.1/-0.1 mm
Ancho	40 mm +0.1/-0.1 mm
Altura	15 mm +0.1/-0.1 mm
Dirección de magnetización	en dirección de la altura
Máxima fuerza de atracción	≈ 90 kg
Peso	≈ 360 g
Precio	\$19.94 EUR

(ENES Magnets, 2016)

Las características de los imanes de anillo de neodimio del diseño final se presentan en la tabla 32.

TABLA 32. Imanes de anillo de neodimio del diseño final.

Parámetro	Valor
Imagen	
Diámetro externo	75 mm +0.1/-0.1 mm
Diámetro interno	49 mm +0.1/-0.1 mm
Altura	10 mm +0.1/-0.1 mm
Dirección de magnetización	en dirección de la altura
Máxima fuerza de atracción	-
Peso	≈ 190 g
Precio	\$24.88 EUR

(ENES Magnets, 2016)

Idealmente, los imanes de anillo de neodimio deberían tener una dirección de magnetización radial.

Dimensiones

La altura y el largo del sistema varían en función de la deformación. El ancho es la única dimensión que no varía y debe ser igual o mayor al ancho del imán.

Considerando una posición estática con forma hexagonal, como en la figura 23, podemos aproximar la altura y el largo del sistema de la siguiente forma:

$$H = 2h + 2l \operatorname{sen} 60^\circ$$

H: altura del sistema
h: altura del imán
l: largo del imán

$$L = 2l + 2h \operatorname{cos} 30^\circ$$

L: largo del sistema
l: largo del imán
h: altura del imán

Para realizar un cálculo preciso de las dimensiones del sistema, se necesitaría conocer el grosor del material que mantiene unidos a los imanes y el grosor de las superficies de hule.

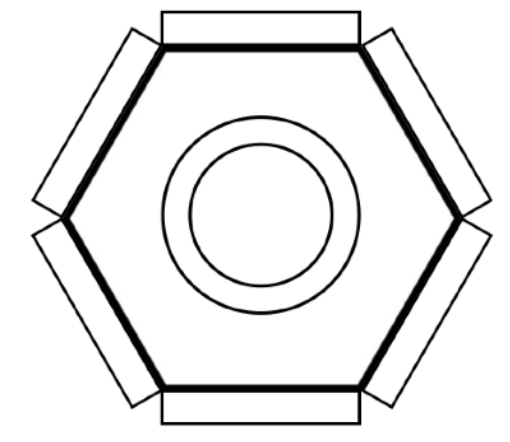


FIGURA 23. Diseño final.

Deformación

Al tratarse de una figura regular, podemos encontrar la suma de los ángulos internos mediante la siguiente expresión:

$$(n - 2) 180^\circ$$

n: número de lados

Sustituyendo 6 por n, obtenemos que la suma interna de los ángulos de un hexágono deben sumar 720° .

En una posición estática con forma hexagonal, cada ángulo interno equivale a 120° .

Cabe mencionar que los ángulos internos no pueden ser mayores a 180° debido a que entran en contacto los costados de los imanes.

Análisis

La posición, velocidad lineal y aceleración lineal están determinadas por el eje del sistema.

Se requiere proponer una configuración que no frene el impulso hacia adelante, antes de modelar el sistema.

Para analizar el movimiento del sistema, se puede partir de tener el eje centrado sobre un bloque a estar, una vez más, centrado sobre un bloque contiguo. Debido a que se trata de un polígono regular, este movimiento se repite para cada bloque.

Debido a que se trata de un sistema mecánico y magnético, se podría simplificar el modelado del sistema al realizar un modelado mecánico, considerando al sistema como un mecanismo de barras. Los imanes representarían barras con una longitud fija y el eje se conectaría a los nudos articulados mediante barras de longitud variable. Este modelado se podría corroborar realizando pruebas al diseño final.

En la tabla 33 se enlistan las especificaciones del diseño final.

TABLA 33. Especificaciones del diseño final.

Parámetro	Valor
Centro	universal
Altura	≈ 200 mm
Largo	≈ 180 mm
Ancho	≈ 40 mm
Peso	≈ 2.5 kg
Suspensión	integrada
Carga máxima	> 80 kg
Tipo de llanta	no neumática
Dibujo de la llanta	hueco
Materiales	reciclados y/o reciclables
Fabricación	aditiva
Precio por el par	≈ \$200 USD

Un factor importante del diseño del sistema, es que pueda ser fabricado con materiales reciclados y, a su vez, pueda volver a ser reciclado al final de su ciclo de vida. Por ejemplo, el dibujo hueco de la llanta puede ser impreso en 3D con polvo de caucho de neumáticos reciclados.

El peso y precio del sistema están fuertemente vinculados a los imanes de neodimio. La carga máxima no se pudo calcular debido a que el proveedor, ENES Magnets, no especifica la máxima fuerza de atracción de los imanes de anillo de neodimio.

En la tabla 34 se evalúa el cumplimiento de las especificaciones del diseño final.

TABLA 34. Cumplimiento de las especificaciones.

Parámetro	Evaluación
Centro	✓
Diámetro	no aplica
Volumen al estar compactada	no aplica
Peso	✓
Suspensión	✓
Carga máxima	> 80 kg
Tipo de llanta	✓
Dibujo de la llanta	✓
Materiales	✓
Fabricación	✓
Precio por el par	✓

Exceptuando la carga máxima que no se pudo especificar, se lograron cubrir las especificaciones planteadas para el sistema.

En la figura 24 se muestra un comparativo del diseño final con ruedas de 12 y 24”.

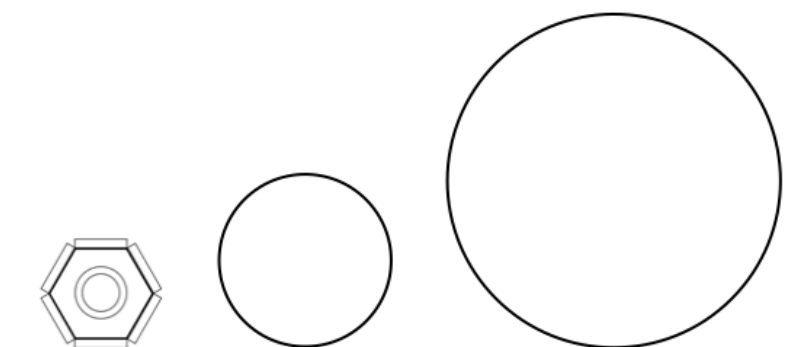


FIGURA 24. Comparativo del diseño final con ruedas de 12 y 24”.

10. Sistemas análogos y nuevos materiales

El sistema propuesto brinda una base para que se puedan explorar sistemas análogos que integren nuevos materiales.

10.1 Sistemas análogos

Para el sistema propuesto, se optó por emplear imanes permanentes porque no requieren energía eléctrica y disminúan la complejidad del sistema.

Dependiendo de la aplicación, puede resultar conveniente el uso de electroimanes o de un sistema híbrido.

Electroimanes

Los conductores portadores de corriente crean un electroimán y actúan como un imán de corriente controlada. Los electroimanes pueden generar campos magnéticos mayores a los imanes de neodimio. Su uso eliminaría la necesidad de un motor y podría generar un efecto dominó que no frene el impulso hacia delante en el subsistema de colocación mediante cambios de polaridad.

Al contar con campos magnéticos variables, se puede optimizar la energía para levitar la carga, amortiguar, inducir o frenar el movimiento. También se podrían aprovechar los campos magnéticos variables para recuperar una parte de la energía y complementarla con fuentes de energía renovables mediante paneles solares o el uso de materiales termoeléctricos y piezoeléctricos.

Al apagar el sistema, habría una disminución de sus dimensiones al entrar en contacto el subsistema de colocación con el subsistema de carga.

Para este sistema se requeriría un control de lazo cerrado, el cual toma decisiones de control en base a señales de uno o más sensores, debido a que proporciona mayor solidez en condiciones cambiantes o perturbaciones. El algoritmo debe controlar la conmutación en función del punto o puntos de contacto. La conmutación de corriente significa modificar la dirección y magnitud de la corriente en los devanados y se puede realizar por medios mecánicos o eléctricos. El objetivo de la conmutación sería producir

un par de torsión de forma eficiente al mantener los vectores de campos magnéticos de manera perpendicular.

Los electroimanes tienen la ventaja de no perder su fuerza magnética con los impactos, a diferencia de los imanes permanentes.

Ejemplo de aplicación:

- Robots móviles en centros de distribución automatizados que se pueden mover en las tres dimensiones sobre rieles metálicos.

Sistema híbrido

El sistema híbrido reduciría la cantidad de energía requerida por los electroimanes, al apoyarse en los imanes permanentes. Al requerir menor energía, se disminuiría el peso y volumen de la batería.

La posición inicial y final del eje deben estar en equilibrio con los imanes permanentes, para que no existan movimientos bruscos al apagar o encender los electroimanes. La conmutación debe funcionar de manera independiente para cada sistema híbrido por si hay pérdidas de tracción y se llegan a desfasar.

Se debe incluir un control del sistema en término de funciones. Por ejemplo, la altura del eje puede estar en función de las entradas eléctricas de los electroimanes. Al mantener una altura constante se aumenta la confortabilidad y si se tienen dos sistemas híbridos en un eje, la altura en cada uno se podría modificar para mejorar la estabilidad.

Una de las principales desventajas de la rueda es su arrastre aerodinámico, en un sistema híbrido se podría reducir el arrastre aerodinámico al deformar el hexágono para tener una menor altura. Al reducir la altura, también se estaría reduciendo el centro de masa.

Se puede tomar inspiración de deportes de invierno para crear nuevos medios de transporte con este sistema, desde el *Luge* hasta el *Skeleton*.

10.2 Nuevos materiales

El desarrollo de nuevos materiales va a permitir un menor peso del sistema, el cual se traduce en un mejor desempeño. De igual forma, se van a disminuir las dimensiones y se va a aumentar el factor de seguridad.

Nanotubos de carbono

Al emplear campos magnéticos cada vez más fuertes, se requieren materiales que tengan una mayor resistencia a la tensión. Los nanotubos de carbono son el material con la mayor resistencia a la tensión (11 - 63 GPa). (*Yu et al., 2000*)

Superconductores

El desarrollo de nuevos materiales ha permitido exhibir propiedades de un superconductor a temperaturas cada vez más cercanas a la temperatura ambiente. Actualmente se utilizan en los cables de las bobinas de electroimanes por tener una resistencia eléctrica nula y por ende, no generan pérdidas por calor.

10.3 Ventajas y áreas de oportunidad

El sistema propuesto presenta varias ventajas con respecto a una rueda y múltiples áreas de oportunidad para que pueda convertirse en un producto.

Ventajas

- Menores dimensiones - con respecto a ruedas de bicicletas plegables.
- Compatibilidad con un eje - facilidad para adaptarse a medios de transporte existentes.
- Llanta no neumática - no se poncha y tiene una menor resistencia al rodamiento.
- Levitación magnética - no hay que superar una fricción estática.
- Amortiguamiento magnético - absorbe las vibraciones.
- Escalable - permite diferentes aplicaciones: carriolas, vehículos alternativos, robots móviles, diablitos, carretillas de carga, remolques, mochilas de golf, maletas de equipaje, negocios ambulantes, etc.

Áreas de oportunidad

- Disminuir la separación entre los imanes de bloque de neodimio para mejorar la deformación del hexágono. Al momento de pasar el subsistema de carga de un bloque a otro, los dos bloques deben estar paralelos a la superficie.
- Mejorar la confortabilidad, al mantener una misma altura en el subsistema de carga. Esto se puede resolver mediante el uso de electroimanes.
- Reducir la fricción entre los soportes del eje y el subsistema de colocación mediante el uso de anclajes magnéticos. Al colocar esta medida, el sistema de carga dejaría de estar pseudolevitando y estaría levitando propiamente.
- Reducir riesgos asociados al utilizar imanes mediante técnicas o el uso de equipo especializado. Existen adhesivos de 3M para fijar imanes.
- Agilizar el ensamble mediante el uso de plantillas e imanes no magnetizados. Se pueden magnetizar los imanes al final del proceso de ensamble.
- Minimizar los impactos sobre los imanes mediante materiales no newtonianos como el D3O. Los imanes van perdiendo su fuerza magnética con los impactos.
- Impresión 3D de imanes de neodimio. Actualmente se une el polvo del imán de manera sinterizada o aglutinada con un polímero.
- Modelar el sistema como un mecanismo de barras y corroborar con un prototipo físico.
- A diferencia de una rueda que puede hacer desplazamientos muy pequeños, el desplazamiento mínimo del sistema se encuentra en función de la longitud de los lados del hexágono.
- Desarrollar subsistemas de colocación que generen un efecto dominó mediante campos magnéticos y la gravedad para no frenar el impulso hacia delante. Se puede

aprovechar la diferencia de un 5 a 10% entre las fuerzas magnéticas de atracción y de repulsión de los imanes permanentes.

- Desarrollar un escudo magnético que se pueda acoplar a la forma cambiante del sistema y no obstruya la visibilidad del mismo. Se podría emplear un metal transparente.
- Desarrollar un adaptador para que el sistema sea compatible con sillas de ruedas y bicicletas convencionales. Este adaptador cambiaría el eje a una menor altura.
- Calcular el peso de la carga mediante la altura del eje. Se puede utilizar la distancia al suelo como referencia.
- Aplicar el principio de funcionamiento del sistema a una esfera. Esto permitiría un movimiento omnidireccional.
- Desarrollar un sistema que reduzca el arrastre aerodinámico sin necesidad de viajar en un tubo al vacío. Se podría utilizar un principio similar al de la pintura electrostática, pero buscando el objetivo opuesto. La idea es que la superficie de contacto repela a las partículas del aire. La clave está en ionizar las partículas del aire antes de que entren en contacto con la superficie.
- Desarrollar un sistema análogo que utilice el principio de funcionamiento de la Hendo Hoverboard. El sistema de colocación constaría de placas cobre, en lugar de imanes permanentes, y se inducirían corrientes de Eddy para generar la repulsión.
- Integrar un sistema de propulsión con electroimanes. Al aumentar las fuerzas magnéticas de repulsión de un lado, se propiciaría el movimiento hacia el lado opuesto.
- Realizar las pruebas de funcionamiento con una película de visualización magnética. Esto permitiría visualizar el comportamiento de los campos magnéticos para realizar mejoras en la configuración.
- Posibilidad de girar el sistema para tomar una curva. Los dos prototipos sólo pueden desplazarse en línea recta.

10.4 Conocimiento adquirido y generado

El conocimiento es el esqueleto de un trabajo de investigación y desarrollo. Es importante reconocer el conocimiento que fue adquirido y generado para el desarrollo de este proyecto.

Conocimiento adquirido

- Las llantas no neumáticas eliminan la necesidad de revisar la presión de las ruedas, inflar las ruedas, cargar con una rueda de refacción y al mantener su forma constante, disminuyen la resistencia al rodamiento.
- Una recta es un segmento de arco de una circunferencia con diámetro infinito. El sistema simula el movimiento de una rueda con diámetro infinito.
- Al emplear la levitación magnética, se integra un sistema de amortiguamiento magnético y no hay fricción estática que se deba superar para iniciar el movimiento.
- Al colocarse los bloques de forma vertical, no generan fricción con el suelo y por ende, la superficie de contacto tiene mayor durabilidad.
- Las principales limitantes de los sistemas magnéticos son el costo y la seguridad.
- La fuerza de atracción en un imán permanente es de un 5 a 10% mayor a la fuerza de repulsión. Esto se debe a una mejor alineación de los imanes moleculares al estar atrayéndose.
- Cuando los dos vectores de campos magnéticos son perpendiculares, se genera un par de torsión máxima por corriente unitaria.
- La generación de par de torsión, el proceso de conversión de la energía eléctrica en energía mecánica, en cualquier motor eléctrico se puede considerar como el resultado de la interacción de dos vectores de densidad de flujo magnético: uno generado por el estator y otro generado por el rotor.
- En el futuro, ya no existirán sillas de ruedas gracias al uso de exoesqueletos controlados por impulsos nerviosos. Es necesario integrar el aprendizaje de máquina al uso de exoesqueletos para personalizar los movimientos.

Conocimiento generado

- Comparativo de las principales propuestas con reducción de dimensiones, con suspensión integrada y con pedaleo asistido.
- Mecanismos naturales y artificiales más eficientes para reducir dimensiones. El mecanismo natural más eficiente es enrollarse en espiral. El mecanismo artificial más eficaz es utilizar dobleces.
- Propuestas para simular el movimiento de una rueda mediante un elemento continuo, segmentos de arco sobrepuestos o segmentos lineales sobrepuestos.

- Propuestas para compactar una rueda de forma radial, axial, mediante dobleces, en revolución y en espiral.
- Alternativas de solución para una rueda con centro y una rueda sin centro. Se propusieron materiales o tecnologías para resolver sus subsistemas.
- Sistema de levitación magnética que no requiere rieles o una superficie metálica. Coloca de forma continua imanes en su camino.
- Al tener la carga sobre uno o dos puntos de contacto, se pueden deformar los demás elementos del subsistema de colocación para generar el próximo punto de contacto.
- Planteamiento teórico de sistemas análogos con electroimanes. Los electroimanes permitirían resolver algunas de las áreas de oportunidad.

Conclusiones

- Se diseñó un sistema de levitación magnética portátil para un transporte personal de baja velocidad. Esta propuesta cambia la naturaleza del problema de las ruedas portátiles, de disminuir las dimensiones de manera geométrica ha emplear imanes o electroimanes más pequeños y potentes.
- Se superaron las especificaciones técnicas de una rueda que disminuye sus dimensiones, la Morph Wheel, pero no se logró igualar el desempeño de una rueda. Se planteó el uso de electroimanes para mantener el impulso hacia adelante.
- La propuesta facilita guardar o almacenar un vehículo plegable porque tiene menores dimensiones, comparada con ruedas de bicicletas plegables. Las ruedas de bicicletas plegables tienen un diámetro de 12 ó 14" y el sistema tiene aproximadamente 8" de altura.
- Se generaron beneficios adicionales mediante el amortiguamiento magnético, la llanta no neumática y el pedaleo asistido en el caso de los electroimanes.
- Se plantea una solución para una problemática social que va más allá de los vehículos plegables. El sistema planteado sirve de base para el desarrollo de propuestas de levitación magnética que no requieren rieles o estar sobre una superficie metálica. El sistema puede ser empleado en infraestructura existente y en diferentes medios móviles, al ser escalable y contar con un eje.
- Se contribuyó a la generación de conocimiento en el ámbito de la ingeniería para resolver la portabilidad de las ruedas. Actualmente sólo se ha explorado la posibilidad de reducir las dimensiones de las ruedas de forma geométrica. En el presente trabajo se propusieron diferentes maneras de simular el movimiento de una rueda y de combinar propuestas de reducción de dimensiones con propuestas que simulan el movimiento de una rueda para reducir al máximo el volumen y peso.
- Se aplicaron conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecatrónica a lo largo de todo este trabajo. Desde identificar la problemática, hasta proponer sistemas análogos.

Referencias

- Amazon, (2018). *Antena telescópica*. [en línea] Disponible en: https://www.amazon.es/Antena-telescopica-TOOGOO-secciones-Longitud/dp/B01EL3BB54/ref=sr_1_1/262-2961114-7122264?ie=UTF8&qid=1525367222&sr=8-1&keywords=antenas+para+radio+fm [Consultado 6 Jun. 2018]
- Amazon, (2018). *Tcisa Windshield Sunshade*. [en línea] Disponible en: <https://www.amazon.com/Windshield-Sunshade-Jumbo-Inches-Protection/dp/B06XZWL8Q4> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Folds allow efficient leaf deployment*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/folds-allow-efficient-leaf-deployment/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Proboscis unwinds*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/proboscis-unwinds/#.WudgotPwZwc> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Rolling into a ball for protection*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/rolling-into-a-ball-for-protection/#.WudeM9PwZwc> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Leaves have elasticity shape memory*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/leaves-have-elasticity-shape-memory/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *DNA densely packed without knots*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/dna-densely-packed-without-knots/#.WudiTdPwZwc> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Skin aids movement*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/skin-aids-movement/#.WudlJdPwZwc> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Fangs fold for storage*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/fangs-fold-for-storage/#.Wufme9PwYQw> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Leaves resist gravitational loading*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/leaves-resist-gravitational-loading/#.WufoStPwYQw> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Stretched leaves power rapid closure*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/stretched-leaves-power-rapid-closure/#.WufrFNPwYQw> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2016). *Wings are deployable*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/wings-are-deployable/#.WuftS9PwYQw> [Consultado 6 Jun. 2018]
- AskNature, (2017). *Leaves fold in response to touch*. [en línea] Disponible en: <https://asknature.org/strategy/leaves-fold-in-response-to-touch/#.WudjYdPwZwc> [Consultado 6 Jun. 2018]

- AskNature, (2018). *Modify size/shape/mass/volume*. [en línea] Disponible en: https://asknature.org/?s=&page=0&hFR%5Btaxonomies_hierarchical.function.lv10%5D%5B0%5D=Modify%20%3E%20Modify%20physical%20state%20%3E%20Modify%20size%2Fshape%2Fmass%2Fvolume&is_v=1#.WxghGVZKhwc [Consultado 6 Jun. 2018]
- Benotto, (2018). *Brazalete Reflejante de Seguridad*. [en línea] Disponible en: <http://tienda.benotto.com/Brazalete-Reflejante-de-Seguridad-JY-1006-ASIA/56560.html> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Bridgestone, (2017). *Air Free Concept*. [en línea] Disponible en: https://www.bridgestone.com/technology_innovation/air_free_concept/ [Consultado 5 Jun. 2018]
- Brompton, (2019). *Brompton Bikes*. [en línea] Disponible en: <https://www.brompton.com/> [Consultado 11 Ene. 2019]
- Cetinkunt, (2007). *Mechatronics*. [en línea] Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/211065176/mechatronics-by-sabri-cetinkunt-pdf> [Consultado 13 Ene. 2019]
- Collapsible Bicycle Concept, (2018). Tuvie, [en línea]. Disponible en: <http://www.tuvie.com/collapsible-bicycle-concept-by-blair-hasty/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Cro-Raos, (2018). *Folding Bike Wheel*. [en línea] Disponible en: <https://cro-raos.deviantart.com/art/Folding-bike-wheel-329952280> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Cummings, A. (1964). *Foldable structure*. US3348352A.
- Cyber Sciences, (2016). *13 Canadian Innovations that have contributed to a better quality of life*. [en línea] Disponible en: <http://www.cybersciences.com/13-canadian-innovations-that-have-contributed-to-a-better-quality-of-life/> [Consultado 11 Ene. 2019]
- De Blois, A. (2015). *Todo lo que necesitas saber sobre la apertura del diafragma*. Blog del Fotógrafo, [en línea]. Disponible en: <https://www.blogdelfotografo.com/apertura-diafragma/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- ENES Magnets, (2016). *Ferrite Magnet*. [en línea] Disponible en: <http://www.enesmagnets.pl/gb/d30-x-d16-x-5--f30---ferrite-magnet-t-2615.html> [Consultado 6 Jun. 2018]
- ENES Magnets. (2016). *Magnetic Stripe*. [image] Disponible en: <http://www.enesmagnets.pl/gb/magnetic-stripe-50-x-3-bipolar-t-18.html> [Consultado 6 Jun. 2018]
- ENES Magnets, (2016). *Neodymium Block Magnet N38*. [en línea] Disponible en: [http://www.enesmagnets.pl/gb/80-x-40-x-15--n38---ndfeb-\(neodymium\)-magnet-t-1582.html](http://www.enesmagnets.pl/gb/80-x-40-x-15--n38---ndfeb-(neodymium)-magnet-t-1582.html) [Consultado 6 Jun. 2018]
- ENES Magnets, (2016). *Neodymium Block Magnet N38H*. [en línea] Disponible en: [http://www.enesmagnets.pl/gb/20-x-10-x-5--n38h---ndfeb-\(neodymium\)-magnet-t-608.html](http://www.enesmagnets.pl/gb/20-x-10-x-5--n38h---ndfeb-(neodymium)-magnet-t-608.html) [Consultado 6 Jun. 2018]
- ENES Magnets, (2016). *Neodymium Ring Magnet N38*. [en línea] Disponible en: [http://www.enesmagnets.pl/gb/d16-x-d12-x-2--n38---ndfeb-\(neodymium\)-magnet-t-8316.html](http://www.enesmagnets.pl/gb/d16-x-d12-x-2--n38---ndfeb-(neodymium)-magnet-t-8316.html) [Consultado 6 Jun. 2018]
- ENES Magnets, (2016). *Neodymium Ring Magnet N42*. [en línea] Disponible en: [http://www.enesmagnets.pl/gb/d75-x-d49-x-10--n42---ndfeb-\(neodymium\)-magnet-t-3497.html](http://www.enesmagnets.pl/gb/d75-x-d49-x-10--n42---ndfeb-(neodymium)-magnet-t-3497.html) [Consultado 6 Jun. 2018]

- Faragalli, M., Pasini, D. y Radziszewski, P. (2011). *MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF A SEGMENTED LUNAR WHEEL CONCEPT*. ASME, [en línea]. Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1115/detc2011-47946> [Consultado 6 Jun. 2018]
- GeoOrbital, (2017). *The GeoOrbital electric bike wheel*. [en línea] Disponible en: <https://www.geoo.com/> [Consultado 12 Ene. 2019]
- Goodyear, (2015). *BH03*. [en línea] Disponible en: <https://corporate.goodyear.com/en-US/media/news/Goodyear-Concept-Tires-Offer-a-Glimpse-of-the-Future-1426100308105.html> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Goodyear, (2017). *Eagle 360*. [en línea] Disponible en: <http://news.goodyear.eu/latest-news/goodyear-unveils-the-eagle-360-urban--a-concept-tire-powered-by-artificial-intelligence/s/9da0b0a2-1bf6-4e98-91a4-26430db82749> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Goodyear, (2018). *Oxygene*. [en línea] Disponible en: <http://news.goodyear.eu/latest-news/goodyear-unveils-oxygene--a-concept-tire-designed-to-support-cleaner-and-more-convenient-urban-mobil/s/1258a5a0-827c-4e41-9c98-f42d688c63ae> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Hankook, (2012). *Design Innovation*. [en línea] Disponible en: <https://m.hankooktire.com/us/technology/design-project/design-innovation.html#2012> [Consultado 12 Ene. 2019]
- Hankook, (2014). *Design Innovation*. [en línea] Disponible en: <https://www.hankooktire.com/global/tires-services/technology/design-innovation/collaboration/2014.html> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Hankook, (2016). *Design Innovation*. [en línea] Disponible en: <https://www.hankooktire.com/global/tires-services/technology/design-innovation/collaboration/2016.html> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Hoberman, (2003). *Main*. [en línea] Disponible en: <http://www.hoberman.com/fold/main/index.htm> [Consultado 6 Jun. 2018]
- iDSA, (2018). *International Design Excellence Awards*. [en línea] Disponible en: <http://www.idsa.org/IDEA> [Consultado 5 Jun. 2018]
- iF DESIGN AWARD, (2018). *WORLD DESIGN GUIDE*. [en línea] Disponible en: <https://ifworlddesignguide.com/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Interaction Design Foundation, (2018). *5 Stages in the Design Thinking Process*. [en línea] Disponible en: <https://www.interaction-design.org/literature/article/5-stages-in-the-design-thinking-process> [Consultado 9 Ene. 2019]
- Jacquelot, B. (2016). *Foldable Wheel*. US20170232789A1.
- Jin-gyu, K., Du-man, K. y serom, U. (2011). *The folding type bicycle's wheel*. KR20120096761A.
- Koh, J., Lee, D. y Cho, K. (2012). *Design of the Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator for the Soft Deformable Wheel Robot*. URAI, [en línea]. Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1109/urai.2012.6463107> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Kyung-soo, P. (2014). *Foldable Wheel, Bicycle and Wheelchair Having the Same*. KR101643938B1.
- La Fiesta de Olivia, (2018). *Abanico papel de seda troquelado negro*. [en línea] Disponible en: <https://lafiestadeolivia.com/products/abanico-papel-de-seda-troquelado-negro> [Consultado 6 Jun. 2018]

- Loopwheels, (2018). *REINVENTING THE WHEEL FOR A SMOOTHER RIDE*. [en línea] Disponible en: <https://www.loopwheels.com/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Mendes, D. (2009). *Eco 7 Bicycle Folds to Fit Within a Suitcase*. inhabitat, [en línea]. Disponible en: <https://inhabitat.com/eco-7-folding-bike-fits-within-a-suitcase/eco7-ed03/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Michelin, (2017). *Visionary Concept*. [en línea] Disponible en: <https://www.michelin.com/eng/media-room/press-and-news/michelin-news/Innovation/MICHELIN-Visionary-Concept> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Michelin, (2018). *Tweel*. [en línea] Disponible en: <https://www.michelintweel.com/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- MIT. *THE COPENHAGEN WHEEL*. [en línea] Disponible en: <http://senseable.mit.edu/copenhagenwheel/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Mostyn, V., Krys, V., Kot, T., Bobovsky, Z. y Novak, P. (2018). *The synthesis of a segmented stair-climbing wheel*. International Journal of Advanced Robotic Systems, [en línea]. Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1177/1729881417749470> [Consultado 6 Jun. 2018]
- NASA. *Superelastic Tire*. [en línea] Disponible en: <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-99> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Next Visionaries, (2017). *About*. [en línea] Disponible en: <https://nextvisionaries.com/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- NHTSA. *Air Bags*. [en línea] Disponible en: <https://www.nhtsa.gov/equipment/air-bags> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Noe, R. (2013). *'Roadless': Ackeem Ngwenya's Amazing All-Terrain Shape-Shifting Wheel Design*. Core77, [en línea]. Disponible en: <http://www.core77.com/posts/25800/roadless-ackeem-ngwenyas-amazing-all-terrain-shape-shifting-wheel-design-25800> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Red Dot Award, (2018). *Design Concept*. [en línea] Disponible en: <http://www.red-dot.sg/en/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- SAPIDMAG. (2016). *The Transparent Car*. [image] Disponible en: <http://www.sapidmag.com/science/the-transparent-car/85> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Seung-young, K. y Nam, K. (2012). *Foldable wheel*. WO2014021480A1.
- Sheu, D. y Lee, S. (2010). *Foldable Wheel*. US20120032497A1.
- Sheu, D. (2013). *Spoke reorientable foldable wheel*. US20150061353A1.
- Singularity University, (2018). *Ideation Workshops*. [en línea] Disponible en: <https://su.org/programs/ideation-workshops/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Smale, W. (2013). Brompton boss: the bike-maker who disproved the doubters. *BBC*, [en línea]. Disponible en: <http://www.bbc.com/news/business-23239764> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Softwheel, (2018). *The Wheel Reinvented*. [en línea] Disponible en: <http://softwheel.technology/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Stanford Materials. *Nitinol Foil*. [image] Disponible en: <http://www.stanfordmaterials.com/nitinol-foil.html> [Consultado 6 Jun. 2018]
- TED. (2008). *The math and magic of origami*. [video] Disponible en: https://www.ted.com/talks/robert_lang_folds_way_new_origami [Consultado 6 Jun. 2018]

- The Home Depot, (2018). *Abrazadera Everbilt*. [en línea] Disponible en: <http://www.homedepot.com.mx/comprar/es/coapa-del-hueso/abrazadera-everbilt-acero-inoxidable-1-a-2> [Consultado 6 Jun. 2018]
- THE PINSTA. (2018). *Simple Gear Mechanisms*. [image] Disponible en: http://www.thepinsta.com/simple-gear-mechanisms_E5H6Z4xP3CK2VUaTU5dNLcGs2K8OWMhan1LnGI7VPbY/ [Consultado 6 Jun. 2018]
- Revolve Wheel, (2017). *Home*. [en línea] Disponible en: <https://www.revolve-wheel.com/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- The Morph Wheel, (2014). TTI Mobility, [en línea]. Disponible en: <http://ttimob.com/2014/05/the-morph-wheel/> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Wenhua, C., Qiuhong, W., Ming, H., Jun, P. y Changzu, C. (2010). *Design & Analysis for The Configuration of A Radially Foldable Wheel*. IEEE, [en línea]. Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1109/icma.2010.5588634> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Wheelchair Foundation, (2017). *Wheelchair Needs In The World*. [en línea] Disponible en: <https://www.wheelchairfoundation.org/programs/from-the-heart-schools-program/materials-and-supplies/analysis-of-wheelchair-need/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Worldometers, (2005). *Bicycles produced*. [en línea] Disponible en: <http://www.worldometers.info/bicycles/> [Consultado 5 Jun. 2018]
- Yu, M., Lourie, O., Dyer, M., Moloni, K., Kelly, T. y Ruoff, R. (2000). *Strength and Breaking Mechanism of Multiwalled Carbon Nanotubes Under Tensile Load*. Science, [en línea] 287(5453), pp. 637-640. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/287/5453/637> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Zapals, (2018). *Xiaomi Automatic Foldable Umbrella UV Protection*. [en línea] Disponible en: <https://www.zapals.com/xiaomi-waterproof-automatic-foldable-umbrella.html> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Zeng, W., Gao, F., Jiang, H., Huang, C., Liu, J. y Li, H. *Design and analysis of a compliant variable-diameter mechanism used in variable-diameter wheels for lunar rover*. Elsevier, [en línea]. Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1016/j.mechmachtheory.2018.03.003> [Consultado 6 Jun. 2018]
- Zheng, L., Zhang, P., Hu, Y., Yu, G., Song, Z. y Zhang, J. (2011). *A Novel High Adaptability Out-door Mobile Robot with Diameter-variable Wheels*. IEEE, [en línea]. Disponible en: <http://sci-hub.tw/10.1109/icinfa.2011.5948982> [Consultado 6 Jun. 2018]