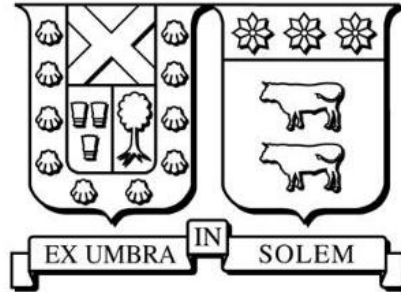


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA  
INGENIERÍA EN DISEÑO DE PRODUCTOS  
[SANTIAGO] – CHILE



Viabilidad de lastre modular mediante experimento exploratorio.

[Esteban Andrés Guzmán Quezada]  
MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO/A EN DISEÑO DE PRODUCTOS  
Profesor GUÍA - [Dr. Roberto Duran]  
[05 – 2026]



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Viabilidad de lastre modular mediante experimento exploratorio.

**Nombre del candidato(a):** Esteban Andrés Guzmán Quezada

**Carrera / Grado:** Ingeniería en Diseño de Productos

**Campus:** San Joaquin **Departamento:** IDP

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Roberto Alejandro Durán Novoa, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 04-05-2026

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 04-05-2026

**Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de este trabajo marca el cierre de una importante etapa académica, la cual no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas. Por ello, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todos quienes me acompañaron, orientaron y motivaron durante este proceso.

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía, Dr. Roberto Duran, que fue un apoyo incondicional a lo largo del desarrollo de esta memoria y orientador en momentos de creatividad al resolver problemas emergentes.

Asimismo, agradezco a la Universidad Técnica Federico Santa María, que me brindo la oportunidad de desarrollar mis estudios a lo largo de la carrera, proporcionando herramientas, instalaciones y diferentes recursos para mi desarrollo académico.

También quisiera agradecer a otras personas que colaboraron: el apoyo académico Marcelo Lamilla, la profesora Natalia Burgos y el profesor Leonardo Madariaga quienes me ayudaron en el desarrollo de esta Memoria.

Finalmente agradecer a mi familia y amigos que con su aliento constante y apoyo incondicional ayudaron a sacar esta memoria adelante.

## RESUMEN

En este trabajo de titulación de Ingeniería en Diseño de Productos, se presenta una investigación enfocada en la validación de la tecnología *StabiliTyre*, la cual busca mejorar la estabilidad de vehículos de gran altura al suelo y estructura elevada mediante un lastre interno dinámico incorporado en el interior de sus ruedas. El objetivo principal/específico fue validar el efecto de esta solución mediante un experimento exploratorio que permitiera observar sus efectos en la reducción del centro de gravedad.

Se utilizó como metodología de trabajo el modelo FBS (Function-Behaviour-Structure), el cual guio el proceso de diseño y análisis del sistema propuesto. Se construyó un modelo a escala 1:16 que replicó el funcionamiento del sistema en un entorno controlado, específicamente en una pista peraltada.

Los resultados obtenidos mostraron un cambio en el comportamiento dinámico del vehículo al reducir su centro de gravedad, logrando una mayor estabilidad al enfrentar pendientes. Además, se analizaron las diferencias entre un vehículo con el sistema *Stabilityre*, sin este y con el sistema popular en el mercado actual, demostrando el potencial del diseño para futuras aplicaciones.

Este trabajo entrega una primera validación experimental del sistema *StabiliTyre*, aportando al desarrollo de soluciones enfocadas en la seguridad y el diseño funcional de maquinaria de trabajo pesado.

**Palabras clave:** estabilidad vehicular, centro de gravedad, lastre dinámico, *StabiliTyre*

.

## ABSTRACT

This thesis in Product Design Engineering presents research focused on validating StabiliTyre technology, which aims to improve the stability of high-riding, elevated vehicles by incorporating dynamic internal ballast inside their wheels. The main/specific objective was to validate the effect of this solution through an exploratory experiment that allowed observation of its impact on reducing the center of gravity.

The Function-Behavior-Structure (FBS) model was used as the methodology, guiding the design and analysis process of the proposed system. A 1:16 scale model was built to replicate the system's operation in a controlled environment, specifically on a banked track.

The results obtained showed a change in the vehicle's dynamic behavior by reducing its center of gravity, achieving greater stability when facing inclines. Furthermore, the differences between a vehicle with the StabiliTyre system, one without it, and one with a system currently available on the market were analyzed, demonstrating the design's potential for future applications. This work provides the first experimental validation

of the StabiliTyre system, contributing to the development of solutions focused on the safety and functional design of heavy machinery.

Keywords: vehicle stability, center of gravity, dynamic ballast, StabiliTyre

## GLOSARIO

Términos técnicos utilizados:

1. **Centro de gravedad:** Punto donde se concentra el peso de un cuerpo. Su ubicación afecta directamente la estabilidad del vehículo.
2. **Lastre dinámico:** Sistema de peso móvil incorporado en una estructura que se adapta a las condiciones dinámicas del movimiento para mejorar la estabilidad.
3. **StabiliTyre:** Tecnología desarrollada en esta investigación que consiste en un lastre dinámico instalado dentro de las ruedas, diseñado para reducir el centro de gravedad en vehículos de gran tamaño.
4. **FBS (Function-Behaviour-Structure):** Modelo metodológico de diseño que permite estructurar el desarrollo de productos según su función, comportamiento y estructura.
5. **Experimento exploratorio:** Proceso práctico destinado a obtener datos preliminares y observaciones que permiten validar una hipótesis o concepto de diseño sin requerir

resultados definitivos.

6. **Vehículos de alto tonelaje:** Maquinaria pesada, como tractores o camiones, que debido a su peso y altura presenta mayores riesgos de volcamiento.
7. **Pista peraltada:** Circuito de prueba con curvas inclinadas que permite evaluar la respuesta dinámica de un vehículo ante fuerzas laterales.
8. **Prototipo a escala:** Modelo reducido de un producto o sistema que permite estudiar su comportamiento físico o funcional en condiciones similares a las reales.
9. **Volcamiento vehicular:** Pérdida de estabilidad de un vehículo que resulta en su inclinación o giro total. Es uno de los principales riesgos en vehículos de gran altura o con mala distribución de peso.
10. **Plano de sustentación:** Superficie teórica que representa el apoyo del vehículo sobre el suelo. La relación entre este plano y el centro de gravedad influye en la estabilidad.
11. **Diseño funcional:** Enfoque que prioriza la utilidad y el desempeño del producto en su contexto de uso, por sobre su forma o estética.
12. **Comparación experimental:** Método que permite evaluar el rendimiento de un sistema nuevo frente a uno tradicional, mediante condiciones de prueba controladas.
13. **Estabilidad vehicular:** Capacidad de un vehículo para mantener el control y evitar el volcamiento durante maniobras, especialmente en curvas, pendientes o terrenos irregulares.
14. **Curvas críticas:** Segmentos de trayectoria en una pista donde se genera una alta carga lateral, lo que permite evaluar el límite de estabilidad del sistema.
15. **Análisis estructural:** Evaluación del comportamiento físico y mecánico de los componentes de un producto para asegurar su resistencia y funcionamiento adecuado.
16. **Lastrado:** Técnica que consiste en añadir peso adicional a una estructura con el fin de mejorar su estabilidad y rendimiento, especialmente útil en

vehículos de trabajo pesado y maquinaria agrícola.

17. **Centro de masa:** Punto en el que se concentra la masa total de un cuerpo. En condiciones gravitacionales uniformes, coincide con el centro de gravedad, influyendo directamente en la estabilidad del vehículo.
18. **Fricción:** Fuerza que se opone al movimiento relativo entre dos superficies en contacto. En el caso de los neumáticos, es esencial para proporcionar tracción, frenado y control direccional.
19. **Rendimiento:** Capacidad de un vehículo o sistema para cumplir su función de forma eficiente. Se puede evaluar mediante parámetros como estabilidad, consumo de energía, maniobrabilidad y durabilidad.
20. **Vehículo:** Medio de transporte motorizado diseñado para trasladar personas o cargas. Puede abarcar desde automóviles livianos hasta camiones o tractores de alto tonelaje.
21. **Estabilidad:** Propiedad física que permite a un objeto mantener el

equilibrio ante perturbaciones. En vehículos, una buena estabilidad reduce el riesgo de vuelcos durante maniobras bruscas.

22. **Tracción:** Capacidad de un vehículo para aplicar eficazmente la fuerza del motor al suelo. Depende del diseño del neumático, la superficie de contacto y la distribución del peso.
23. **Suspensión:** Sistema mecánico que conecta la carrocería con las ruedas del vehículo, amortiguando impactos del terreno y asegurando estabilidad y confort durante la conducción.
24. **Neumático:** Elemento circular de caucho que envuelve la llanta y entra en contacto con el suelo. Proporciona tracción, absorción de impactos y contribuye al control del vehículo.
25. **Llanta:** También llamada rin, es la estructura metálica sobre la cual se monta el neumático. Sirve de enlace entre el eje del vehículo y la superficie de contacto.

# ÍNDICE

## Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	1
RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	4
GLOSARIO .....	6
ÍNDICE .....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Contexto .....	11
1.2 Objetivos .....	13
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1. Formulación .....	16
2.2. Síntesis .....	16
2.3. Análisis.....	16
2.4. Evaluación .....	16
2.5. Reformulación.....	16
3. ESTADO DEL ARTE .....	18
4. Aplicación de la metodología.....	25
5. Plan de acción .....	28
6. Construcción del vehículo experimental .	31
Desarrollo del Prototipo del Vehículo Experimental .	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

6.1 Selección del Modelo Base del Vehículo RC.....	31	10.2 Principales hallazgos .....	44
6.2 Adaptación e Implementación de las Nuevas Ruedas .....	32	10.3 Limitaciones del estudio .....	45
6.3 Problemas Detectados Durante la Adaptación.....	33	10.4 Conclusión general .....	48
6.4 Construcción de la Pista de Ensayo ..	34	REFERENCIAS .....	49
7. Desarrollo Experimental Inicial .....	35	ANEXOS A – [Nombre del Anexo] .....	51
7.1 Problemas Detectados en las Primeras Pruebas .....	35		
7.2 Intentos de Solución con el Primer Vehículo RC .....	35		
7.3 Cambio de vehículo Experimental: Mekano Tetrax Prime .....	35		
7.4 Ensayos del Vehículo Mecano MK1 ..	36		
7.5 Desarrollo de un Sistema de Suspensión Adaptado .....	36		
7.6 Desarrollo de Ruedas con Lastre Líquido Interno.....	37		
8. Ejecución experimental.....	39		
8.1 recopilación de datos .....	39		
8.2 Cálculos indirectos .....	41		
9. EJECUCIÓN METODOLOGÍA .....	42		
10. Conclusiones.....	43		
10.1 Conclusiones según los objetivos específicos.....	43		

# 1. INTRODUCCIÓN

El propósito de la introducción es proporcionar al lector una perspectiva general de la tesis que va a leer, una idea clara de cuál es el problema que da lugar a tu memoria. Por tal razón es común que se redacte al finalizar el trabajo de investigación.

## 1.1 Contexto

La estabilidad vehicular es un factor crítico en la seguridad de operación de todo tipo de vehículos, particularmente en aquellos de alto tonelaje que operan en contextos agrícolas, industriales, forestales o de transporte de carga. Según la *Organización Internacional del Trabajo (OIT)* y reportes técnicos de instituciones como la *FAO*, uno de los accidentes más comunes y graves en el entorno rural e industrial corresponde al **volcamiento de maquinaria pesada**, debido a la elevada altura del centro de gravedad y a condiciones de operación en terrenos irregulares o con curvas pronunciadas.

En este escenario, se han implementado soluciones como ejes más anchos, el uso de lastre líquido (agua) en los neumáticos y contrapesos externos. Sin embargo, estas medidas presentan limitaciones: comprometen el diseño del vehículo, aumentan el peso total y, en muchos casos, no permiten una redistribución eficiente del

centro de masa durante el movimiento dinámico, afectando el rendimiento operativo y la seguridad.

Desde una perspectiva de sustentabilidad e innovación en diseño, surge la necesidad de contar con sistemas que mejoren la **seguridad operativa sin comprometer la funcionalidad ni aumentar significativamente el consumo de energía**. Es en este contexto que se origina la propuesta del sistema *StabiliTyre*.

Este proyecto tiene como base una investigación anterior desarrollada por la exalumna **Pamela Ureta**, quien en su memoria propuso el concepto original de *StabiliTyre*, centrado en un sistema de **lastrado interno dinámico** incorporado en las ruedas de vehículos, con el objetivo de disminuir el centro de gravedad sin modificar la morfología del vehículo. Su trabajo sentó las bases conceptuales y de diseño para una tecnología innovadora orientada a reducir el riesgo de volcamiento y mejorar el rendimiento dinámico en vehículos de trabajo pesado.

La presente memoria corresponde a una **continuación directa de esa investigación**, enfocándose en validar el sistema a través de un **experimento exploratorio** que permita

observar su comportamiento funcional en condiciones controladas. Utilizando la metodología de diseño FBS (Function-Behaviour-Structure), esta nueva etapa busca consolidar y verificar la viabilidad técnica del concepto mediante la implementación de un modelo experimental a escala.

Además de abordar un problema técnico, esta innovación se alinea con una oportunidad de mercado en crecimiento: el desarrollo de soluciones inteligentes aplicadas a la **seguridad vehicular en entornos exigentes**. Diversos estudios destacan que la demanda de tecnologías enfocadas en estabilidad y control está en aumento, particularmente en maquinaria agrícola y de transporte donde los estándares de seguridad y eficiencia están cada vez más integrados al proceso de decisión de compra.

Este informe presenta los avances realizados en esta segunda etapa del proyecto *StabiliTyre*, con énfasis en su validación mecánica, comportamiento dinámico y proyecciones de aplicación real. A partir del contexto expuesto, se identifican los desafíos clave que guiarán el desarrollo de esta memoria, en base a las oportunidades previamente abiertas por el trabajo de Pamela Ureta.

## **1.2 Objetivos**

En esta sección se describen el objetivo principal y los objetivos específicos que se abordarán en el presente trabajo

Objetivo general: validar el uso de lastre dinámico (efecto observable)

Objetivo específico 1: calcular el impacto con respecto a la distancia vertical con el plano de sustentación

Objetivo específico 2: realización de un modelo experimental que permita la comparación de productos actuales y el desarrollado en esta memoria

Objetivo específico 3: desarrollo de patente

## 2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se optó por utilizar el modelo FBS (Function–Behaviour–Structure) como marco metodológico principal debido a su capacidad para abordar problemas de diseño técnico-estructural de forma sistemática, lógica y trazable. A diferencia de otros enfoques más centrados en la experiencia del usuario o en la creatividad intuitiva, el modelo FBS permite establecer relaciones claras entre la función deseada de un sistema, los comportamientos esperados para cumplir dicha función, y la estructura concreta que debe diseñarse para generar esos comportamientos.

En comparación con metodologías como el Design Thinking o el Doble Diamante, que, si bien ofrecen herramientas para la ideación y validación con usuarios, carecen de la rigurosidad técnica necesaria para justificar transformaciones estructurales en sistemas físicos, el modelo FBS destaca por su enfoque analítico y funcional. Asimismo, frente a métodos como TRIZ, que se orientan a resolver contradicciones técnicas mediante principios inventivos ya existentes, FBS proporciona una mayor libertad y profundidad en el desarrollo de soluciones originales, permitiendo tanto la evaluación como la reformulación continua del diseño en base a su desempeño real.

Entre los principales puntos fuertes del modelo FBS se encuentran su claridad conceptual, la posibilidad de iterar de forma fundamentada y estructurada, y su compatibilidad con procesos técnicos como simulaciones, cálculos de comportamiento físico y validación experimental. Estas características resultan especialmente valiosas en el contexto del desarrollo del sistema StabiliTyre, cuya finalidad es reducir el centro de gravedad de vehículos agrícolas o ganaderos mediante un sistema de lastre interno en las ruedas, sin alterar la morfología externa del vehículo.

Gracias a su estructura basada en funciones, comportamientos y estructuras, FBS permite modelar con precisión los objetivos del proyecto, evaluar el comportamiento derivado de las propuestas estructurales y realizar ajustes controlados cuando sea necesario. Por tanto, se considera que este modelo ofrece una ventaja metodológica significativa frente a otros enfoques de diseño, ya que permite abordar problemas complejos con un marco coherente, técnico y fácilmente justificable a lo largo de todas las etapas del proyecto.

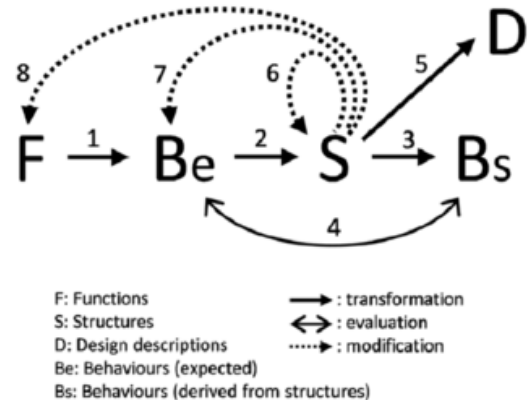


Ilustración 1

Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2014). *The function-behaviour-structure ontology of design*. En A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Eds.), *An anthology of theories and models of design: Philosophy, approaches, and empirical explorations* (pp. 263–283). Springer.

Esta metodología permite analizar de forma estructurada la relación entre la función deseada del sistema, los comportamientos esperados y la estructura física que los posibilita. A través de sus etapas — formulación, síntesis, análisis, evaluación y reformulación— fue posible orientar las decisiones de diseño con base en criterios funcionales y técnicos.

## **2.1. Formulación -> F**

Esta etapa consiste en traducir las funciones deseadas del sistema en comportamientos esperados. A partir de lo que se desea que el sistema haga, se identifican los efectos, acciones o respuestas que debería producir para cumplir con esas funciones. Es un paso clave para establecer criterios de diseño claros que orienten el desarrollo posterior.

## **2.2. Síntesis -> Be**

Una vez definidos los comportamientos esperados, se propone una estructura capaz de generarlos. Esta estructura puede incluir formas, componentes, materiales y configuraciones técnicas. La síntesis es el proceso creativo mediante el cual el diseñador transforma objetivos funcionales en soluciones estructurales concretas.

## **2.3. Análisis -> S**

En esta etapa se estudia el comportamiento real que resulta de la estructura propuesta. Puede implicar el uso de simulaciones, cálculos, modelado computacional o pruebas físicas, con el fin de determinar si la

estructura responde como se esperaba. El análisis permite obtener una visión objetiva del desempeño del diseño.

## **2.4. Evaluación -> Bs**

El comportamiento derivado es comparado con el comportamiento que se esperaba originalmente. Esta comparación permite determinar si el diseño es coherente con los objetivos funcionales. Si el comportamiento real no satisface los requerimientos planteados, es necesario realizar ajustes.

## **2.5. Reformulación-> 4.**

Cuando se detectan inconsistencias entre lo esperado y lo obtenido, se procede a reformular alguno de los elementos del modelo. Esto puede implicar modificar la estructura, ajustar los comportamientos esperados, o incluso reconsiderar la función inicial. La reformulación permite mejorar iterativamente el diseño, manteniendo la coherencia entre necesidad y solución.

A continuación, el uso del FBS en el desarrollo de una silla como ejemplo:

<b>Etapas</b>	<b>Aplicación en la silla</b>
Función (F)	Permitir sentarse de forma cómoda y segura
Comportamiento esperado (Be)	Soportar peso, ser estable, ergonómica, ligera
Estructura (S)	Diseño de 4 patas, asiento acolchado, respaldo ergonómico
Comportamiento derivado (Bs)	Soporte de peso real, comodidad, estabilidad, peso real
Evaluación	Comparar resultados de pruebas con lo que se esperaba
Reformulación	Ajustar materiales y formas para mejorar la ergonomía y peso

Tabla 1 Aplicación modelo FBS



Ilustración 2 silla de ejemplo

### 3. ESTADO DEL ARTE

A continuación, una lista de referentes investigados para el desarrollo de esta memoria

#### 3.1 Métodos

##### 1. Reubicación de Componentes Pesados

Las baterías están ubicadas en la base del chasis, lo que proporciona un centro de gravedad bajo y mejora la estabilidad.



*Ilustración 3 Ejemplo: Tesla Model S*

## 2. Uso de Chasis Bajo

Diseñados con un perfil bajo para mejorar la maniobrabilidad y estabilidad en terrenos agrícolas.



*Ilustración 4 Ejemplo: John Deere 6R Series*

## 3. Ensanchamiento del Eje o Vía

Utiliza orugas traseras más anchas que las ruedas estándar, mejorando la base y estabilidad.



*Ilustración 5 Ejemplo: Case IH Magnum Rowtrac*

## 4. Llantas de Perfil Bajo

Utilizan llantas anchas y bajas que mejoran la tracción y reducen el centro de gravedad sin sacrificar agarre.



*Ilustración 6 Ejemplo: Vehículos de Competencia (F1, Le Mans)*

## 5. Cabinas Más Bajas o Desplazadas

Cabina integrada baja, cerca del eje, para mantener la estabilidad con implementos traseros.



*Ilustración 7 Ejemplo: Kubota L-Series Compact Tractors*

## 6. Lastre Fijo (o Contrapesos)

Tractores de marcas como Massey Ferguson, Valtra y John Deere utilizan

bloques metálicos bajos para equilibrar el vehículo.



*Ilustración 8 Ejemplo: Tractores Agrícolas con Pesos en las Ruedas o Delante del Motor*

## 7. Suspensión Activa o Semiactiva

Controla individualmente cada rueda y adapta la altura para mantener el centro de gravedad bajo en curvas.



Ilustración 9 **Ejemplo:** Mercedes-Benz GLE con E-Active Body Control

## 8. Orugas en Lugar de Ruedas

Tractor de orugas que reemplaza ruedas por un sistema de tracción continuo que distribuye mejor el peso y mantiene bajo el centro de gravedad.



Ilustración 10 **Ejemplo:** Challenger MT800 Series

## 10. Análisis de Distribución de Masa

Se utilizan en diseño automotriz y maquinaria para colocar componentes pesados donde más convenga.

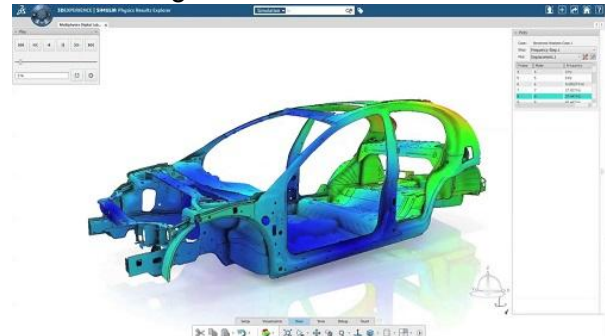


Ilustración 11 **Ejemplo:** Software de Simulación CAD/CAE como SolidWorks o ANSYS

## 11. Uso de Materiales Livianos en Zonas Altas

El uso de materiales livianos en la parte superior reduce el efecto palanca del peso.



Ilustración 12 **Ejemplo:** Toyota Hilux con Techo de Aluminio

## 12. Rebaja del Centro de Carga

Diseñados con cajas cercanas al piso para mejorar la estabilidad con carga alta.



Ilustración 13 **Ejemplo:** Camione de Carga Isuzu con Plataforma Baja

A continuación, pruebas que se realizan en el rubro:

### 1. Static Stability Factor (SSF)

- **Aplicación:** Automóviles y vehículos ligeros (SUV, pickups).

**Circunstancias:** Evaluación estática sin movilidad.

### **Procedimiento:**

Se mide el **ancho de vía** y la **altura del centro de gravedad** del vehículo. Luego se calcula el valor SSF con la fórmula:

$$SSF = \frac{\text{Ancho de vía}/2}{\text{Altura del centro de gravedad}}$$

Esta medida predice el riesgo de volcamiento en curvas cerradas sin necesidad de pruebas dinámicas. (1)

## 2. Tilt-Table Test (Plataforma Inclinada)

- **Aplicación:** Buses, camiones, maquinaria agrícola y militar.

**Circunstancias:** Vehículo inmovilizado sobre una plataforma que se inclina lateralmente.

### **Procedimiento:**

El vehículo se coloca sobre una plataforma hidráulica que se eleva de un lado hasta que las ruedas internas comienzan a despegarse del suelo. El ángulo medido es el **ángulo crítico de vuelco**. (2)

## 3. Fishhook Test (Maniobra de gancho de pez)

- **Aplicación:** Vehículos livianos, especialmente SUV, camionetas y vehículos de alta carga lateral.

**Circunstancias:** Maniobra evasiva simulada a velocidad, típicamente entre 60 y 100 km/h.

### **Procedimiento:**

El vehículo realiza una maniobra

brusca de giro hacia un lado y luego una corrección rápida en sentido contrario (como esquivar un obstáculo repentino). Se mide si alguna de las ruedas internas se despega. (3)

## 4. J-Turn Test (Maniobra en J)

- **Aplicación:** Evaluación dinámica similar al Fishhook, usada en validaciones internas de fabricantes y pruebas NCAP.

**Circunstancias:** Simulación de maniobras evasivas de alta velocidad con entrada agresiva a curva.

### **Procedimiento:**

El vehículo es dirigido a velocidad constante y se realiza un giro fuerte, en forma de "J", seguido de una recuperación. Se monitorea si el vehículo muestra tendencia a volcar. (4)

## 5. Side Pull Test (Tirón Lateral)

- **Aplicación:** Alternativa estática al tilt table test en condiciones controladas.

**Circunstancias:** Vehículo inmóvil; se aplica una fuerza lateral controlada en el centro de masa.

**Procedimiento:**

Se conecta un sistema de tracción lateral (como un cable) al vehículo, aplicando fuerza constante hasta que se produce un levantamiento parcial. Es útil para analizar cómo la fuerza lateral afecta el equilibrio sin necesidad de inclinación real. (5)

## 6. Critical Sliding Velocity (CSV)

- **Aplicación:** Evaluación de condiciones extremas de fricción (impacto lateral, bordillos, pérdida de adherencia).

**Circunstancias:** Simula interacción de neumáticos con obstáculos que actúan como "gatillos" de vuelco (tripping).

**Procedimiento:**

Se modela o prueba físicamente la velocidad mínima necesaria para que el vehículo pierda adherencia y comience un vuelco tras chocar lateralmente con un objeto fijo (bordillo, desnivel). (6)

## 4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se desarrolla la metodología de diseño FBS (Function-Behavior-Structure) aplicada al proyecto de validación de la tecnología. Información sacada “The function-behaviour-structure ontology of design” de Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2014).

### 1. Formulación (F → Be, S)

La formulación parte de la definición de la función principal del sistema:

- **Función (F):** Reducir el riesgo de vuelco del tractor mediante el descenso de su centro de gravedad.

De esta función se derivan los comportamientos esperados y la estructura necesaria:

- **Comportamiento esperado (Be):** El tractor debe mantener la estabilidad al enfrentar inclinaciones laterales mayores que las que podría soportar sin la tecnología propuesta.
- **Estructura requerida (S):** Incorporación de un sistema de péndulo modular ubicado dentro de cada rueda, capaz de desplazar masa hacia el punto más bajo durante la operación sin interferir con el funcionamiento normal del vehículo.

## 2. Síntesis (Be → S)

A partir del comportamiento esperado se propone una estructura específica:

- Se diseña una rueda con un compartimiento interior que aloja el sistema de Stabilityre.
- El lastre se encuentra semi guiado para que por acción de la gravedad tienda a permanecer en la parte inferior de la rueda, ayudando a bajar el centro de masa del conjunto.
- El sistema es modular, desmontable y ajustable según las necesidades de carga o terreno.

## 3. Análisis (S → Bs)

Con la estructura definida, se procede a analizar su comportamiento real mediante un experimento exploratorio:

- Se construye una pista con peralte progresivo, donde el ángulo de inclinación lateral aumenta de forma controlada.
- Se realizan 3 pruebas comparativas:

- Un tractor con ruedas convencionales.
- Un tractor con el sistema de lastre modular instalado.
- un tractor con el sistema más usado en el mercado (ruedas rellenas con agua)
- Se mide el ángulo de inclinación máximo que puede soportar cada configuración antes del vuelco.

Este análisis permite observar el **comportamiento real (Bs)** y determinar si se ajusta a las expectativas funcionales del diseño.

## 4. Evaluación (Bs ↔ Be)

Se comparan los resultados experimentales con el comportamiento esperado:

- Si el tractor con péndulo logra mantener la estabilidad a mayores ángulos, se valida el diseño.
- Si no se observa mejora significativa, se considera la necesidad de modificar el sistema.

La evaluación permite determinar el grado de cumplimiento de los objetivos de diseño y el

impacto real de la solución estructural propuesta.

## 5. Reformulación (F ↔ Be ↔ S)

En caso de que los resultados no cumplan con las expectativas, se puede realizar una reformulación en diferentes niveles:

- **Función:** Replantear el objetivo de estabilización. Tal vez el sistema requiere complementarse con otras soluciones (suspensión activa, contrapesos dinámicos).
- **Comportamiento esperado:** Ajustar las metas de rendimiento en función de condiciones más realistas de operación.
- **Estructura:** Modificar el diseño del péndulo (masa, material, longitud) o el sistema de montaje.

**Conclusión** La aplicación del modelo FBS proporciona una estructura metódica y flexible para abordar el desarrollo de soluciones innovadoras como el sistema de péndulo modular. A través de la formulación, síntesis, análisis, evaluación y reformulación, es posible avanzar desde una idea funcional inicial hasta un sistema validado

experimentalmente. Esta metodología es especialmente adecuada para proyectos con un fuerte componente exploratorio, donde se busca comprender y comprobar el impacto de una nueva tecnología en condiciones controladas y replicables.

Cabe señalar que, por razones de tiempo y complejidad del proyecto, esta prueba será realizada en una maqueta a escala 1:16, lo que permite replicar de forma segura y económica las condiciones de estabilidad y analizar el efecto del péndulo modular bajo parámetros controlados.

## 5 Plan de acción

A continuación, el plan de acción propuesto para la realización del proyecto, ver sección 2.11 que resume las etapas; se indican las modificaciones cuando fueron realizadas.

### 1. Preparación del vehículo base

- **1.1. Selección del modelo RC a escala 1:16:**  
Escoger un vehículo de control remoto con tamaño y peso adecuados, que permita modificaciones en su estructura de ruedas sin comprometer el funcionamiento del sistema motriz.
- **1.2. Evaluación y desmontaje del sistema de ruedas original:**  
Identificar las posibilidades de desmontaje y adaptación de las ruedas originales para permitir la incorporación de un nuevo sistema con lastre modular.
- **1.3. Adaptación del chasis y eje:**  
En caso de ser necesario, realizar ajustes en los ejes del vehículo para que permitan el acoplamiento seguro de las ruedas experimentales

(convencionales, con agua y con péndulo modular).

## 2. Diseño e implementación del sistema de ruedas

- **2.1. Diseño del sistema de ruedas con péndulo modular:**

Crear un modelo de rueda que contenga en su interior un sistema de lastre pendular semi guiado. Este debe:

- Mantener su posición gravitacionalmente en la parte inferior durante el movimiento.
- Estar fijado al eje (no a la llanta).
- Ser modular y desmontable.

- **2.2. Fabricación del sistema a escala 1:16:**

Usar impresión 3D, mecanizado u otras tecnologías para fabricar las ruedas y el péndulo con materiales adecuados, replicando condiciones proporcionales al sistema real.

- **2.3. Instalación del sistema en el vehículo RC:**

Montar el sistema de rueda con péndulo en el vehículo, asegurando funcionamiento libre y sin interferencias mecánicas.

- **2.4. Preparación de configuraciones comparativas:**

- Ruedas convencionales (sin lastre).
- Ruedas rellenas con agua (80% de volumen interno).
- Ruedas con el sistema de péndulo modular.

## 3. Construcción de pista de prueba

- **3.1. Diseño de pista con peralte progresivo:**

Construir una superficie con inclinación lateral creciente hasta los 38°. Tomando como referencia las pruebas investigadas anteriormente.

- **3.2. Aseguramiento de condiciones controladas:**

Verificar que el vehículo pueda

desplazarse por la pista sin obstáculos ni interferencias externas.

#### 4. Realización del experimento

- **4.1. Ejecución de pruebas comparativas:**  
Por cada configuración de ruedas (convencionales, con agua, con péndulo), realizar múltiples pasadas sobre la pista, aumentando la inclinación hasta que el vehículo pierda estabilidad o vuelque.
- **4.2. Registro de resultados:**  
Medir y anotar el ángulo máximo soportado por el vehículo antes del vuelco en cada configuración. Registrar observaciones adicionales sobre el comportamiento dinámico del péndulo.

#### 5. Análisis y evaluación

- **5.1. Comparación de resultados:**  
Analizar qué configuración permite una mayor inclinación antes del vuelco.

- **5.2. Evaluación del comportamiento real vs. esperado:**  
Determinar si el sistema de lastre dinámico cumple con el objetivo de bajar el centro de gravedad y mejorar la estabilidad.
- **5.3. Reformulación (si es necesario):**  
En caso de resultados insatisfactorios, considerar modificaciones al diseño del péndulo, materiales, forma de montaje o incluso complementar el sistema con otras tecnologías.

## 6 Construcción del vehículo experimental

### 6.1. Selección del Modelo Base del Vehículo RC

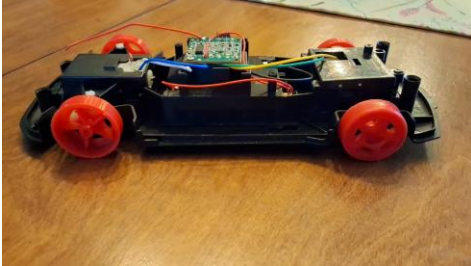
Siguiendo la metodología previamente definida, el primer paso consistió en **analizar distintos modelos de vehículos RC** para determinar un chasis adecuado como plataforma experimental. Se revisaron múltiples alternativas de las cuales destacan dos configuraciones:

1. **Modelo con ruedas de gran diámetro y estructura hueca**, adecuado para compensar irregularidades y aumentar la tracción.



*Ilustración 14 ruedas de gran diámetro y estructura hueca*

2. **Modelo con diseño deportivo y chasis bajo**, el cual presentaba una estructura interna más estable y compacta.



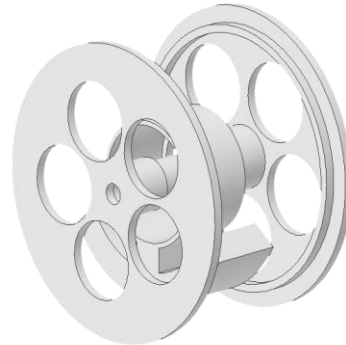
*Ilustración 15 diseño deportivo y chasis bajo*

Tras evaluar las ventajas de ambos, se decidió **combinar las características más funcionales**: utilizar ruedas de mayor tamaño junto con el chasis de estética deportiva. Esta elección buscó aprovechar la tracción de las ruedas grandes sin perder la estabilidad estructural del segundo modelo. Paralelamente, se inspeccionó el interior del vehículo seleccionado, verificando que **no requería modificaciones significativas** para la instalación del nuevo sistema de ruedas ni para el correcto funcionamiento del experimento.

De manera adicional, se recuperaron **ruedas completamente cerradas** provenientes de otro vehículo RC, las cuales serían utilizadas específicamente en las pruebas del sistema de lastre con agua.

## 6.2. Adaptación e Implementación de las Nuevas Ruedas

Como segunda etapa, se procedió al diseño e implementación de soportes para **acoplar las ruedas huecas** al chasis seleccionado. Dado que estos neumáticos no poseían estructura interna rígida, se requirió diseñar piezas de soporte que evitarán deformaciones durante el uso.



*Ilustración 16 Modelo 3D de las tapas y el sistema StabiliTyre*

Para ello, se fabricaron distintos prototipos mediante **impresión 3D**, ajustando dimensiones y tolerancias con el fin de asegurar un encaje adecuado. Este proceso incluyó múltiples iteraciones debido a las variaciones inherentes a la tecnología de impresión 3D, tales como:

- diferencias milimétricas entre el diseño digital y la pieza impresa,
- calibración variable de la impresora,
- estado del filamento,
- diferencias entre modelos de impresoras presentes en el laboratorio.

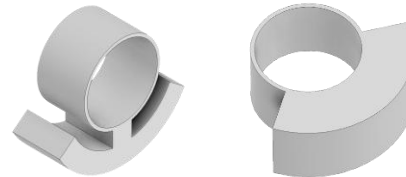
Estos factores exigieron realizar ajustes continuos hasta obtener piezas con un ajuste óptimo.

### **6.3. Problemas Detectados Durante la Adaptación**

Durante el desarrollo de esta fase surgieron diversos problemas técnicos:

#### **a) Espacio interno reducido en las ruedas**

El volumen interior de las ruedas huecas resultó insuficiente para alojar un soporte fabricado en **PLA al 20% de relleno**, lo que limitaba su resistencia. Como solución, se diseñó una **pieza de menor tamaño, pero con un relleno del 100%**, incrementando su masa y rigidez para funcionar como lastre interno.

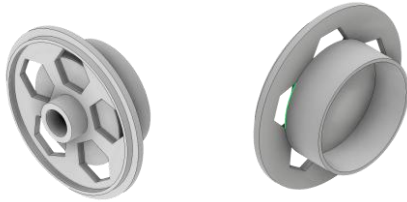


*Ilustración 17 comparativa del viejo(izq.) y el nuevo modelo*

#### **b) Imposibilidad de retirar las ruedas originales del vehículo**

A diferencia de otros modelos RC, este vehículo presentaba **ruedas fuertemente fijadas al eje** y un sistema de engranajes interno muy compacto. Se evaluó la opción de utilizar una pistola de calor para derretir o ablandar la llanta original, pero se descartó debido al riesgo de dañar la circuitería interna y los componentes electrónicos.

La alternativa elegida fue **modificar el diseño de las ruedas impresas para adaptarse directamente sobre las llantas originales**, generando así diversos modelos de acople.



*Ilustración 18 nuevo acople a las ruedas originales del vehículo*

Finalmente, se consiguió un ajuste firme y funcional, permitiendo instalar ruedas traseras de mayor tamaño. Esta configuración otorgó al modelo una apariencia similar a un vehículo agrícola, lo cual resultó coincidentemente alineado con la estética de tractores, relevantes en el contexto del proyecto.

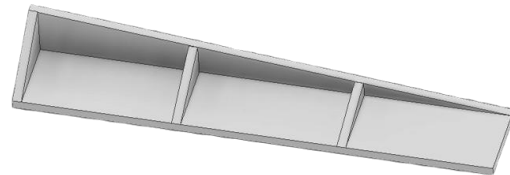
#### **6.4. Construcción de la Pista de Ensayo**

Con el vehículo base ya adaptado, se avanzó hacia la tercera etapa: **la construcción de un banco de pruebas que reprodujera condiciones de inclinación y peralte representativas de escenarios reales.**

El diseño final consideró:

- **Longitud total:** 1,60 m
- **Inclinación inicial:** 6° durante los primeros 1,61 m
- **Peralte final:** 38°, valor que corresponde a parámetros utilizados en pruebas internacionales de estabilidad vehicular

La estructura fue construida utilizando **madera unida mediante tornillos**, con superficie cubierta de **teja asfáltica** para simular un terreno con textura realista y controlada. Esto permitió reproducir condiciones estables y repetibles durante las pruebas experimentales, obteniendo así una pista confiable para las distintas etapas del estudio.



## 7 Desarrollo Experimental Inicial

### 7.1. Problemas Detectados en las Primeras Pruebas

Durante las primeras pruebas realizadas con el vehículo RC se identificó un problema crítico: **el vehículo no lograba iniciar la marcha sobre la rampa peraltada**, incluso cuando se le aplicaba un pequeño impulso inicial. Para descartar que la geometría de la rampa fuese el factor determinante, se repitió la prueba utilizando una tabla inclinada con la misma pendiente (38°). El resultado fue idéntico: **incapacidad de iniciar el movimiento ascendente**.

El desempeño deficiente podría deberse a una combinación de factores:

- **Materialidad de la superficie de pruebas:** la teja asfáltica utilizada presenta una textura rugosa y adherente que aumenta la resistencia al avance.
- **Diseño de las ruedas del RC:** los neumáticos poseían pinchos sobresalientes, lo que incrementa la fricción con la superficie.

- **Potencia limitada del vehículo RC:** el peso incorporado al sistema supera la capacidad del motor para iniciar la tracción.

Es probable que el problema emergiera de la suma conjunta de todas estas condiciones.

### 7.2. Intentos de Solución con el Primer Vehículo RC

Con el objetivo de reducir la resistencia al inicio de marcha, se procedió a **aligerar el vehículo** retirando la carcasa y eliminando piezas no esenciales, tales como tornillos y elementos plásticos sin función estructural crítica. Sin embargo, aun con esta disminución de masa, el vehículo seguía sin ser capaz de iniciar el desplazamiento, por lo que se descartó continuar con este vehículo.

### 7.3. Cambio de vehículo Experimental: Mekano Tetrax Prime

Dada la imposibilidad de obtener resultados satisfactorios con el primer vehículo, se optó por cambiar de estrategia y utilizar un nuevo sistema mecánico proporcionado por el profesor **Leonardo Madariaga**. El modelo seleccionado fue un **Pitsco Tetrax Prime**.



*Ilustración 19 conjunto de Mekano Tetrax Prime*

Durante el proceso de ensamblaje se evidenció un nuevo imprevisto: **el set se encontraba incompleto**, lo que dificultó su montaje inicial. Esto obligó a fabricar componentes adicionales mediante impresión 3D, tales como pasadores y uniones para vigas estructurales.

#### **7.4. Ensayos del Vehículo Mecano MK1**

Una vez ensamblado el vehículo mecano MK1, se realizaron pruebas preliminares utilizando únicamente las piezas originales del set, sin incorporar modificaciones a las ruedas. Esta decisión se tomó para evitar

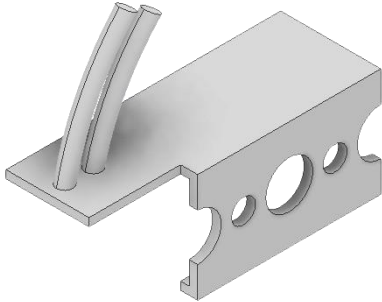
repetir el error cometido con el vehículo RC, donde se diseñaron piezas antes de verificar la viabilidad funcional básica.

En estas pruebas se comprobó que **la potencia proporcionada por los servomotores de 360° era suficiente para iniciar y mantener el avance sobre la rampa peraltada**. Sin embargo, surgió un nuevo problema: **la rigidez estructural del vehículo impedía un contacto uniforme de las ruedas con la superficie**. En particular, tres de las cuatro ruedas apoyaban correctamente, mientras que la cuarta quedaba suspendida. Cuando esta rueda era la correspondiente a un servomotor de 360°, la pérdida de contacto generaba un desbalance de tracción que hacía que el vehículo girara sobre su eje y terminara cayendo de la rampa, impidiendo la obtención de datos válidos.

#### **7.5. Desarrollo de un Sistema de Suspensión Adaptado**

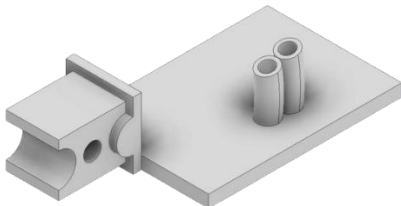
Para resolver la limitación de contacto entre las ruedas y la superficie de la rampa, se diseñaron y fabricaron **prototipos de suspensiones específicas** compatibles con el sistema Tetrax Prime. Estas suspensiones consistían en dos piezas principales:

- **Soporte macho con resortes integrados**, destinados a absorber irregularidades y permitir un asentamiento flexible del vehículo sobre la rampa



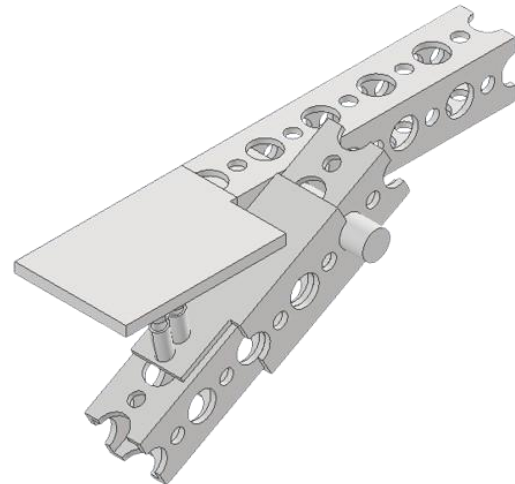
*Ilustración 20 diseño 3D del soporte macho*

- **Soporte hembra**



*Ilustración 21 diseño 3D del soporte hembra*

El objetivo de este sistema fue otorgar capacidad de adaptación vertical a cada rueda, mejorando la tracción y reduciendo los efectos adversos de la rigidez estructural original.



*Ilustración 22 representación 3D del sistema de suspensión y el mecano ensamblado*

## **7.6. Desarrollo de Ruedas con Lastre Líquido Interno**

En esta etapa se optó por usar ruedas diferentes al resto de pruebas, ya que poseían una **cámara neumática abierta lateralmente**, lo que dificulta su sellado e

impedía incorporar fluido en su interior de forma segura.

Se seleccionaron ruedas de dimensiones y peso similares, pero con una **cámara más cerrada**, adecuada para su modificación. A partir de ello, se diseñaron y fabricaron **tapas mediante impresión 3D**, con el objetivo de lograr un cierre lo más hermético posible y evitar fugas durante el movimiento.

Posteriormente, se calculó el **volumen interno de la rueda** para determinar la cantidad de fluido a incorporar. Se estableció un llenado del **80% con agua**, dejando un 20% de aire para absorber variaciones de presión y permitir un leve desplazamiento interno del fluido.



*Ilustración 23 rueda seleccionada y su tapa correspondiente*

## 8 Ejecución experimental

### 8.1 recopilación de datos

La etapa experimental se llevó a cabo utilizando la **rampa peraltada** construida con una inclinación progresiva que alcanza un ángulo máximo de **36°**.

En cada ensayo, se posicionó el **vehículo RC** en la base de la rampa, asegurando una colocación inicial constante para todas las pruebas (peso del chasis, velocidad del vehículo, peralte de la rampa, superficie de la rampa). Posteriormente, el vehículo fue accionado mediante su control remoto hasta alcanzar la **máxima capacidad de desplazamiento lineal** permitida después de todas las modificaciones al vehículo, desplazándose a través del tramo peraltado de la rampa. tomando todas estas como variables independientes del experimento

El propósito de este procedimiento fue observar y registrar el **comportamiento del vehículo frente al aumento del ángulo de inclinación**, determinando hasta qué punto logra mantener la estabilidad y el avance en línea recta antes de perder adherencia o estabilidad lateral.

Para garantizar la validez de los resultados, se estableció una **repetición sistemática de 30**

**ensayos por cada condición experimental**, de modo de reducir la influencia de factores aleatorios y permitir un análisis estadístico representativo.

La variable modificada en cada experimento fue:

- **Experimento 1:** Ruedas sin intervención, es decir, sin adición de ningún tipo de lastre.
- **Experimento 2:** Ruedas llenas con **agua**, utilizada como masa adicional.
- **Experimento 3:** Ruedas equipadas con el **lastre dinámico**, correspondiente al sistema de compensación propuesto en el presente proyecto.

Cada uno de estos métodos fue sometido al mismo procedimiento experimental y condiciones ambientales, asegurando así la **comparabilidad de los resultados** entre los diferentes sistemas de lastre.

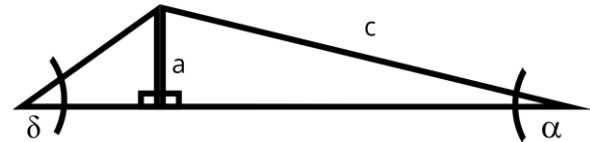
A continuación, un promedio de los resultados obtenidos:

Método	Ruedas sin intervención	Ruedas con 80% agua	Ruedas con lastre interno dinámico
distancia $\Delta$	110,3	120,5	129,7

Tabla 2 promedios de los 30 datos observados

La variable de “**distancia recorrida**” no constituye por sí misma el resultado comparativo principal del experimento, sino que actúa como un **valor intermedio** para determinar el **ángulo máximo alcanzado** por el vehículo antes de perder estabilidad, deslizarse o volcar.

Para este propósito, se aplicaron **principios de trigonometría** a fin de transformar la distancia obtenida en términos angulares. En cada ensayo, la **distancia recorrida** sobre la superficie de la rampa se consideró como la **hipotenusa de un triángulo rectángulo**, donde la **base** corresponde al desplazamiento diagonal y la **altura** representa la elevación alcanzada por el vehículo respecto al punto de inicio.



Sabiendo que la rampa inicia con una **inclinación de 6.06°**, este valor fue utilizado como ángulo de referencia para determinar la altura correspondiente a cada distancia recorrida. A partir de esa misma altura, y considerando la geometría de la rampa peraltada, fue posible calcular el **ángulo opuesto**, correspondiente al **ángulo de inclinación efectiva** alcanzado en el punto donde el vehículo perdió el equilibrio o estabilidad.

De esta manera, mediante la aplicación de relaciones trigonométricas y el registro sistemático de las distancias, se obtuvo para cada método de ensayo un **valor angular representativo del límite de estabilidad**.

Estos ángulos permiten una comparación precisa del comportamiento del vehículo bajo las tres configuraciones de rueda: sin intervención, con agua, y con el sistema de lastre dinámico.

## 8.2. Cálculos indirectos

Para determinar el **ángulo máximo alcanzado por el vehículo RC** antes de perder estabilidad, se empleó un procedimiento basado en relaciones trigonométricas simples.

En primer lugar, la **distancia recorrida sobre la rampa (d)** se consideró como la **hipotenusa** de un triángulo rectángulo, donde el **ángulo inicial de inclinación** de la rampa es de **6.06°**. Mediante esta relación, se calculó la **altura (h)** alcanzada en cada ensayo utilizando la siguiente expresión:

$$a = c \times \sin(6,06)$$

Una vez determinada la altura correspondiente a cada distancia recorrida, se procedió a calcular el **ángulo total de inclinación efectiva ( $\delta$ )** alcanzado en el punto donde el vehículo perdió equilibrio o se deslizó. Para ello, se consideró la **longitud horizontal proyectada (d)** de la rampa 25 cm. con este valor y la altura (a) calculada se

generó un nuevo triángulo perpendicular al ya existente esto con el fin de calcular el **ángulo total de inclinación efectiva ( $\delta$ )** con la siguiente expresión:

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{d}\right)$$

Este siendo el dato más significativo para el estudio, ya que, se compara con los datos de estudios oficiales del mercado.

Después de los cálculos correspondientes, estos fueron los resultados.

$\delta$	nada	agua	lastre
ángulo	25,0	27,0	28,7

*Tabla 3 ángulos obtenidos a través de los promedios de los datos*

El ángulo ( $\delta$ ) obtenido para cada ensayo representa el **ángulo equivalente de estabilidad alcanzado por el vehículo**, independientemente de la longitud de la rampa, su inclinación original o la distancia recorrida.

## 9. Ejecución metodología

### Resumen Integrado – Reunión OTTL + Informe de Primer Intento de Patente

El proyecto *Stabilityre* fue previamente sometido a una evaluación de patentabilidad (Informe 42-2012-BAP)

En ese análisis, la invención —una rueda con centro de gravedad reducido mediante un lastre interno— fue considerada **novedosa y aplicable industrialmente**, pero **careció de nivel inventivo**, debido a que documentos previos (D1 y D2) (imágenes en anexos) permitían llegar de manera obvia a la misma solución técnica, lo cual impidió su protección mediante patente.

A raíz de este antecedente, se sostuvo una reunión con **Macarena Navarro** de la OTTL UTFSM. En ella se revisó el historial del proyecto y se discutió si las **modificaciones introducidas posteriormente** por el estudiante Esteban Guzmán podrían constituir una variante **técnicamente distinta y potencialmente protegible**. Se enfatizó que *sí es posible proteger el proyecto*, pero **no mediante el enfoque utilizado en el primer intento**, y que la patentabilidad dependerá de demostrar que las nuevas mejoras **no son obvias** desde D1 y D2.

La OTTL recomendó fortalecer la futura solicitud reuniendo más evidencia del **problema técnico real**, sus impactos en el mercado agrícola chileno y la justificación del nivel inventivo. Se sugirió revisar bases de datos como INAPI y Google Patents, explorar un **modelo de utilidad**, elaborar una **declaración de invención** y aumentar la participación del **profesor guía Roberto Durán** en el proceso formal. Asimismo, se planteó evaluar oportunidades de **transferencia tecnológica**, pruebas con empresas de maquinaria agrícola y el impacto económico para reforzar la necesidad de protección.

En síntesis, el primer informe establece por qué el intento original no fue patentable, mientras que la reunión con OTTL traza el camino para una **nueva estrategia** de protección basada en las diferencias actuales, la profundización del problema y la validación técnica y comercial futura.

## 10. Conclusiones

En el presente trabajo de titulación se logró validar experimentalmente la funcionalidad del sistema de **lastre dinámico StabiliTyre**, orientado a mejorar la estabilidad de vehículos mediante la redistribución interna del peso en sus ruedas. Los resultados obtenidos a partir del experimento exploratorio permiten extraer las siguientes conclusiones:

### 10.1 Conclusiones según los objetivos específicos

**Objetivo específico 1: Calcular el impacto con respecto a la distancia vertical con el plano de sustentación.**

El análisis de los datos experimentales mostró diferencias significativas entre los tres métodos de prueba. El promedio de distancias recorridas antes de la pérdida de estabilidad fue de **110,3 mm** para las ruedas sin lastre, **120,5 mm** para las ruedas con agua, y **129,7 mm** para las ruedas con el sistema de **lastre dinámico**.

Estos resultados demuestran que el sistema propuesto permitió al vehículo alcanzar una **mayor distancia y, por ende, un mayor ángulo de inclinación efectiva** antes de desequilibrarse. Mediante el cálculo trigonométrico correspondiente, esto se traduce en un **incremento del ángulo máximo de estabilidad**, validando el efecto reductor del centro de gravedad.

**Objetivo específico 2: Realización de un modelo experimental que permita la comparación de productos actuales y el desarrollado en esta memoria.**

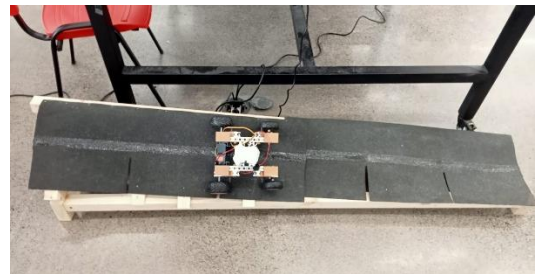
El modelo a escala **1:16** permitió reproducir condiciones controladas de inclinación progresiva (hasta  $36^\circ$ ) y comparar objetivamente el desempeño de los tres sistemas de rueda. El vehículo con **lastre dinámico** mostró un **comportamiento más estable**, manteniendo su trayectoria lineal durante mayor tiempo y resistiendo ángulos superiores antes del deslizamiento o vuelco. Esto confirma la **viabilidad técnica del diseño propuesto** y su potencial aplicabilidad en sistemas de gran escala, como maquinaria agrícola o industrial.

**Objetivo específico 3: Desarrollo de patente.**

El sistema StabiliTyre presenta características estructurales diferenciadoras —modularidad, instalación interna y ajuste gravitacional pasivo— que **lo hacen susceptible de protección mediante patente**. Además, se comprobó su potencial como tecnología complementaria a sistemas de suspensión o tracción ya existentes.

## 10.2 Principales hallazgos

- El **lastre dinámico** mostró un aumento promedio del **17,5% en la distancia máxima recorrida** respecto al sistema sin lastre, y un **7,6% superior** respecto al uso de agua como lastre estático.
- La redistribución automática de masa permitió al sistema **adaptarse a la inclinación lateral** sin comprometer la tracción ni la movilidad del vehículo.
- Se verificó experimentalmente que el **descenso del centro de gravedad** influye directamente en la mejora de la **estabilidad lateral** y en la capacidad de recuperación del equilibrio dinámico.



### 10.3 Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados positivos obtenidos y de la validación preliminar del sistema StabiliTyre, el presente trabajo presenta una serie de **limitaciones inherentes al alcance del proyecto, a la escala utilizada y a las condiciones del experimento**, las cuales es importante reconocer para contextualizar adecuadamente los hallazgos y proyectar futuras etapas de investigación.

#### 1. Limitaciones asociadas al uso de un modelo a escala 1:16

- La extrapolación directa de los resultados a vehículos reales presenta limitaciones debido a que ciertas variables —como la fricción neumática— superficie, la transferencia de masa, la inercia rotacional y la relación centro de gravedad— ancho de vía— **no se escalan linealmente**.
- El modelo RC no replica fielmente las **condiciones de torque, potencia ni masa total** que caracterizan a maquinaria agrícola o industrial, lo cual influye en la

magnitud real de las fuerzas laterales involucradas durante una inclinación o maniobra.

#### 2. Limitaciones del escenario experimental

- La pista construida presenta condiciones **controladas y uniformes**, lo cual facilita la medición, pero no representa completamente la variabilidad del entorno real (irregularidades del terreno, humedad, deslizamientos, vibraciones, cambios de textura, etc.).
- El uso de **teja asfáltica** y ruedas con patrones específicos influyó en la tracción, generando condiciones que podrían diferir de superficies agrícolas o pavimentadas reales.
- El experimento se centró exclusivamente en el comportamiento frente a **inclinaciones laterales progresivas**, sin evaluar otros escenarios relevantes como

curvas dinámicas,  
irregularidades del terreno,  
fuerzas centrífugas o  
maniobras de emergencia.

### 3. Limitaciones mecánicas y constructivas del prototipo

- El peso total del vehículo RC y la resistencia de sus motores restringen el rango de pruebas posibles, obligando a modificaciones y al uso de un modelo mecano, lo cual afecta la continuidad del diseño experimental.
- La calidad y precisión de las piezas fabricadas en impresión 3D, así como la calibración del equipo, introducen **variabilidad dimensional y estructural** que puede influir en el desempeño del péndulo.

### 4. Limitaciones derivadas del carácter exploratorio del estudio

- El diseño adoptado corresponde a un experimento **exploratorio**, no a un análisis

estadístico robusto. Aunque se ejecutaron 30 repeticiones por método, aún se requieren estudios adicionales con un enfoque DOE (Diseño de Experimentos) para determinar con mayor precisión la magnitud del efecto, su variabilidad y su significancia estadística.

- No se evaluaron las condiciones internas del péndulo respecto a fenómenos como **amortiguación, oscilaciones no deseadas** o interacción dinámico–estructural con la rueda en movimiento continuo.
- El estudio no aborda aún el **comportamiento en escenarios operacionales complejos**, como desniveles laterales abruptos, cargas externas, implementos agrícolas.

## 10.4 Pasos Futuros

A partir de los resultados obtenidos y considerando las limitaciones identificadas en el presente estudio, se plantean una serie de líneas de trabajo futuras

1. Se considera fundamental la validación del sistema en condiciones reales y a mayor escala. Si bien el modelo a escala 1:16 permitió comprobar el principio funcional del diseño, la extrapolación a vehículos reales requiere la construcción de prototipos en escalas superiores o su implementación parcial en vehículos operativos. Esta etapa debe contemplar ensayos en terrenos no uniformes, superficies con distintas condiciones de adherencia y escenarios reales de operación, tales como pendientes laterales variables y suelos irregulares.
2. se plantea la optimización del diseño del sistema de lastre dinámico. Esto incluye el estudio de variables como la masa del péndulo, su geometría, los materiales utilizados y la incorporación de mecanismos de amortiguación que permitan controlar posibles oscilaciones no deseadas.

Asimismo, se recomienda avanzar hacia el uso de materiales y procesos de fabricación más representativos de condiciones industriales, superando las limitaciones asociadas a la impresión 3D.

3. Finalmente, resulta necesario abordar el diseño orientado a la manufactura y la implementación comercial. Esto implica la simplificación del sistema, la reducción de costos de producción, la mejora en la facilidad de instalación y el aseguramiento de su resistencia a condiciones ambientales adversas, como humedad, polvo y esfuerzos mecánicos prolongados.

## **10.5 Proyección de Usos Comerciales**

El sistema StabiliTyre presenta un alto potencial de aplicación en diversos sectores donde la estabilidad vehicular constituye un factor crítico de seguridad y desempeño.

En primer lugar, destaca su aplicación en maquinaria agrícola, especialmente en tractores y equipos que operan en terrenos

con pendientes laterales. En este contexto, el sistema podría contribuir significativamente a la reducción de accidentes por vuelco, uno de los principales riesgos en este tipo de operaciones.

Asimismo, el sistema resulta aplicable en vehículos utilizados en la industria minera, donde las condiciones de terreno y las cargas elevadas exigen altos niveles de estabilidad. La incorporación de un sistema de lastre dinámico podría mejorar la seguridad operativa y reducir riesgos asociados a pérdidas de equilibrio.

Otro ámbito relevante corresponde al transporte de carga, particularmente en vehículos de gran altura o con centros de gravedad elevados, como camiones de carga general o cisternas. En estos casos, el sistema podría actuar como complemento a otras soluciones existentes para mejorar la estabilidad lateral.

De igual manera, se identifican oportunidades en vehículos todoterreno y aplicaciones especiales, como el ámbito militar o forestal, donde se requiere operar en condiciones extremas y con alta variabilidad del terreno.

Finalmente, si bien el mercado automotriz convencional representa una posibilidad de aplicación, su adopción implicaría mayores desafíos técnicos y regulatorios, por lo que se considera una línea de desarrollo a más largo plazo.

En conjunto, estas proyecciones evidencian que el sistema StabiliTyre no solo posee viabilidad técnica, sino también un potencial relevante como innovación aplicable a múltiples sectores industriales.

## 10.6 Conclusión general

En síntesis, el experimento confirmó que el **sistema de lastre dinámico StabiliTyre cumple con los objetivos planteados**, demostrando su capacidad para aumentar la estabilidad del vehículo al disminuir el centro de gravedad de forma automática y no invasiva.

La diferencia obtenida en los resultados experimentales constituye una **validación empírica del principio funcional del diseño**, respaldando su **viabilidad técnica, utilidad práctica y potencial de patentabilidad** como innovación aplicable al sector vehicular y maquinaria pesada.

## REFERENCIAS

- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2017). NTP 1.087: Tractor agrícola: prevención del riesgo de vuelco (Notas Técnicas de Prevención, NTP 1.087). INSHT.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2002). *Rollover resistance rating system; notice*. U.S. Department of Transportation.
- Jin, X., Xu, S., Chen, H., & Yang, J. (2020). Rollover stability analysis of vehicles based on lateral load transfer rate. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(9), 3743–3753. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00054-w>
- Li, S. E., Li, G., Wang, J., & Li, K. (2016). *A unified perspective on vehicle rollover prevention control* (arXiv:1608.02266v1). arXiv. <https://arxiv.org/abs/1608.02266>
- Zhang, Y., Liu, H., Wang, Z., & Chen, L. (2025). *Advanced rollover stability control strategy for intelligent vehicles* (arXiv:2503.20705v1). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2503.20705>
- Hong, H., Wang, K., d'Apolito, L., Quan, K. et al., "Anti-Rollover Control for All-Terrain Vehicle Based on Zero-Moment Point," SAE Technical Paper 2024-01-5055,

2024, <https://doi.org/10.4271/2024-01-5055>.

- Luo, H., Chen, Z., Naveen, A., and Li, B., "DYNAMIC MODELING AND PREDICTION OF ROLLOVER STABILITY FOR ALL-TERRAIN VEHICLES," SAE Technical Paper 2024-01-3870, 2020, <https://doi.org/10.4271/2024-01-3870>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023, septiembre 29). *La Conferencia Mundial de la FAO sobre la Mecanización Agrícola Sostenible forja el camino a seguir*. FAO. <https://www.fao.org/newsroom/detail/f>

[ao-global-conference-on-sustainable-agricultural-mechanization-2023-Close/es](#)

## ANEXOS A – [Nombre del Anexo]

En esta sección se debe incluir material complementario que apoye la comprensión del trabajo realizado, pero que pudieran interferir en una clara lectura del documento.

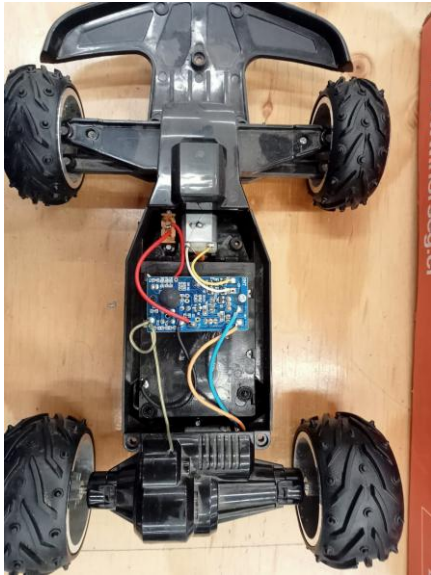
Algunos ejemplos incluyen:

- Entrevistas y testimonios
  - Resultados de pruebas y experimentos
  - Imágenes adicionales del producto desarrollado
  - Códigos de programación
  - Documentos de referencia como normas técnicas
  - Etc.
- (1) National Highway Traffic Safety Administration. (2000). *Consumer Information Regulations; Federal Motor Vehicle Safety Standards; Rollover Prevention*. Federal Register. <https://www.federalregister.gov/documents/2000/06/01/00-13443/consumer-information-regulations-federal-motor-vehicle-safety-standards-rollover-prevention>
  - (2) National Research Council (U.S.). (2002). *The National Highway Traffic Safety Administration's rating system for rollover resistance: An assessment*. Transportation Research Board. <https://nap.nationalacademies.org/read/10308/chapter/4>
  - (3) National Highway Traffic Safety Administration. (2015). *NCAP Rollover Resistance: Fishhook Maneuver Test Procedure*. [https://downloads.regulations.gov/NHTSA-2015-0119-0027/attachment\\_1.pdf](https://downloads.regulations.gov/NHTSA-2015-0119-0027/attachment_1.pdf)
  - (4) Garrott, W. R., Forkenbrock, G. J., & Snyder, R. G. (2005). *Evaluation of a Rollover Resistance Metric Using Consumer Information Testing Results*. NHTSA. <https://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/ESV/Proceedings/19/05-0450-O.pdf>
  - (5) Liu, Y., Peng, H., & Rizzoni, G. (2003). *Evaluation of vehicle dynamics control systems using a side-pull rollover test*. University of Michigan Transportation Research Institute. <https://huei.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/186/2015/02/Evaluation-of-VDC.pdf>
  - (6) National Highway Traffic Safety Administration. (2000). *Consumer Information Regulations; Federal Motor Vehicle Safety Standards; Rollover Prevention*. Federal Register.

<https://www.federalregister.gov/documents/2000/06/01/00-13443/consumer-information-regulations-federal-motor-vehicle-safety-standards-rollover-prevention>

(7)

[https://www.google.com/search?client=opera-gx&q=Estudios+de+la+SAE+\(Society+of+Automotive+Engineers\)&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8](https://www.google.com/search?client=opera-gx&q=Estudios+de+la+SAE+(Society+of+Automotive+Engineers)&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8)



*Ilustración 24 vehículo original de las ruedas utilizadas*



*Ilustración 25 chasis que se utilizó para las primeras pruebas*



*Ilustración 26 iteraciones de las ruedas originales*



*Ilustración 27 primer vehículo de pruebas*



*Ilustración 28 construcción de la pista peraltada*

<b>Criterio</b>	<b>Modelo FBS</b>	<b>Design Thinking</b>	<b>Doble Diamante</b>	<b>TRIZ</b>
<b>Enfoque</b>	Funcional, estructural y analítico	Centrado en el usuario, empático	Exploración de problema y solución	Resolución de problemas técnicos
<b>Origen</b>	Ingeniería y diseño computacional	Diseño industrial y de servicios	Diseño estratégico y creativo	Ingeniería soviética
<b>Tipo de problema</b>	Técnico-estructural	Social, experiencial, innovador	Problemas abiertos o complejos	Contradicciones técnicas
<b>Nivel de abstracción</b>	Medio-alto (función ↔ estructura)	Alto (necesidades humanas)	Alto (problema ↔ solución)	Medio (principios inventivos)
<b>Trazabilidad diseño–función</b>	Muy clara	Baja a media	Media	Media
<b>Iteración técnica fundamentada</b>	Sí (análisis y reformulación lógica)	Sí, pero más desde lo emocional	Sí, pero menos estructurado	Limitada a resolución específica
<b>Formalización de soluciones</b>	Precisa, estructurada	Creativa pero informal	Visual pero general	Técnica pero cerrada
<b>Adecuación a sistemas físicos</b>	Muy alta	Media	Media	Alta

hipotenusa	nada	agua	pendulo
1	111	115	131
2	112	117	130
3	109	120	131
4	116	125	126
5	109	121	128
6	106	118	133
7	104	118	130
8	107	122	129
9	104	116	131
10	115	122	127
11	112	116	128
12	112	123	129
13	108	120	129
14	109	124	127
15	114	122	133
16	102	121	133
17	114	123	134
18	114	124	131
19	115	116	131
20	116	115	126
21	112	115	131
22	111	124	127
23	110	123	129
24	118	125	132
25	104	123	132
26	102	125	127
27	105	117	126
28	109	124	130
29	112	117	133
30	116	123	127
promedio:	110,3	120,5	129,7

Tabla 4 distancias recorridas de las 30 experiencias

cateto a	nada	agua	pendulo
1	11,7	12,1	13,8
2	11,8	12,4	13,7
3	11,5	12,7	13,8
4	12,2	13,2	13,3
5	11,5	12,8	13,5
6	11,2	12,5	14,0
7	11,0	12,5	13,7
8	11,3	12,9	13,6
9	11,0	12,2	13,8
10	12,1	12,9	13,4
11	11,8	12,2	13,5
12	11,8	13,0	13,6
13	11,4	12,7	13,6
14	11,5	13,1	13,4
15	12,0	12,9	14,0
16	10,8	12,8	14,0
17	12,0	13,0	14,1
18	12,0	13,1	13,8
19	12,1	12,2	13,8
20	12,2	12,1	13,3
21	11,8	12,1	13,8
22	11,7	13,1	13,4
23	11,6	13,0	13,6
24	12,5	13,2	13,9
25	11,0	13,0	13,9
26	10,8	13,2	13,4
27	11,1	12,4	13,3
28	11,5	13,1	13,7
29	11,8	12,4	14,0
30	12,2	13,0	13,4
promedio	11,6	12,7	13,7

Tabla 5 alturas alcanzadas de las 30 experiencias

ángulo $\alpha$	6,06			
ángulo $\beta$	83,94			
$\delta$	nada	agua	lastre	
ángulo	25,0	27,0	28,7	

Tabla 6 ángulos obtenidos con trigonometría

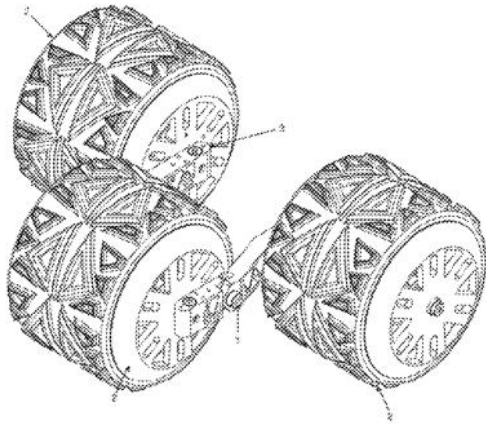


Ilustración 29 D1 Patente US 11,040,747 B2 "United States Patent"

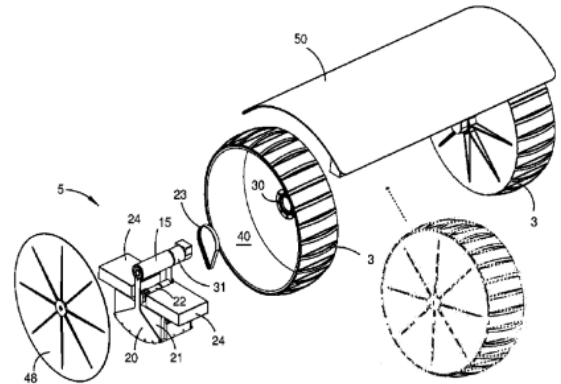


Ilustración 30 D2 Patente US 10,300,783 B2 "United States Patent"