

Universidad de La Habana
Facultad de Matemática y Computación



Sistema instrumental para experimentación a diversas gravedades

Autor: Gustavo Viera López

Tutores: DrC. Ernesto Althsuler Álvarez
DrC. Yudivián Almeida Cruz

Trabajo de Diploma
presentado en opción al título de
Master en Ciencia de la Computación



febrero de 2018

A mi tío Eloy.

Agradecimientos

Si hoy presento esta tesis es gracias al apoyo de muchas personas. Quiere agradecer:

- A Alex Coto, quien me convenció de matricular en este programa de maestría.
- A Antonio Serrano, quien ha colaborado desde el inicio en este y tantos otros proyectos.
- A Alt, por su creatividad infinita, solo comparable con sus cualidades como persona, y por despertar en mí el interés por la ciencia.
- A Yudivián, por las exhaustivas revisiones que convirtieron este documento en una tesis de la cual me siento orgulloso.
- A Joaquín Amigó, quien ha cargado con buena parte del trabajo duro, que no es solo el frenado del cubo.
- A mi cuñado Osmany García, por enseñarme a aprender.
- A mi familia y amigos, por estar ahí siempre.
- A mis profesores, desde la primaria, hasta hoy.
- A quienes han sido mis alumnos o sin serlo, me han concedido el placer de enseñarles algo.

Resumen

Este trabajo presenta un instrumento para la realización de un amplio espectro de experimentos que requieran ajustar la gravedad en pequeños intervalos de tiempo. El instrumento opera sobre una máquina de Atwood construida originalmente para estudiar un fenómeno físico particular. Este trabajo describe el diseño electrónico y computacional propuesto para conferir una gran flexibilidad en cuanto a la naturaleza de los experimentos realizables con el dispositivo. Adicionalmente, se propone y comprueba un modelo para la optimización del tiempo efectivo de experimentos realizados con la técnica empleada en la modificación de la gravedad efectiva. El correcto funcionamiento del instrumento se verifica mediante su empleo para el estudio de rodadura sobre medios granulares a la gravedad de Marte.

Abstract

This work introduces an instrument for a wide spectrum of experiments on gravities other than our planet's for short time intervals. The instrument operates as part of an Atwood machine originally build for the study of a specific physical phenomena. This thesis describes the electronic and computational design proposed to offer flexibility to the nature of the experiments that may be performed with the instrument. Additionally, a model for the optimization of the effective time of the experiments developed with this technique is proposed and tested. The performance of the instrument is evaluated through the study of the efficiency of a wheel rolling over granular materials at Martian gravity.

Índice general

Introducción	x
1. Fundamentos de la Experimentación a Diversas Gravedades	1
1.1. Métodos empleados para alterar la g_{eff}	1
1.1.1. Vuelos Parabólicos	2
1.1.2. Torres de Lanzamiento	3
1.1.3. Centrifugadoras	4
1.1.4. Máquinas de Atwood	5
1.2. Comparación del equipamiento existente	7
1.3. Conclusiones Parciales	8
2. Diseño Físico del Sistema Experimental: Lab-in-a-Bucket	9
2.1. Montaje Experimental Original	9
2.2. Lab-in-a-bucket	10
2.2.1. Diseño del Mecanismo de Operación	11
2.2.2. Elementos Mecánicos	11
2.2.3. Elementos Electrónicos	14
2.3. Conclusiones Parciales	16
3. Diseño del Sistema Computacional	18
3.1. Materiales y Métodos	19
3.2. Fase de Acción Previa a los Experimentos	20
3.2.1. Configuración de Red	20
3.2.2. Drivers de Sensores	20
3.2.3. Drivers de Actuadores	22
3.2.4. Configuración del Experimento	23
3.3. Fase de Acción Durante los Experimentos	24
3.3.1. Adquisición de Datos	24
3.3.2. Gestión de Eventos	25

3.4.	Fase de Acción Posterior a los Experimentos	25
3.4.1.	Preprocesador de Datos	25
3.4.2.	Logger de Datos	26
3.4.3.	Scripts de Postprocesamiento	26
3.4.4.	Gestión de Datos Almacenados	27
3.5.	Interfaz de Usuario	27
3.6.	Conclusiones Parciales	29
4.	Detección de la Estabilización en la g_{eff}	30
4.1.	Caracterización de un experimento típico	30
4.2.	Formulación del problema de clasificación	31
4.2.1.	Transición de <i>Detenido</i> a <i>Iniciado</i>	32
4.2.2.	Transición de <i>Iniciado</i> a <i>Estable</i>	34
4.2.3.	Transición de <i>Estable</i> a <i>Frenado</i>	35
4.2.4.	Resumen del Algoritmo de Clasificación	35
4.3.	Obtención de los parámetros requeridos en la clasificación mediante la solución de un problema de optimización	37
4.3.1.	Función de error 1	37
4.3.2.	Función de error 2	39
4.4.	Conclusiones Parciales	41
5.	Caso de Estudio: Rodadura Sobre Medios Granulares	42
5.1.	Montaje experimental	43
5.2.	Principio de las mediciones	44
5.3.	Escalamiento de los parámetros	45
5.4.	Experimentación y Resultados	45
5.5.	Conclusiones Parciales	52
Conclusiones		53
Recomendaciones		55
Bibliografía		56

Índice de figuras

1.1.	Fragmento de trayectoria descrita por avión de gravedad cero	2
1.2.	Torre de Lanzamiento	3
1.3.	Máquina centrifugadora	4
1.4.	Máquina de Atwood	6
1.5.	Comparación de los métodos analizados	8
2.1.	Elementos físicos del montaje experimental original	10
2.2.	Tiempos máximos de duración de experimentos	12
2.3.	Diagrama del sistema mecánico	13
2.4.	Gravedad efectiva en un experimento a 0.4 g	13
2.5.	Esquema de elementos y conexiones electrónicas	14
2.6.	Computadora de una placa Raspberry Pi 3	15
2.7.	Componentes Electrónicos fijos a la tapa del cubo	16
3.1.	Composición del Sistema Computacional.	18
3.2.	Configuración de un nuevo experimento.	28
3.3.	Previsualización de datos obtenidos	29
4.1.	Aceleración normalizada a g relativa al cubo.	31
4.2.	Clasificación de muestras de la señal de aceleración	32
4.3.	Evaluación de la clasificación automática con la función 1 . .	39
4.4.	Evaluación de la clasificación automática con la función 2 . .	40
5.1.	Experimento para evaluar la rodadura sobre medios granulares	43
5.2.	Rodadura sobre arena a la gravedad de Marte	46
5.3.	Experimentos con igual masa a gravedad terrestre	47
5.4.	Comparación de rodaduras a igual masa	48
5.5.	Experimentos con igual peso a gravedad terrestre	50
5.6.	Comparación de rodaduras a igual peso	51

Índice de tablas

1.1.	Comparación de los métodos analizados	7
4.1.	Rango de valores admisibles de los parámetros en la clasificación	37
4.2.	Resultados de la optimización (función 1)	38
4.3.	Resultados de la optimización (función 2)	39
4.4.	Resultados generales de la optimización	40

Introducción

El desarrollo de instrumental científico es una tarea que involucra a varias ramas del conocimiento. Investigadores e ingenieros han de trabajar juntos para cumplir con las exigencias experimentales impuestas por el fenómeno a estudiar. Pero los retos científicos no son los únicos en el diseño de instrumentos. Los equipos de medición actuales cuentan, generalmente, con mecanismos para la gestión remota de características, comunicaciones inalámbricas, interfaces de acceso para dispositivos móviles y computadoras personales, entre otras prestaciones que aportan valor agregado.

Durante el proceso de investigación es usual que científicos de países en desarrollo se vean forzados a depender de instrumental que es inaccesible o costoso. Para afrontar esta situación, es usual construir, con los recursos disponibles, montajes experimentales que permitan medir las variables de interés [1, 2, 3]. Estos montajes experimentales son, generalmente, poco flexibles y limitados en cuanto a la cantidad de parámetros que se pueden variar y la facilidad con que se logra variarlos.

Motivación

El estudio de fenómenos físicos complejos sometidos a gravedades diferentes que la de la Tierra es un ejemplo de campo donde el instrumental que se suele utilizar es altamente costoso e ineficiente [4]. En 2010, la agencia espacial norteamericana NASA¹ perdió el control del *rover Spirit* al quedar atascado en una duna de arena mientras exploraba la superficie del planeta rojo [5]. Durante meses, los científicos de la agencia espacial intentaron recrear las condiciones en nuestro planeta para simular el comportamiento experimentado por el robot ante determinadas acciones. Sin embargo, no se logró liberar a *Spirit* de su atasco. Este hecho motivó numerosas investigaciones sobre la dinámica de los medios granulares sometidos a gravedades

¹Siglas en inglés provenientes de *National Aeronautics and Space Administration*

distintas a la de la Tierra.

Contar con un instrumento que permita recrear, con exactitud y simplicidad, las condiciones gravitacionales presentes en otros planetas representa una ventaja considerable para el estudio de numerosos fenómenos. Hasta el momento, ninguno de los métodos desarrollados son prácticos para el uso frecuente [4].

Antecedentes y Problemática

En la Facultad de Física de la Universidad de La Habana se diseñó un montaje experimental para el estudio de la penetración de intrusos en medios granulares sometidos a diversas gravedades [6]. Mediante este montaje se obtuvieron resultados científicos relevantes que demostraron las potencialidades del método para modificar la gravedad efectiva (g_{eff}). Sin embargo, el montaje experimental propuesto se limitaba a la realización de un único tipo de experimentos. La modificación, incluso parcial, de dicho experimento implicaba realizar cambios significativos en el sistema electrónico y el sistema de envío de datos empleados.

Basado en el mismo principio usado en el montaje experimental descrito por Altshuler *et al.* [6], es posible construir un instrumento que permita realizar una amplia gama de experimentos donde la gravedad sea un parámetro ajustable. Para aumentar la flexibilidad de este hipotético instrumento, sería importante incluir un mecanismo de fácil interacción que permita modificar la naturaleza de los experimentos sin mucho esfuerzo.

Mediante la automatización de los procesos de captura, registro y procesamiento de datos es posible optimizar el tiempo efectivo de los experimentos y aumentar la tasa de experimentos satisfactorios. Adicionalmente, surge la posibilidad de realizar procesamiento sobre los datos a la par de que están siendo adquiridos.

Hipótesis

Si se integra en una máquina de Atwood un sistema computacional que permite la detección automática de la gravedad y la captura y procesamiento de información de múltiples sensores, entonces es posible implementar un instrumento científico que permita la realización de experimentos de diversas naturalezas con la posibilidad de ajustar la g_{eff} .

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es diseñar y construir un instrumento científico, basado en el empleo de una máquina de Atwood, que permita la realización de experimentos de diversas naturalezas a distintas gravedades.

Para cumplir el objetivo general se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los fundamentos físicos de los métodos que permiten la modificación de la gravedad efectiva.
- Seleccionar los componentes electrónicos necesarios para la construcción del instrumento.
- Diseñar y programar un sistema computacional que permita la gestión de los datos obtenidos en los experimentos y la variación de manera controlada de los parámetros de interés según la naturaleza del experimento.
- Implementar un algoritmo de procesamiento de datos en tiempo real que permita maximizar el tiempo útil de los experimentos.
- Ejemplificar el funcionamiento del instrumento mediante su empleo para el estudio de rodaduras sobre medios granulares a la gravedad de Marte.

Estructura del Documento

Este documento se encuentra dividido, para su mejor comprensión, en una Introducción y cinco capítulos más. En el primer capítulo se profundiza en los fundamentos físicos empleados hasta el momento para modificar la gravedad durante intervalos de tiempo. El segundo capítulo detalla el diseño del sistema propuesto, abordando las características mecánicas y de hardware. El tercer capítulo se dedica a presentar la estructura del sistema computacional que rige el comportamiento del instrumento. En el cuarto capítulo se describe el algoritmo diseñado para detectar cambios en la g_{eff} de forma automática y aumentar el tiempo efectivo promedio de los experimentos. En el quinto capítulo se ejemplifica el uso del instrumento para estudiar la rodadura sobre medios granulares y se realiza la validación del sistema. Por último, se agregan las secciones de conclusiones, recomendaciones y la bibliografía consultada.

Capítulo 1

Fundamentos de la Experimentación a Diversas Gravedades

Establecer de forma experimental valores estables de g_{eff} distintos a los del planeta es un problema complejo. Se han estudiado diferentes enfoques que han permitido lograrlo aunque con marcadas limitaciones en cuanto al tiempo, el costo y el rango de valores de gravedades alcanzables. Desde el año 2009 se ha promovido el empleo de varios de estos métodos en el desarrollo de investigaciones de maestría y doctorado [7]. Hasta el momento, ninguno de los métodos desarrollados son prácticos para el uso frecuente [4].

1.1. Métodos empleados para alterar la g_{eff}

En general, los métodos reportados en la literatura se basan en aplicar otras fuerzas, además de la Fuerza de Gravedad a un sistema de referencia no inercial. Esto provoca que la aceleración que experimenten los cuerpos, respecto al marco de referencia no inercial, dependa de las otras fuerzas externas. Por tanto, modificando las fuerzas externas, es posible lograr un comportamiento similar al efecto de variar la Fuerza de Gravedad. A continuación se explican algunos de los métodos empleados en la literatura, haciendo énfasis en sus principales ventajas y limitaciones.

1.1.1. Vuelos Parabólicos

Los vuelos parabólicos son el método más empleado para alterar la g_{eff} [7]. Han sido usados para el entrenamiento de astronautas, investigaciones científicas e, incluso, para filmaciones de escenas de películas donde se precisa de ingravidez. Su funcionamiento se basa en acelerar un avión hasta alcanzar una altura y una velocidad que permitan eliminar la tracción provocada por las turbinas. Una vez apagadas las turbinas, el avión cae en caída libre describiendo la trayectoria de un proyectil. Cuando el avión va en descenso con un ángulo de aproximadamente 30 grados, se procede a elevar su altitud nuevamente para repetir la maniobra, y desarrollar varias trayectorias parabólicas en el mismo vuelo.

Mientras el avión describe la trayectoria parabólica (Ver línea discontinua en la Figura 1.1) está siendo sometido, exclusivamente, a la fuerza de gravedad que provoca en él una aceleración constante, aproximadamente igual a la aceleración gravitatoria percibida en la superficie de la Tierra. En este intervalo de tiempo, los cuerpos que se encuentran en el avión también están siendo acelerados según la misma fuerza respecto a la Tierra. Al estar ambos, el avión y los cuerpos en su interior, acelerados con la misma aceleración respecto al suelo y sin la presencia de otras fuerzas externas, se logra la sensación de ingravidez producto de que no existe una aceleración de estos cuerpos respecto al avión que los contiene.

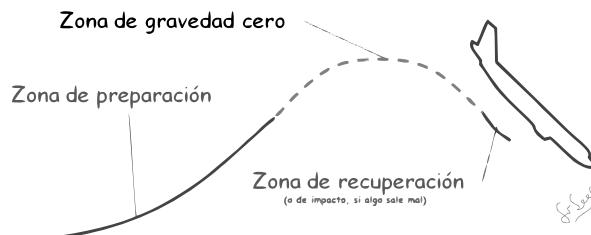


Figura 1.1: Fragmento de trayectoria descrita por un avión de gravedad cero. La Línea discontinua denota el tramo donde la g_{eff} en el interior del avión es aproximadamente cero.

Este método ha sido exitoso en el desarrollo de experimentos a gravedad cero por tiempos de aproximadamente 20 segundos, que son relativamente altos comparados con otros métodos [8]. Sin embargo, este método es alta-

mente costoso y está diseñado para recrear la gravedad cero aunque, con vuelos de geometría más compleja, es posible alcanzar otros valores de g_{eff} que no son necesariamente estables en el tiempo.

1.1.2. Torres de Lanzamiento

Las Torres de Lanzamiento se basan en arrojar una cápsula, que contiene el experimento que se va a realizar, desde una altura que permita acelerarla durante el tiempo suficiente para obtener los resultados (Ver Figura 1.2a). Durante el tiempo en el que la cápsula se encuentra en el aire, los elementos en su interior no presentan una aceleración respecto a esta pues ambos caen con la misma aceleración respecto al suelo. De ahí que la g_{eff} en el interior de la cápsula sea aproximadamente cero.

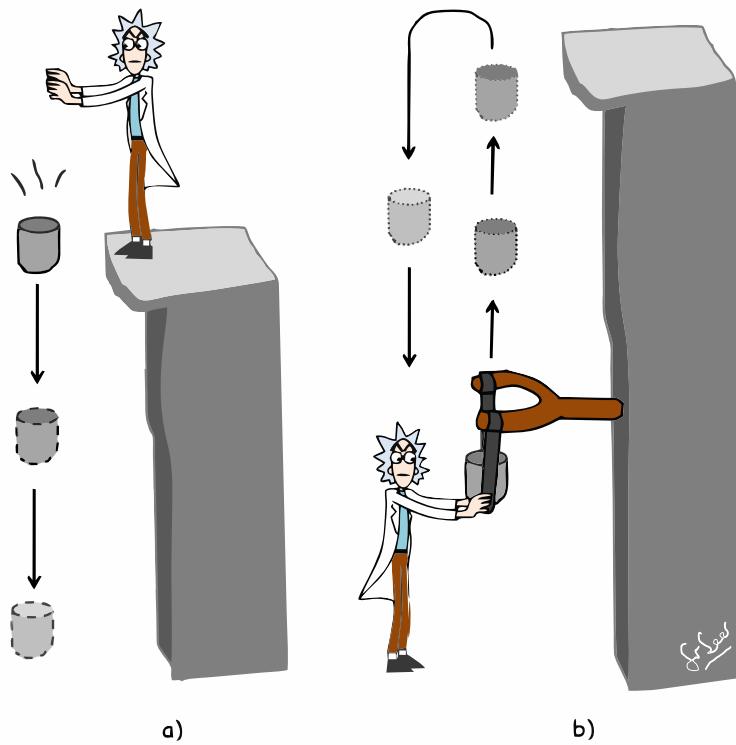


Figura 1.2: Torre de Lanzamiento. a) Cápsula arrojada desde el tope. b) Cápsula catapultada desde el suelo

Con este método también se puede emplear un mecanismo para catapultar la cápsula desde la planta baja, en lugar de arrojarla desde lo más alto de la torre (Figura 1.2b). Con esto se logra que el tiempo de experimento sea el doble aproximadamente. Por ejemplo, la Torre de lanzamiento Zarm en Bremen, Alemania, permite realizar estudios durante 4.74 segundos si la cápsula es arrojada, y de hasta 9.3 segundos si se catapulta la cápsula desde el suelo. La instalación consta de una torre de 146 metros de altura con un conducto de acero en su interior diseñado para conducir la cápsula que es lanzada [9].

Este método está limitado a experimentos donde la g_{eff} deseada sea cero, requiere de una instalación costosa y los tiempos efectivos de experimentos son inferiores a los logrados con vuelos parabólicos.

1.1.3. Centrifugadoras

Otra alternativa para variar la g_{eff} son las máquinas centrifugadoras. Su funcionamiento se basa en hacer rotar la cápsula que contiene el experimento. Durante la rotación se genera una fuerza centrífuga hacia la superficie exterior de la cápsula (Ver Figura 1.3).

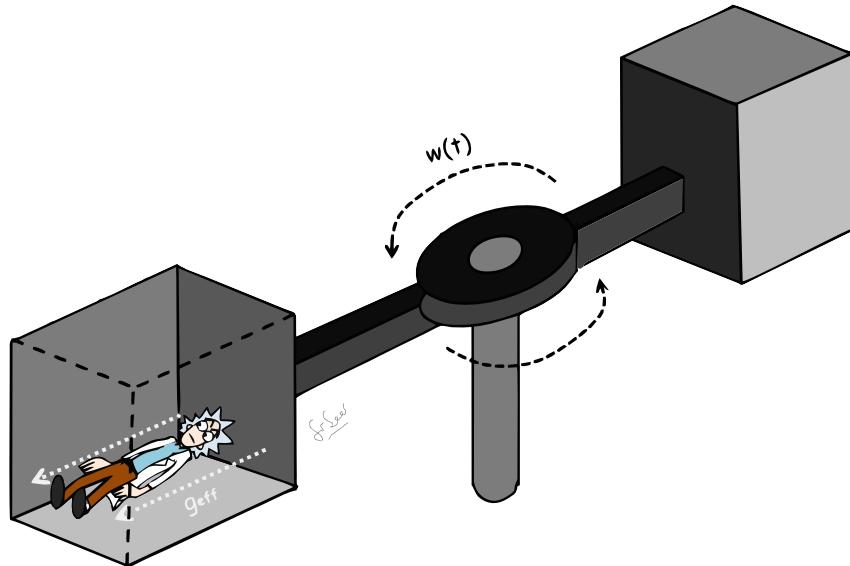


Figura 1.3: Máquina centrifugadora

Ajustando la velocidad de rotación (w) es posible ajustar el valor de la fuerza centrífuga. Esta fuerza centrífuga ajustable puede ser usada para recrear la g_{eff} dentro de la cápsula según la ecuación:

$$g_{\text{eff}} = w^2 r \quad (1.1)$$

donde:

- w es la velocidad angular de rotación
- r es la distancia de la cápsula al eje de rotación

Este método permite alcanzar gravedades efectivas superiores a la gravedad terrestre durante intervalos de tiempo relativamente altos. Por ejemplo, la centrifugadora holandesa de Noordwijk alcanza valores en el rango de 1 a 20 veces la gravedad de la Tierra durante tiempos de más de 60 segundos [10].

El principal inconveniente del método radica en la imposibilidad de emplearlo para valores de gravedad menores que la de la Tierra.

1.1.4. Máquinas de Atwood

La Máquina de Atwood es un sistema compuesto por dos masas unidas por un cable y una polea (ver Figura 1.4). Fue diseñada originalmente para verificar las leyes de movimiento de cuerpos sometidos a aceleraciones constantes.

Las máquinas de Atwood han sido empleadas en algunos estudios físicos con el objetivo de modificar la gravedad [11, 6, 12]. Para ello se emplea, como una de las masas, una cápsula que contiene el experimento, mientras que la otra masa es un contrapeso que sirve para ajustar la aceleración de todo el sistema. Como método, ha dado buenos resultados aunque en intervalos de tiempo limitados.

La g_{eff} percibida dentro de la cápsula, g_{eff} , puede ser calculada como la diferencia entre la aceleración gravitacional en la Tierra y la aceleración con que se mueven ambas masas en la Máquina de Atwood (**a** en la Figura 1.4). Mientras el sistema está en movimiento, la g_{eff} varía según la fórmula:

$$g_{\text{eff}} = g \left[1 - \frac{m_b - m_{cw}}{m_b + m_{cw}} \right] \quad (1.2)$$

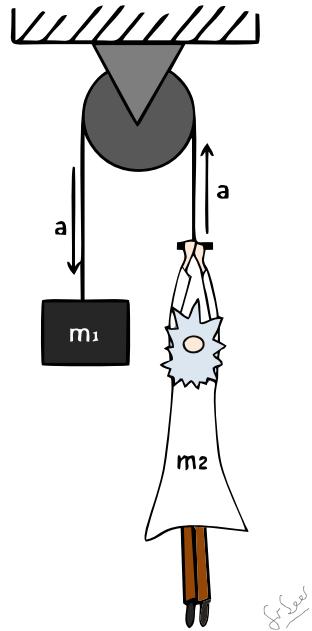


Figura 1.4: Máquina de Atwood

donde:

- $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$
- m_b es la masa de la cápsula
- m_{cw} es la masa del contrapeso

Nótese que, para el caso en que $m_{cw} = 0$, se obtiene $g_{\text{eff}} = 0$ y el resultado será idéntico al que se obtendría con una torre de lanzamiento.

Alterando la masa del contrapeso, la cápsula se puede configurar para que suba o baje, recreando gravedades mayores o menores que la de la Tierra, respectivamente. El límite en la duración de los experimentos depende de la altura de la polea y la g_{eff} deseada. La ecuación 1.3 muestra la duración máxima posible en función de ambos parámetros.

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{2h}{|g - g_{\text{eff}}|}} \quad (1.3)$$

Este método permite alcanzar un amplio rango de valores de g_{eff} . Es posible lograr gravedad cero de forma similar a como se logra con las torres de lanzamiento y, a su vez, también es posible alcanzar gravedades superiores a la de la Tierra, aunque no en un rango tan amplio como las centrifugadoras. Sin embargo, con las Máquinas de Atwood es posible lograr valores de gravedad entre cero y g , los cuales no son alcanzables con ninguno de los métodos explicados anteriormente. El principal inconveniente del método es el limitado tiempo efectivo de los experimentos.

Solo hay una instalación reportada que permite modificar la gravedad siguiendo este principio, descrita en el trabajo de Sunday *et al.* [12]. En el trabajo de Altshuler *et al.* se emplea el mismo método para estudiar la penetración de intrusos en medios granulares a diversas gravedades [6]. El montaje experimental desarrollado muestra muy buen desempeño en cuanto a la estabilidad de la g_{eff} , pero brinda muy poca flexibilidad en cuanto a modificaciones respecto al experimento original.

1.2. Comparación del equipamiento existente

Entre los cuatro métodos expuestos anteriormente, es posible notar que las principales diferencias radican en el costo, el tiempo efectivo de experimento y el rango de gravedades efectivas que pueden ser alcanzadas. La Tabla 1.1 muestra un resumen comparativo de los métodos descritos anteriormente.

Tabla 1.1: Comparación de los métodos analizados

Método	g_{eff}	Costo	Duración
Vuelos Parabólicos	0 g	muy alto	alta
Torres de Lanzamiento	0 g	muy alto	baja
Centrifugadoras	$\geq 1g$	alto	muy alta
Máquina de Atwood (Sunday <i>et al.</i>)	0 g - 1 g	bajo	baja
Máquina de Atwood (Altshuler <i>et al.</i>)	0.4 g - 1.2 g	muy bajo	baja

En la Figura 1.5 se muestran los valores de g_{eff} alcanzables mediante cada uno de los métodos.

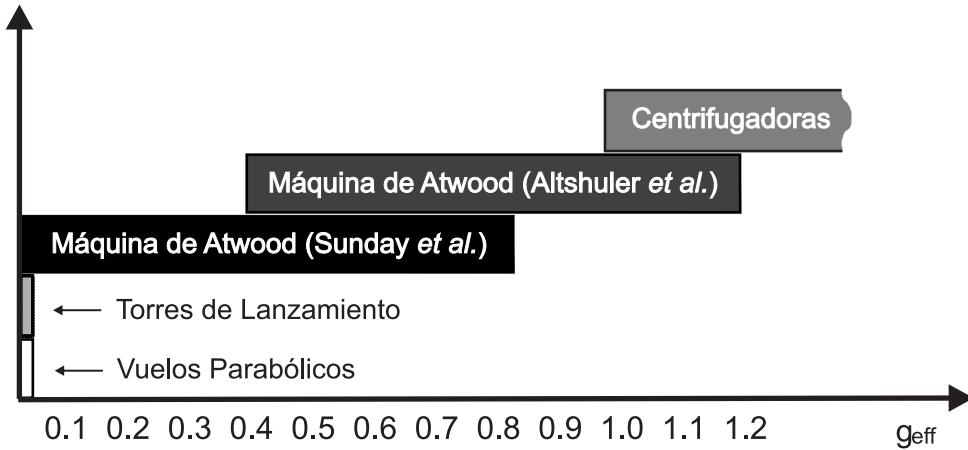


Figura 1.5: Comparación en cuanto al rango de valores alcanzables de g_{eff} para los métodos analizados.

1.3. Conclusiones Parciales

Luego de analizar los métodos existentes para la variación de la gravedad, es posible notar que no existe una solución general al problema. Por ejemplo, para el rango de valores de g_{eff} entre 0 y g solo es posible emplear Máquinas de Atwood, mientras que para gravedades superiores a g solo es posible utilizar centrifugadoras.

De las variantes reportadas en la literatura, el montaje experimental utilizado por Altshuler *et al.* para el estudio de un fenómeno físico particular permite recrear la g_{eff} de planetas tan diferentes como Urano (1.17 g) y Marte (0.4 g) [6]. Ningún otro de los métodos empleados brinda tal flexibilidad. Tal bondad podría ser mejor explotada si se emplea un instrumento que permita realizar diversos tipos de experimentos como parte del sistema original.

Capítulo 2

Diseño Físico del Sistema Experimental: Lab-in-a-Bucket

El montaje experimental para variar la gravedad presentado por Altshuler *et al.* en 2014, para el caso específico de las colisiones a bajas velocidades en medios granulares, demostró ser muy efectivo en cuanto al rango de gravedades que permite recrear. Sin embargo, presenta algunas limitaciones para ser usado de forma genérica. Las limitaciones se deben en su mayoría a su concepción como un montaje experimental para mediciones específicas.

2.1. Montaje Experimental Original

El experimento presentado por Altshuler *et al.* en 2014 es la principal motivación de este trabajo. Los autores emplearon una máquina de Atwood para modificar la g_{eff} en el interior de un cubo que era empleado como una de las masas de la máquina. El propósito del sistema era permitir el estudio de la penetración de un intruso en medios granulares [6]. Los autores liberaban una esfera mientras el cubo, parcialmente lleno de un medio granular, se encontraba en movimiento. Para ello empleaban un actuador magnético controlado remotamente vía bluetooth. Luego, la esfera impactaba el medio granular y penetraba una distancia que luego era medida integrando las mediciones de un acelerómetro contenido en la esfera. Un diagrama del sistema empleado se muestra en la Figura 2.1.

Por otra parte, para la realización de estas mediciones se requería el empleo de dos computadoras de forma simultánea. Una para medir los datos

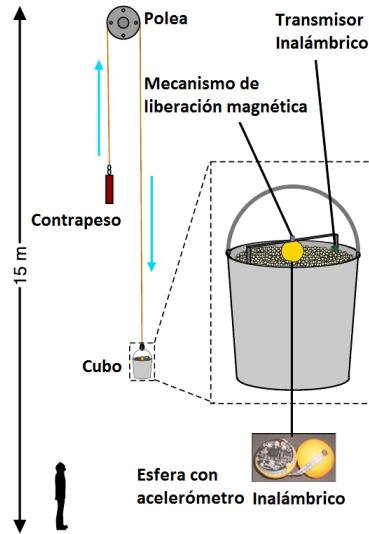


Figura 2.1: Elementos físicos del montaje experimental original. Tomado íntegramente de [6]

de los acelerómetros de la esfera y el cubo, y otra para controlar la acción del mecanismo de liberación de la esfera. Esto se debía a que los componentes electrónicos no estaban siendo controlados de forma unificada por un sistema programable a bordo del cubo y se empleaba en su lugar un estándar de comunicación inalámbrica para cada dispositivo empleado.

Con este sistema era imposible realizar experimentos de otra naturaleza sin modificar una parte considerable del diseño electrónico. Adicionalmente, requería de una cantidad innecesaria de equipos de cómputo, en gran medida por la diversidad de protocolos de comunicación empleados por los componentes.

2.2. Lab-in-a-bucket

A continuación se presentan una serie de cambios en el diseño mecánico y electrónico, que permiten emplear este sistema en un amplio espectro de experimentos científicos. La solución desarrollada se denomina Lab-in-a-Bucket. Esta emplea el mismo principio mecánico descrito en el artículo original [6] pero la electrónica se rediseñó completamente. La componente digital de este instrumento permite que muchos de los parámetros ajustables

sean configurables e incluye, además, una gran diversidad de sensores y brinda herramientas para posibilitar la personalización y ejecución de los experimentos. A continuación se describen los detalles del montaje experimental original y, seguidamente, los principales elementos mecánicos y electrónicos que componen al nuevo instrumento.

2.2.1. Diseño del Mecanismo de Operación

Para lograr modificar la gravedad efectiva, se debe seguir un procedimiento que garantice el correcto funcionamiento del instrumento. En el caso de las máquinas de Atwood es necesario comenzar por llenar el contrapeso con la masa adecuada para obtener la g_{eff} deseada. Luego, se deben configurar los parámetros relativos al experimento que se quiera desarrollar. Seguidamente, el cubo y el contrapeso se han de colocar en la Máquina de Atwood y sostener todo el sistema frenando la polea hasta que se detengan las oscilaciones. Entonces, es posible comenzar la captura de información de los sensores y a continuación soltar la polea. Finalmente, es necesario detener al cubo antes de impactar el suelo y obtener los datos provenientes de los sensores para ser analizados.

Mientras un experimento ocurre, se deben obtener muestras de las señales de los sensores a intervalos periódicos de tiempo. La información que está siendo adquirida debe ser almacenada al final de cada experimento. Adicionalmente, a medida que se va adquiriendo debe estar disponible para ser procesada por algoritmos de tiempo real. Un ejemplo sería el algoritmo necesario para determinar la estabilización de la g_{eff} mediante el procesamiento de las mediciones tomadas por el acelerómetro.

Una vez terminado un experimento toda la información se debe almacenar en un medio persistente. Información adicional del experimento se puede obtener con el procesamiento posterior de la información obtenida. Por ejemplo, si se ejecuta un algoritmo de seguimiento (*tracking*) sobre las imágenes tomadas con la cámara, se podría obtener la posición de objetos en movimiento respecto al cubo.

2.2.2. Elementos Mecánicos

El diseño mecánico de una Máquina de Atwood es relativamente simple. El parámetro más importante que se debe seleccionar es la altura de la polea, ya que esta determina el tiempo efectivo de los experimentos. La Figura 2.2 muestra el tiempo de duración de experimento, calculado con la ecuación 1.3, en función de la altura de la polea, para varios valores de g_{eff} .

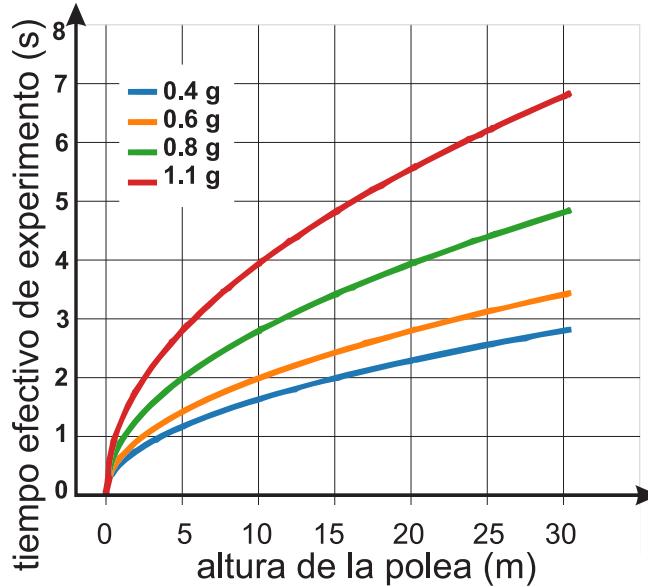


Figura 2.2: Gráfica de tiempo de duración de experimento en función de la altura para varias gravedades efectivas.

En la Figura 2.2 se puede observar que, para los incrementos de altura iniciales, el crecimiento de tiempo efectivo es mucho más marcado. Sin embargo, a partir de los 10 m el tiempo efectivo de experimento cambia cada vez más lento en función de la altura, aunque siempre se mantiene aumentando. Esto implica que, mientras más se eleve la polea, menos significativo será el incremento en la duración de los experimentos.

El valor teórico expresado en la ecuación 1.3 no tiene en cuenta los intervalos de tiempo empleados en la estabilización de la g_{eff} , o el tiempo requerido para frenar el sistema antes de que la cápsula impacte el suelo (o la polea, en caso de que se esté moviendo hacia arriba para alcanzar $g_{\text{eff}} > g$). Para tener en cuenta esta diferencia se seleccionó 15 m como altura de la polea.

La Figura 2.3 muestra el sistema compuesto por una Máquina de Atwood de 15 m, donde una de las masas es un cubo equipado con herramientas de medición y la otra es un contrapeso para ajustar la aceleración de todo el sistema.

La g_{eff} a lo largo de un experimento diseñado para recrear las condiciones del planeta Marte se muestra en la Figura 2.4. Nótese que el tiempo de

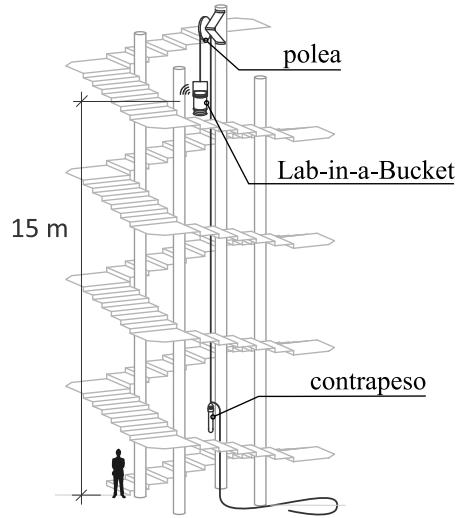


Figura 2.3: Diagrama del sistema con el Lab-in-a-Bucket cayendo como una de las masas de la Máquina de Atwood.

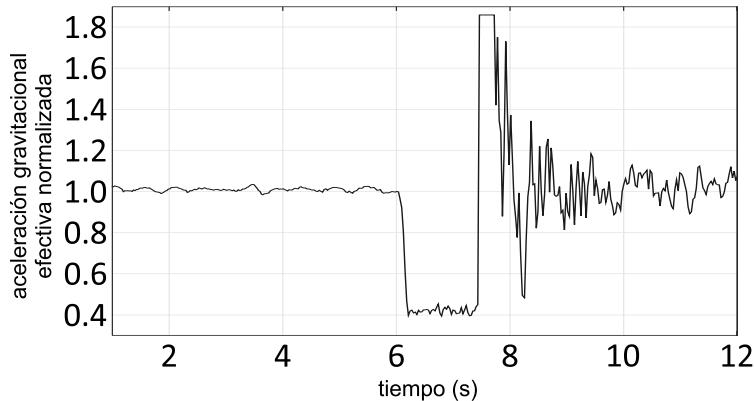


Figura 2.4: Dependencia temporal de la aceleración “sentida” dentro del cubo normalizada usando la aceleración en la superficie de la Tierra. El gráfico muestra datos sin procesar obtenidos de un acelerómetro, demostrando la excelente estabilidad del sistema. Nótese que la región plana entre 6.15 s y 7.46 s corresponde a la aceleración gravitacional de la superficie de Marte (0.4 g).

duración en la región de interés es de 1.31 s, el cual es considerablemente menor que el máximo teórico (2.26 s) obtenido con la ecuación 1.3. Esta diferencia de tiempos es el precio que se paga por la precisión en la g_{eff} mientras el cubo está en movimiento.

2.2.3. Elementos Electrónicos

La electrónica del instrumento fue diseñada desde cero bajo el precepto de que fuese simple y escalable. El esquema de conexiones y elementos propuesto para la electrónica del sistema se muestra en la Figura 2.5.

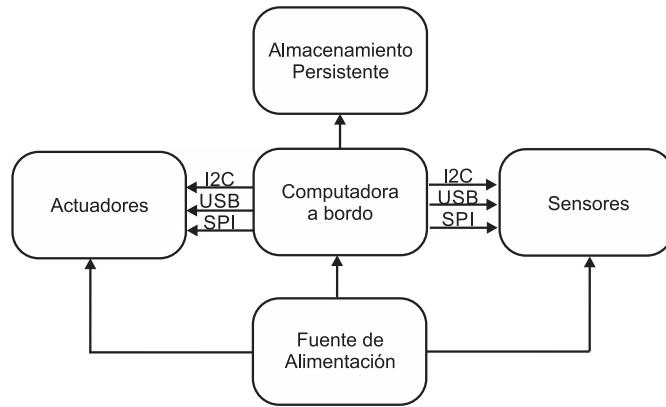


Figura 2.5: Esquema de elementos y conexiones electrónicas. Cada bloque funcional debe ser implementado con circuitos electrónicos que realicen el funcionamiento requerido en cada caso.

A continuación se presentan los principales componentes seleccionados como parte del diseño electrónico del instrumento. La idea base fue seleccionar componentes digitales que puedan variar su funcionamiento vía *software* para facilitar la adaptación de nuevos experimentos.

Computadora a bordo

Como computadora se seleccionó una placa Raspberry Pi 3 modelo B (Figura 2.6). Esta sería la encargada del manejo de la lectura de los sensores, la comunicación inalámbrica con dispositivos externos al cubo vía WiFi, el pre-procesamiento de los datos y la ejecución de algoritmos durante los experimentos. Esta placa es compatible con sensores y actuadores que implementen los protocolos de comunicación USB, I2C, SPI o UART.



Figura 2.6: Computadora de una placa Raspberry Pi 3

Sensores

Los sensores son los encargados de captar información referente a variables físicas y traducirlas a valores numéricos que puedan ser interpretados por seres humanos. Como se desea construir un instrumento de propósito general, se deben incluir sensores de distintas naturalezas para aumentar el espectro de experimentos realizables con el dispositivo.

Para medir la aceleración y la información de giro triaxial se empleó un circuito integrado MPU-6050 [13]. La presión y la temperatura dentro del cubo se capturan mediante un circuito BMP180 [14]. El campo magnético es medido usando el sensor HMC-5883L[15]. Todos estos sensores son muestrados cada 8 ms, para aprovechar la mínima demora entre muestras que permite el fabricante. Se incluyó, además, una cámara en la tapa, capaz de grabar a 25 FPS a una resolución de 800×600 píxeles.

Actuadores

Los actuadores son los dispositivos encargados de alterar variables físicas según se requiera. Ejemplos típicos son los motores, las fuentes de iluminación, los hornos, etc. En el caso del experimento original descrito por Altshuler *et al.*, el único actuador compatible era el mecanismo de soltar al intruso que impactaría el medio granular.

Para lograr flexibilidad en la cantidad de experimentos posibles, se empleó una placa dedicada al control de actuadores. Esta placa es basada en Arduino Uno y permite el control de motores de corriente directa, servomotores, LEDs y es posible extender su funcionamiento mediante un *software* que se ejecuta en el microcontrolador de Arduino.

Otros Componentes

Para garantizar una iluminación homogénea se incluyeron LEDs en el interior del cubo de tal suerte que garantizaran una invarianza en la iluminación promedio de las imágenes capturadas con la cámara.

Adicionalmente, el instrumento cuenta con fuentes de alimentación para proveer energía a los dispositivos electrónicos. Se incluyó un *PowerBank* de 5 V para alimentar la computadora y sensores. En caso de requerir dispositivos de mayor consumo como motores, se incluyó una batería de 12 V que también es usada para energizar el mecanismo de iluminación.

La Figura 2.7 muestra un dibujo con todos los componentes mencionados a lo largo de la sección 2.2.3 posicionados en la tapa del instrumento.

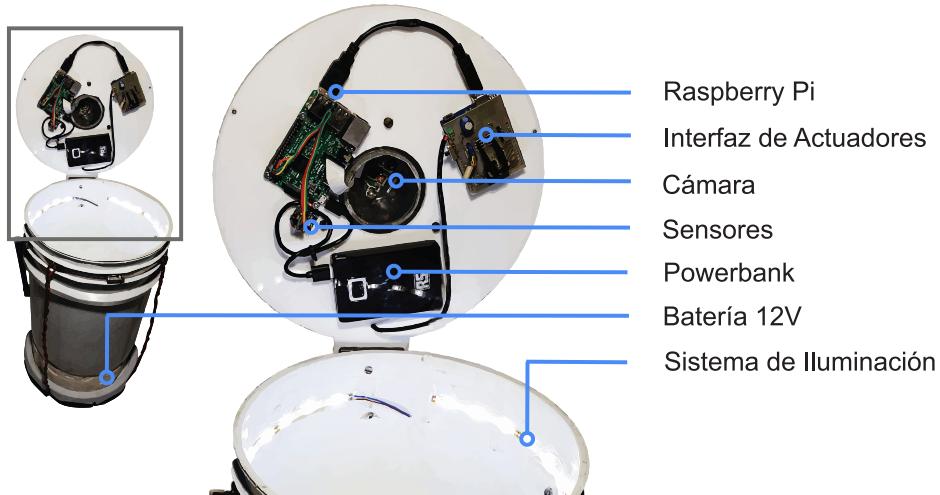


Figura 2.7: Componentes Electrónicos fijos a la tapa del cubo. La tapa se cierra antes de comenzar un experimento

2.3. Conclusiones Parciales

El instrumento diseñado es capaz de medir diversas variables físicas durante experimentos a gravedad ajustable. Su naturaleza digital permite ajustar vía *software* la configuración de los sensores y el comportamiento de los actuadores.

Para lograr un máximo aprovechamiento de los recursos disponibles es necesario implementar un sistema computacional que permita gestionar los datos recopilados en los experimentos así como la configuración del instrumento.

Capítulo 3

Diseño del Sistema Computacional

Una vez concluido el diseño físico del instrumental, es necesario concebir un sistema capaz de gestionar los datos adquiridos en los experimentos y permitir la configuración de los parámetros para cada experimento específico. Para ello se proyectó un sistema basado en módulos que puedan ser implementados de forma independiente, pero que interactúen entre sí. La Figura 3.1 muestra un diagrama con los módulos que componen este sistema

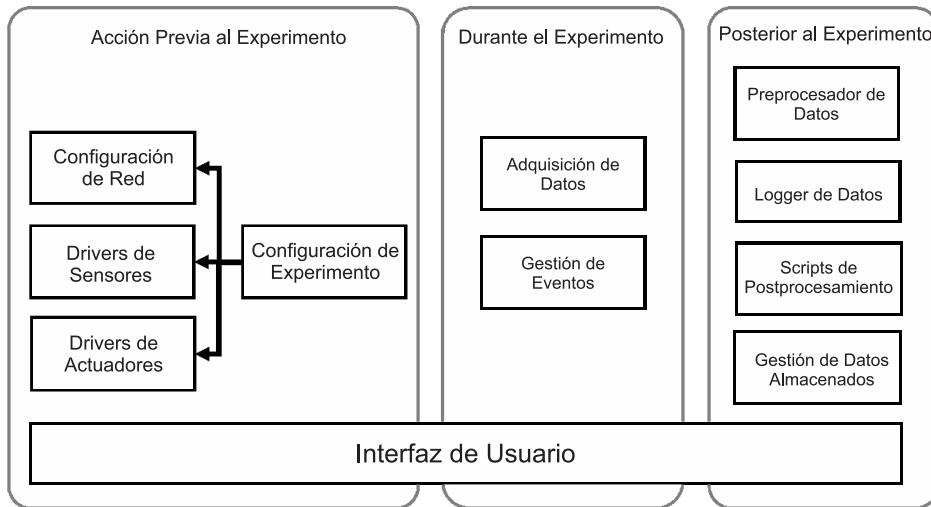


Figura 3.1: Composición del Sistema Computacional.

organizados según la fase del experimento en la que intervienen.

Como se puede observar, en la Figura 3.1 existe una distinción en cuanto a la fase del experimento donde actúan determinados módulos. Aunque se debe señalar que la interfaz de usuario está presente en todas las etapas, debido a que es un elemento transversal a todos los módulos. A continuación se explican algunos criterios empleados en la selección de los materiales con que fueron implementados los módulos.

3.1. Materiales y Métodos

Los componentes seleccionados en el capítulo anterior brindan gran flexibilidad tanto en compatibilidad con varios lenguajes de programación como en soporte para diferentes interfaces de comunicaciones inalámbricas. Esto garantiza que la selección de las tecnologías a emplear sea haga en función de los requerimientos específicos del problema a resolver.

Para la operación del instrumento se determinó que toda la comunicación entre los distintos dispositivos se realizará mediante WiFi debido a que es este el estándar más ampliamente desplegado en los dispositivos electrónicos modernos. Adicionalmente, este protocolo permite emplear todas las ventajas de la arquitectura TCP/IP y facilita el desarrollo de futuras aplicaciones.

La distribución modular del sistema computacional presentado al inicio de este capítulo permite que que puedan interoperar módulos escritos en distintos lenguajes de programación. Sin embargo, para la implementación inicial se seleccionó el lenguaje de programación Python por su amplio soporte para bibliotecas de manejo de hardware, la calidad en la documentación, la facilidad para maquetar algoritmos en poco tiempo y la compatibilidad con múltiples sistemas operativos. Todas esas ventajas, aun frente al inconveniente de su relativamente baja velocidad, hacen de este lenguaje un excelente candidato para el prototipado. En caso de que algún módulo específico requiera un rendimiento superior al que ofrece este lenguaje, puede ser reimplementado en el futuro y posteriormente acoplado al resto del sistema.

A continuación se explica el funcionamiento de cada módulo y se brindan algunos detalles de implementación. Para una mejor organización los módulos se agruparon en diferentes secciones en función de la fase a la que pertenecen.

3.2. Fase de Acción Previa a los Experimentos

Esta sección describe los módulos cuyo funcionamiento comienza antes de iniciar un experimento. A continuación se explican sus principales características y se brindan detalles de la implementación.

3.2.1. Configuración de Red

Para facilitar el acceso a los datos provenientes del instrumento, se implementó un *Access Point* usando la interfaz WiFi de la computadora a bordo del instrumento. Mediante este mecanismo, se crea una red WiFi a la cual es posible acceder mediante autenticación WPA2. Una vez autenticado, el terminal que se conecte adquiere una dirección IP de forma dinámica por el protocolo DHCP. De esta forma, dispositivos móviles como tablets, teléfonos y laptops pueden conectarse al instrumento de forma muy simple. Adicionalmente, se configuró un servidor DNS para resolver consultas a varios nombres de dominio relativos a la aplicación, tales como *labinabucket.com*, *liab.com* y *labinabucket.cu*, con el fin de facilitar el acceso al manejo del instrumento.

Para la implementación de estos servicios se emplearon programas de terceros con licencia de código abierto y disponibles desde los repositorios de la distribución de Linux instalada. Para el manejo del *Access Point* se empleó *hostapd* y como servidor DHCP y DNS se usó *dnsmasq*.

3.2.2. Drivers de Sensores

Para facilitar el trabajo con los sensores se diseñó un modelo simplificado que permite interactuar con estos sin importar la naturaleza de la medición que realizan. Para ello cada sensor cuenta con tres funciones: configuración, calibración y medición.

La función de configuración está pensada para ajustar parámetros específicos del sensor, como la cantidad de bits por muestra, el modo de operación o la habilitación del mismo.

La función de calibración se concibió para ajustar parámetros físicos del sensor que permitan corregir errores en las mediciones. Por ejemplo, si se quieren emplear sensores de campo magnético como una brújula, han de ser calibrados antes de comenzar un experimento para corregir el efecto de los campos magnéticos presentes en el lugar.

La función de medición es la encargada de devolver el valor medido por el sensor teniendo en cuenta los parámetros de configuración establecidos

previamente.

Para la implementación en Python de este modelo se diseñó una clase abstracta con los tres métodos correspondientes a las funciones descritas anteriormente. De esta forma, es sencillo acoplar un nuevo sensor mediante la herencia y posterior redefinición de los 3 métodos. Un fragmento de código con la implementación de esta clase se muestra a continuación:

```
from abc import abstractmethod, ABCMeta
class Sensor:
    __metaclass__ = ABCMeta
    def __init__(self):
        pass

    @abstractmethod
    def setup(self):
        pass

    @abstractmethod
    def calibration(self):
        pass

    @abstractmethod
    def sample(self):
        pass
```

Además, se incluyeron las clases relativas a cada uno de los sensores ya emplazados en el instrumento. Para el desarrollo de estas clases, se incluyó una biblioteca que implementa el protocolo I2C, que puede ser usada con otros sensores que empleen el mismo protocolo. Un ejemplo de *driver* implementado bajo esta convención se muestra a continuación para el caso de un sensor acelerómetro del tipo MPU6050.

```
from i2chat import I2Chat
class MPU6050_Accel(Sensor):
    def __init__(self, address = 0x68):
        self.i2c = I2Chat(address)

    def setup(self):
        self.i2c.write8(0x6c, 0)

    def calibration(self):
        self.i2c.writeBits(0x1C, 4, 2, 0x00)

    def sample(self):
        data = {'xaccel' : self.i2c.readS16(0x3b) / 16384.0,
                'yaccel' : self.i2c.readS16(0x3d) / 16384.0,
                'zaccel' : -self.i2c.readS16(0x3f) / 16384.0}
    return data
```

3.2.3. Drivers de Actuadores

Para el control de los actuadores se propone un modelo simplificado que permite interactuar con estos sin importar la acción que realizan. Para ello cada actuador cuenta con tres funciones: configuración, inicio y final.

La función de configuración está pensada para ajustar parámetros específicos del actuador. Si se piensa en un motor como ejemplo, se podría ajustar la velocidad de rotación, el torque que realiza o el ángulo a girar.

Las funciones de inicio y final están destinadas a controlar cuando se activa el actuador. Al ejecutar la función de inicio, este comenzará a realizar su función hasta que se ejecute la función de fin, o se termine el experimento.

Para la implementación en Python de este modelo se definió una clase abstracta, mostrada a continuación, con los tres métodos correspondientes a las funciones descritas anteriormente.

```
from abc import abstractmethod, ABCMeta
class Actuator:
    __metaclass__ = ABCMeta
    def __init__(self):
        pass

    @abstractmethod
    def setup(self):
        pass

    @abstractmethod
    def start(self):
        pass

    @abstractmethod
    def stop(self):
        pass
```

De esta forma, no es difícil acoplar un nuevo actuador mediante la herencia y posterior redefinición de los 3 métodos como se muestra a continuación, para el caso de un controlador de motores simple que emplea un circuito L298N.

```
import RPi.GPIO as GPIO
class L298(Actuator):
    def __init__(self, In1, In2, En, power, frequency):
        self.In1 = In1
        self.In2 = In2
        self.En = En
        self.power = power
        self.frequency = frequency
        GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
```

```

GPIO.setup(In1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(In2, GPIO.OUT)
GPIO.setup(En, GPIO.OUT)

def setup(self):
    GPIO.output(self.In1, GPIO.LOW)
    GPIO.output(self.In2, GPIO.LOW)
    self.p = GPIO.PWM(self.En, self.frequency)
    self.p.start(self.power)

def start(self):
    GPIO.output(self.In1, GPIO.HIGH)
    GPIO.output(self.In2, GPIO.LOW)

def stop(self):
    GPIO.output(self.In1, GPIO.LOW)
    GPIO.output(self.In2, GPIO.LOW)

```

3.2.4. Configuración del Experimento

El módulo de configuración de experimentos se encarga de habilitar los sensores y actuadores necesarios y configurarlos con los parámetros adecuados. Es un módulo con mayor abstracción que proporciona un acceso rápido a los elementos que serán empleados en un experimento en particular.

Este módulo opera mediante una descripción en texto plano, según el estándar JSON, que define la configuración y habilitación de cada sensor y actuador. La configuración incluye además el modo de operación de los eventos de inicio y fin de experimento, que serán tratados con mayor detalle en la sección 3.3.2. Esta descripción se carga y se aplica usando los *Drivers* explicados en las subsecciones anteriores, generando así un archivo con un formato similar al siguiente:

```
{
  'metadata': {
    'name': 'exp1',
    'description': 'Intruder Penetration at 0.4g',
    'date': '2018-05-04',
    'compress': true
  },
  'sensors': {
    'accelerometer': {
      'class': 'MPU6050_Accel',
      'params': {'address': 0x68, 'fs': 125}
    },
    'camera': {
      'class': 'PiCamera',

```

```

        'params': {'width': 800, 'height': 600, 'save': true, 'fps': 24}
    },
},
'actuators': {
    'motor_driver':{
        'class': 'L298',
        'params': {'speed': 5}
    }
},
'triggers': {
    'start': {'mode': 'auto'},
    'stop': {'mode': 'time', 'duration': 3000}
}
}
}

```

Una vez se configuran los sensores y actuadores según esta descripción, están todas las condiciones creadas para iniciar un experimento. Los sensores y actuadores seleccionados se instancian y se hacen accesibles desde el módulo de Adquisición de Datos que será explicado en la siguiente sección.

3.3. Fase de Acción Durante los Experimentos

A continuación se explican los módulos que operan durante el tiempo efectivo de los experimentos, es decir, mientras el cubo está en movimiento. Es preciso notar que el código relativo a estos módulos ha de ser extremadamente simple y eficiente para lograr respuestas lo más rápidas posibles.

3.3.1. Adquisición de Datos

La adquisición de las muestras de cada sensor se realiza de forma periódica. Para ello se toma como referencia la frecuencia de muestreo (f_s) impuesta en la Configuración del Experimento. Para la implementación de este módulo se empleó el módulo *multiprocessing* de Python que permite crear y ejecutar distintos procesos. De esta forma, se hace un uso más eficiente del procesador de cuatro núcleos existente y se aumenta la calidad en la precisión del tiempo de muestreo de los sensores. Toda la información obtenida de los sensores se almacena en memoria RAM durante el tiempo efectivo del experimento, para impedir innecesarios retardos por escritura en disco.

3.3.2. Gestión de Eventos

Reaccionar a eventos temporales durante la experimentación es una característica clave dada la corta duración de los experimentos. Para ello se establecieron dos eventos fundamentales que rigen el comportamiento de los actuadores. Un primer evento desencadena la función inicio de los actuadores seleccionados. Un segundo evento sirve para ejecutar la función fin. No obstante, no es obligatorio usar actuadores en los experimentos, por tanto los eventos pueden ser deshabilitados en caso de que no sean necesarios.

El evento de inicio se emplea típicamente para indicar el comienzo del tiempo útil de experimento. Este evento podrá ser desencadenado o bien de forma manual o de forma automática en función de la estabilización de la gravedad, pero para cada experimento solo una de ambas opciones ha de ser seleccionada. En la configuración manual, este evento puede ser lanzado desde la interfaz de usuario, en el caso de la implementada, que es de naturaleza web, mediante un botón dedicado para este fin. Alternativamente, se implementó un algoritmo de detección de la estabilización en la g_{eff} que puede ser empleado para generar un evento de inicio de forma automática. El funcionamiento de este, por su extensión, será explicado con detalles en el Capítulo 4.

El evento de fin se emplea para indicar el cese de la acción de los actuadores. Igualmente, existen varios criterios para lanzar este evento. En la implementación se incluyó la ejecución manual mediante un botón en la interfaz de usuario, la ejecución transcurrido un tiempo determinado luego de lanzar el evento de inicio y la ejecución por detección del cambio en la estabilización de la g_{eff} . La selección del criterio de lanzamiento del evento se determina en la etapa de configuración del experimento al igual que el evento de inicio.

3.4. Fase de Acción Posterior a los Experimentos

Una vez finalizado un experimento, los datos adquiridos son agrupados y enviados a varios módulos que se encargan de almacenar la información en la memoria SD y mostrar resultados preliminares entre otras funcionalidades que serán explicadas a continuación.

3.4.1. Preprocesador de Datos

Antes de almacenar los datos adquiridos, estos son estructurados en un diccionario para facilitar la visualización mediante la interfaz de usuario.

El objetivo de este módulo es brindarle al investigador una oportunidad de validar, según su criterio, la calidad de los datos y ahorrar tiempo útil de experimentación. De esta forma, se logran evaluar los experimentos y obtener una visualización previa de los datos, antes y durante el proceso de almacenamiento.

3.4.2. Logger de Datos

En caso de que el experimento haya sido satisfactorio y se requiera almacenar los datos de forma persistente en la memoria microSD, este módulo brinda la opción de guardar la información en varios formatos.

Para facilitar el procesamiento posterior de los datos, se guardan las lecturas de los sensores junto con metadatos obtenidos del experimento en un archivo *json*. Esta estructura permite grandes facilidades de posprocesamiento debido a la popularidad de este estandar y la existencia de bibliotecas compatibles en la mayoría de los lenguajes de programación modernos.

Sin embargo, para el análisis manual de estos datos, también se guarda una versión alternativa en el formato *csv*. Este formato es ampliamente usado por la simpleza con que representa la información, la legibilidad por humanos y la facilidad que brinda al poder ser leído con software como Microsoft Excel y Origin, que permiten realizar diversos tipos de gráficos sin necesidad de programar.

3.4.3. Scripts de Postprocesamiento

Entre los sensores con que cuenta el instrumento, descritos la sección 2.2.3, se encuentra una cámara digital. Mediante el procesamiento de las imágenes obtenidas durante un experimento, es posible adquirir información física del fenómeno que se quiere estudiar. Ejemplos de lo anterior pueden ser los cambios en la iluminación promedio, la posición de objetos en movimiento y cambios en la coloración de algún elemento. Como parte de las herramientas básicas del instrumento, se incluyen varios scripts que permiten procesar todas las imágenes de un experimento y extraer cambios en la posición de algún objeto usando el algoritmo de *Color Matching*.

A partir de relaciones entre variables físicas medidas con sensores, es posible estimar el valor de otras variables que no fueron medidas directamente. Este proceso puede ser automatizado si se identifican estas nuevas variables y su dependencia matemática con las variables medidas. Como parte de las herramientas incluidas en el instrumento se cuenta con scripts que procesan

los datos originales y estiman los valores de las variables medidas indirectamente.

3.4.4. Gestión de Datos Almacenados

Cada vez que un experimento finaliza, el usuario puede almacenar toda la información generada en los formatos *json* y *csv* usando el módulo explicado en la sección 3.4.2. Esta información se almacena en la memoria microSD y está accesible desde la interfaz de usuario para ser descargada o eliminada en cualquier momento. Cuando un usuario descarga los datos de un experimento recibe la información de los sensores, las imágenes tomadas por la cámara y, opcionalmente, los resultados obtenidos luego de ejecutar scripts de postprocesamiento sobre los datos originales del experimento.

3.5. Interfaz de Usuario

Con el fin de manejar de forma fácil la configuración y la gestión de los datos en los experimentos se desarrolló una interfaz de usuario basada en tecnología web. La implementación fue realizada en el lenguaje de programación Python mediante el framework de desarrollo web Flask. Esta interfaz se encuentra disponible como un servicio de la computadora a bordo del instrumento y no requiere la instalación de ningún software adicional para emplear la totalidad de sus funcionalidades.

Las principales funcionalidades de la interfaz se explican a continuación:

Configuración de Experimento Mediante esta funcionalidad es posible generar el archivo de configuración que será utilizado en el próximo experimento. Permite además dar comienzo al proceso de captura de información de los sensores y generar el evento de inicio, en caso de que se haya configurado de forma manual. La Figura 3.2 muestra la vista encargada de realizar esta funcionalidad en la interfaz diseñada.

Comprobación de Funcionamiento Comprueba el funcionamiento de los sensores antes de iniciar un experimento. Permite al usuario una previsualización de los valores que están midiendo los sensores y un streaming de las imágenes capturadas por la cámara.

Gestión de Datos Almacenados Gestiona el contenido almacenado en la tarjeta microSD, permitiendo eliminar o descargar los datos de cualquier experimento guardado.

Previsualización de Datos Permite visualizar de forma rápida los datos recién obtenidos de un experimento en aras de validar la información y guardar solo los datos que sean verificados como útiles para el investigador.

Una vez configurado el experimento mediante el formulario mostrado en la Figura 3.2 el sistema está listo para ser lanzado. Al presionar el botón de inicio de adquisición de datos el software genera un sonido durante 3 s para indicar que se debe liberar la polea para que el cubo comience su movimiento.

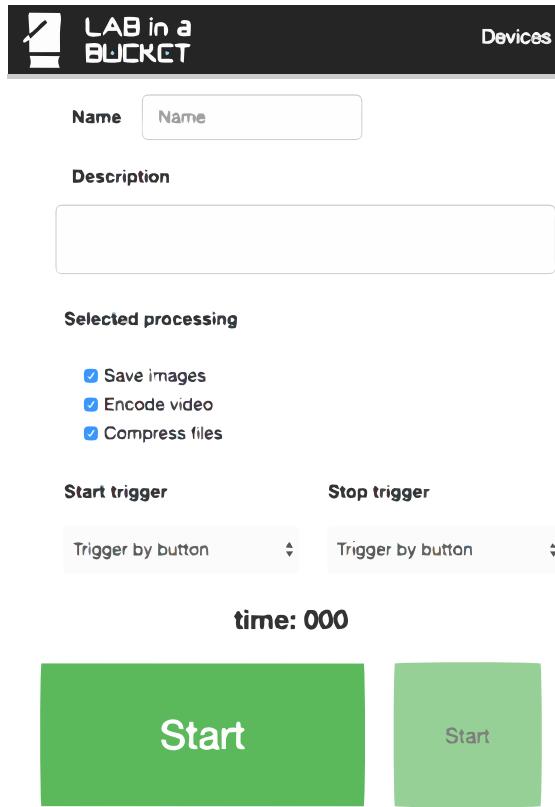


Figura 3.2: Configuración de un nuevo experimento usando la interfaz de usuario diseñada.

Luego de concluir la trayectoria, en la interfaz de usuario se mostrará la previsualización de los datos adquiridos por los sensores y la cámara digital, como se muestra en la Figura 3.3.

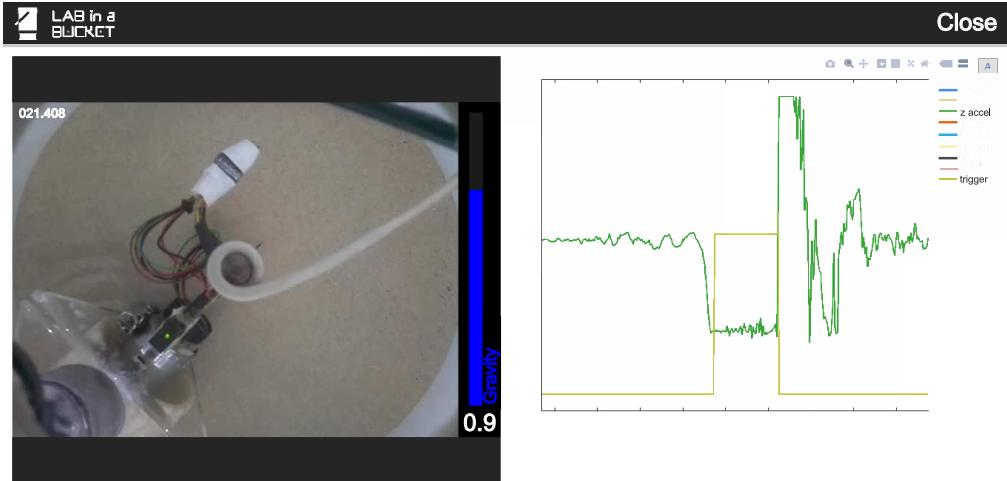


Figura 3.3: Previsualización de datos obtenidos luego de un experimento realizado a 0.4 g. La interfaz permite graficar cualquiera de las variables capturadas por los sensores y visualizar un video con las imágenes tomadas por la cámara.

En el capítulo 5 se muestra un ejemplo aplicación del instrumento, donde se ejemplifica el uso de cada uno de los módulos explicados anteriormente.

3.6. Conclusiones Parciales

El sistema computacional diseñado permite ajustar diversos parámetros en el funcionamiento del instrumento sin necesidad de realizar modificaciones de hardware. Diseñar experimentos diferentes con este sistema, se reduce a modificar parámetros en algunos de los módulos, o en casos muy específicos, implementar algunas funciones que permitan el manejo de nuevos componentes de hardware.

Se cuenta con un mecanismo de gestión de eventos que permite determinar de forma manual o automática el inicio o final de la trayectoria del cubo durante un experimento y ejecutar funciones asociadas a estos eventos.

Capítulo 4

Detección de la Estabilización en la g_{eff}

En la sección 3.3.2 se introdujeron las posibles formas de desencadenar eventos durante el transcurso de un experimento. Para dar inicio al funcionamiento de los actuadores se presentaron dos variantes posibles: un inicio manual mediante la interfaz gráfica o un inicio mediante la detección automática de un cambio en la estabilización de la g_{eff} . Esta última es un factor determinante en la optimización del tiempo útil de los experimentos realizados con el instrumento. Para lograr un inicio automático, es necesario poder predecir, durante el transcurso del experimento, en qué estado del movimiento se encuentra el cubo. A lo largo de este capítulo se trata la solución de este problema abordado desde varios enfoques.

4.1. Caracterización de un experimento típico

La Figura 4.1 muestra la evolución temporal de la señal de aceleración en el eje vertical respecto al cubo a lo largo de dos experimentos diferentes. En el caso de la izquierda la g_{eff} deseada es de $0,4g$ y a la derecha la g_{eff} deseada es de $1,2g$.

Sin importar cual sea la g_{eff} deseada, es posible notar cuatro etapas bien delimitadas en cada experimento. Una primera etapa, *Detenido*, es cuando el cubo no ha iniciado su movimiento. Seguidamente, la etapa *Iniciado* representa el intervalo de tiempo donde el cubo empezó a moverse, pero aún la g_{eff} se encuentra variando. A continuación, se alcanza el estado *Estable*, donde la g_{eff} es la deseada. Finalmente, en la etapa de *Frenado* se detiene el cubo para evitar un impacto y en consecuencia la g_{eff} fluctúa hasta

estabilizarse nuevamente en la gravedad habitual de la Tierra.

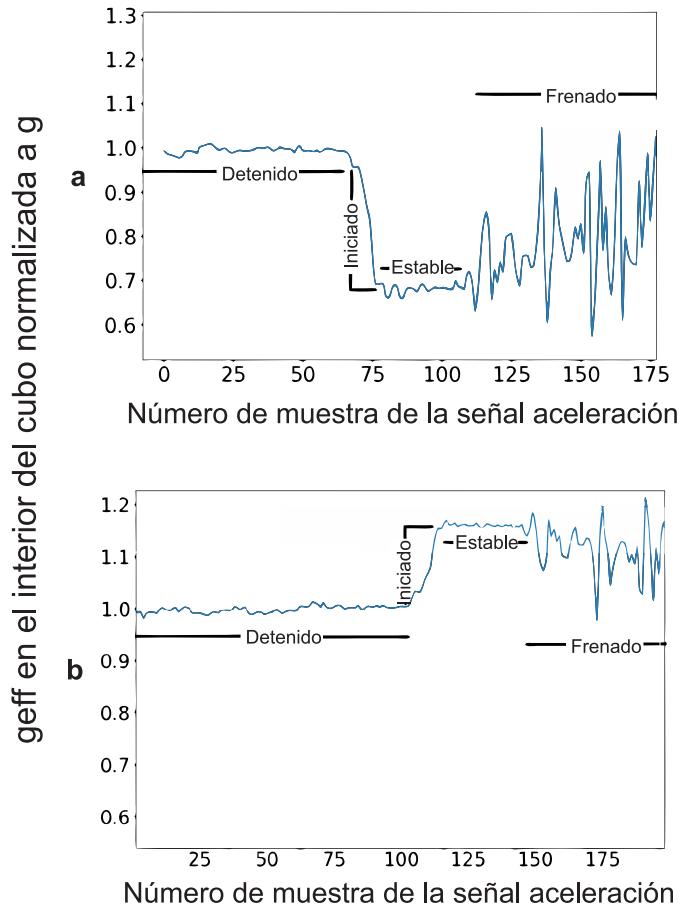


Figura 4.1: Aceleración normalizada a g relativa al cubo. (a) En un experimento con $g_{\text{eff}} = 0,65\ g$ (b) En un experimento con $g_{\text{eff}} = 1,15\ g$

4.2. Formulación del problema de clasificación

De la Figura 4.1 se puede inferir que el problema de detectar la estabilización de la gravedad se puede abordar desde la perspectiva de un problema de clasificación. Se trataría de clasificar cada muestra de la señal de aceleración en uno de los 4 estados, conociendo únicamente el estado en que se clasificó la muestra anterior y el valor de las k últimas muestras de la propia

señal. El comportamiento deseado se muestra en la Figura 4.2.

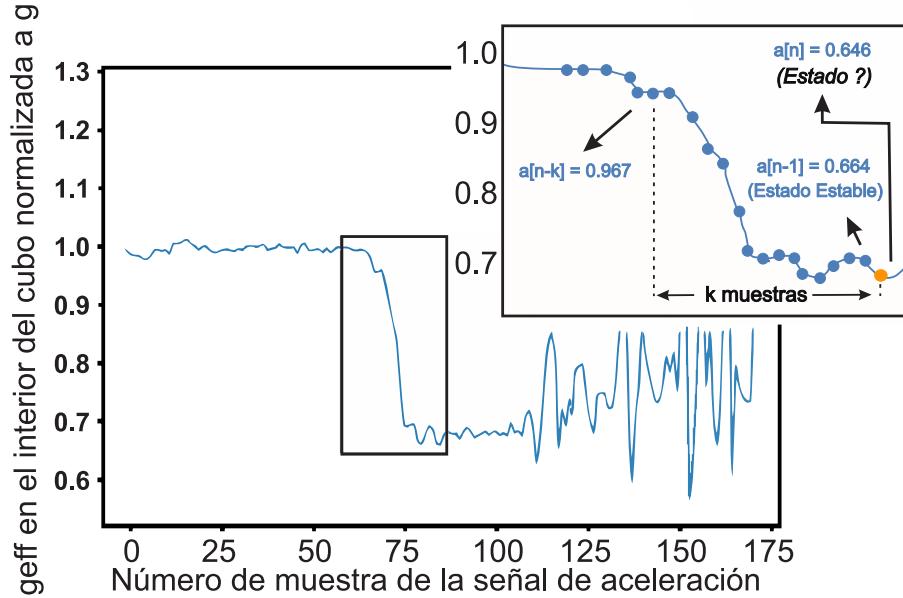


Figura 4.2: Clasificación de una muestra n de la señal de aceleración dadas las k últimas muestras y conocimiento de la clasificación de la muestra $n - 1$

Dado el conocimiento del proceso, se sabe que una vez en el estado *Iniciado* solamente es posible transitar al estado *Estable*. De igual forma, cuando se llegue al estado *Estable*, solo es posible cambiar al estado *Frenado*. Esta restricción de movimiento hacia un único estado siguiente, con independencia del estado actual, simplifica en gran medida el proceso de clasificación. Ahora el problema se reduce a encontrar un criterio para el cual, dado un estado X, se decide pasar al siguiente estado. Es evidente que este criterio no tiene que ser el mismo para cada uno de los estados. Sin embargo, es deseable que para determinar cualquiera de estas transiciones se empleen la misma cantidad de muestras de la señal. A continuación se analizan los criterios de decisión mediante los cuales se puede determinar un cambio de estado para cada una de las 3 transiciones.

4.2.1. Transición de *Detenido* a *Iniciado*

El estado *Detenido* es el estado inicial en cada experimento, donde el cubo se encuentra colgado de la polea listo para iniciar su movimiento. Para

determinar si la muestra actual (n) debe ser clasificada en el mismo estado se debe comprobar la expresión 4.1.

$$|a[n] - a[n-1]| < \epsilon_a \quad (4.1)$$

Donde:

- n es el índice de la muestra actual.
- $a[n]$ es el valor de aceleración en el eje z para la muestra n.
- ϵ_a es la máxima dispersión entre dos muestras que es considerada ruido del sensor.

Este criterio garantiza que un cambio significativo entre dos muestras sea detectado de forma rápida. Sin embargo, cuando la g_{eff} deseada es similar a g los cambios entre muestras no son muy grandes y es necesario analizar algún criterio de transición alternativo.

Otro criterio válido para determinar la persistencia en este estado es analizar un cambio significativo en la aceleración promedio a la que se encuentra sometido el cubo. La expresión 4.2 cuantifica la diferencia entre los promedios de aceleración sobre k muestras para el estado actual y un estado k muestras anterior. Si la diferencia entre los promedios de ambos estados no es superior a la dispersión máxima considerada ruido, la muestra clasifica en el mismo estado, de lo contrario pasa al estado siguiente.

$$\frac{1}{k} \left| \sum_{i=n-k}^n a[i] - \sum_{j=n-2k}^{n-k} a[j] \right| \leq \epsilon_a \quad (4.2)$$

Para evaluar el criterio descrito por la expresión 4.2 podría pensarse que es necesario analizar las $2k$ últimas muestras. Sin embargo, este criterio puede emplearse procesando las últimas k muestras si se almacenan los valores promedio correspondientes a las últimas k muestras. Una implementación de este tipo ahorraría un tiempo de procesamiento crítico, debido a que este procedimiento es ejecutado durante la caída del cubo y la reacción debe ser tan rápida como sea posible.

Para la implementación de este criterio es necesario asumir que las k primeras muestras siempre van a clasificar en el estado *Detenido*, lo cual no es una hipótesis muy fuerte debido a que se puede garantizar retardando a conveniencia el lanzamiento del cubo.

La calidad de la clasificación depende únicamente de los parámetros k y ϵ_a que han de ser ajustados cuidadosamente en función de las características del sensor de aceleración.

4.2.2. Transición de *Iniciado* a *Estable*

El estado *Iniciado* es un régimen transitorio en el cual el cubo se encuentra en movimiento pero la g_{eff} aún no se ha estabilizado. La característica principal de este estado es la alta desviación estándar presente en las muestras correspondientes. Para la detección de la permanencia en este estado se analizó que la varianza muestral en las últimas k muestras de la señal de aceleración se encontrara por encima de un umbral preestablecido según se muestra en la expresión 4.3.

$$\frac{1}{k} \sum_{i=n-k}^n a[i]^2 - (\frac{1}{k} \sum_{i=n-k}^n a[i])^2 \geq \sigma_a^2 \quad (4.3)$$

Donde:

- n es el índice de la muestra actual.
- $a[n]$ es el valor de aceleración en el eje z para la muestra n.
- k es el total de muestras analizadas.
- σ_a es la desviación estándar mínima requerida para clasificar en el estado *Iniciado*.

Cuando deja de cumplirse el criterio, se pasa al estado *Estable* y en consecuencia es posible lanzar el evento de inicio, para que los actuadores comiencen a realizar su función. El lanzamiento o no de este evento depende exclusivamente de la configuración realizada al inicio del experimento.

Adicionalmente, es posible estimar la g_{eff} estable alcanzada mediante el promedio de las aceleraciones medidas. La expresión 4.4 se emplea para almacenar el valor de estabilización de la g_{eff} una vez se transita al estado estable.

$$g_{\text{eff}} = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k}^n a[i] \quad (4.4)$$

El criterio seleccionado para esta transición depende únicamente de k y σ_a , los cuales han de ser ajustados en función de datos experimentales para garantizar una correcta clasificación.

4.2.3. Transición de *Estable* a *Frenado*

El tiempo en el estado *Estable* es el empleado para analizar los datos experimentales obtenidos. Es preciso que este estado sea delimitado con precisión, pues en él es donde la g_{eff} se mantiene constante y diferente a la gravedad de nuestro planeta.

Para determinar la permanencia en este estado se usa el conocimiento adquirido sobre la g_{eff} de estabilización descrito por la expresión 4.4. El criterio de permanencia empleado se describe en la expresión 4.5

$$|a[n] - g_{\text{eff}}| \leq \mu_a \quad (4.5)$$

Donde:

- n es el índice de la muestra actual.
- $a[n]$ es el valor de aceleración en el eje z para la muestra n.
- g_{eff} es el valor estable de g_{eff} alcanzado.
- μ_a es la máxima dispersión entre dos muestras que es considerada ruido en las mediciones.

Se podría pensar que μ_a y ϵ_a son equivalentes, debido a que ambas indican dispersión entre muestras. Sin embargo, el umbral determinado por ϵ_a considera únicamente el ruido en las mediciones del sensor cuando el cubo se encuentra detenido mientras que μ_a incluye además el ruido provocado por la fricción generada por la polea. En general, deben ser umbrales diferentes para realizar una modelación correcta.

Una vez determinada la transición al estado *Frenado* es posible desencadenar el evento fin para indicarle a los actuadores el cese de la realización de su función.

La calidad de la clasificación en esta etapa depende únicamente del parámetro μ_a que ha de ser ajustados en función de datos experimentales.

4.2.4. Resumen del Algoritmo de Clasificación

Para la clasificación de una muestra cualquiera, el algoritmo debe determinar el estado actual del proceso y, en función de este, emplear el criterio de clasificación correspondiente. En caso de que se cumpla un criterio de transición, se debe actualizar el estado actual del proceso para la próxima iteración. Un resumen del algoritmo implementado se muestra en el siguiente pseudocódigo:

```

initializeQueue samples
initializeQueue averages
state = 0

classify( $s, k, \epsilon_a, \sigma_a, \mu_a$ ):
    if len(samples) < k:
        push s into samples
        push sum(samples)/len(samples) into averages
        return 0
    else:
        push s into samples
        pop samples

        avg = sum(samples)/len(samples)
        push avg into averages
        pop averages

        if status == 0: # Detenido
            if samples[-1] +  $\epsilon_a$  < samples[-2]:
                status = 1
                return 1
            elif averages[-1] +  $\epsilon_a$  < averages[0]:
                status = 1
                return 1
            else return 0

        if status == 1: # Iniciado
            sDev = standardDeviation(samples)
            if sDev <  $\sigma_a$ :
                status = 2
                stableGravity = averages[-1]
                return 2
            else return 1

        if status == 2: # Estable
            dif = samples[-1] - stableGravity
            if dif >  $\mu_a$ :
                status = 3
                return 3
            else return 2

        if status == 3: # Frenado
            return 3

```

4.3. Obtención de los parámetros requeridos en la clasificación mediante la solución de un problema de optimización

En la sección 4.2 se definieron varios criterios que deben ser aplicados a las muestras de la señal de aceleración, con el fin de obtener una clasificación a nivel de muestra. Para identificar correctamente las muestras es preciso ajustar cuatro parámetros (k, ϵ_a, σ_a y μ_a). Si se logra modelar el error de clasificación mediante una función, es posible encontrar los valores de los parámetros que minimicen el valor de la función de error mediante métodos heurísticos. Estas estrategias de optimización han sido ampliamente usadas en el estudio de sistemas físicos complejos [16].

Las cotas de los parámetros estadísticos se establecieron dado el conocimiento de que las muestras de la señal son valores normalizados. En el caso de la cantidad de muestras a analizar (k) se empleó como cota máxima 10, para evitar analizar demasiadas muestras y garantizar una respuesta rápida. El rango de valores admisibles de los parámetros se especifica en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Rango de valores admisibles de los parámetros en la clasificación

Parámetro	Min	Max
k	2	10
ϵ_a	10^{-15}	1
σ_a	10^{-15}	1
μ_a	10^{-15}	1

A continuación se explican dos funciones objetivo propuestas para modelar el error de clasificación en función de los cuatro parámetros que se quieren ajustar.

4.3.1. Función de error 1

Para cuantificar el error cometido al clasificar un set de muestras, para un conjunto de parámetros específico, es preciso contar con una referencia. Como el comportamiento de la señal aceleración es altamente dependiente de la gravedad efectiva que se desee lograr, se emplearon datos provenientes de experimentos realizados para tres valores diferentes de g_{eff} . Las muestras obtenidas del sensor de aceleración, en cada uno de los tres casos, fueron clasificadas manualmente en los cuatro estados posibles.

Para realizar la clasificación manual, se le asignó un valor numérico a cada uno de los estados en orden ascendente y comenzando por cero. Sea $M(n)$ el valor numérico, asignado manualmente, correspondiente al estado de la muestra n y $A(n)$ el valor predicho con el algoritmo de clasificación usando unos parámetros determinados, es posible cuantificar las muestras mal clasificadas en un experimento x mediante la función:

$$f_x = \sum_{n=0}^N \min(1, \text{abs}(M(n) - A(n))) \quad (4.6)$$

Para evaluar la cantidad de muestras mal clasificadas promedio, a lo largo de los 3 experimentos seleccionados, basta con promediar los valores obtenidos por la expresión 4.6 para cada experimento. De esta forma, la función de error propuesta para ser empleada en la optimización de los parámetros es la cantidad de muestras mal clasificadas promedio en los tres experimentos.

Para minimizar el valor de la función descrita anteriormente se emplearon los algoritmos metaheurísticos Enjambre de Partículas (PSO), Recocido Simulado (SA) y Búsqueda Armónica (HS). En cada caso se emplearon 10000 evaluaciones de la función de error. Los resultados obtenidos, en la mejor de treinta ejecuciones de cada algoritmo, se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados de la optimización (función 1)

Algoritmo	k	ϵ_a	σ_a	μ_a	Ferr	Muestras mal clasificadas
PSO	4	0.0253	0.0033	0.06345	9	9
SA	4	0.0292	0.0164	0.0387	10	10
HS	5	0.0778	0.6739	0.0295	11	11

En la Tabla 4.2 se puede notar como la cantidad de muestras mal clasificadas promedio oscila sobre las 10 en experimentos con más de 400 muestras. Se podría pensar que este resultado es lo suficientemente bueno debido a que presenta un error de clasificación inferior al 2.5 %. Sin embargo, en la Figura 4.3 se muestra un gráfico donde se pueden detallar las muestras mal clasificadas para uno de los experimentos de prueba. Un problema evidente es la falta de percepción del estado *Iniciado*.

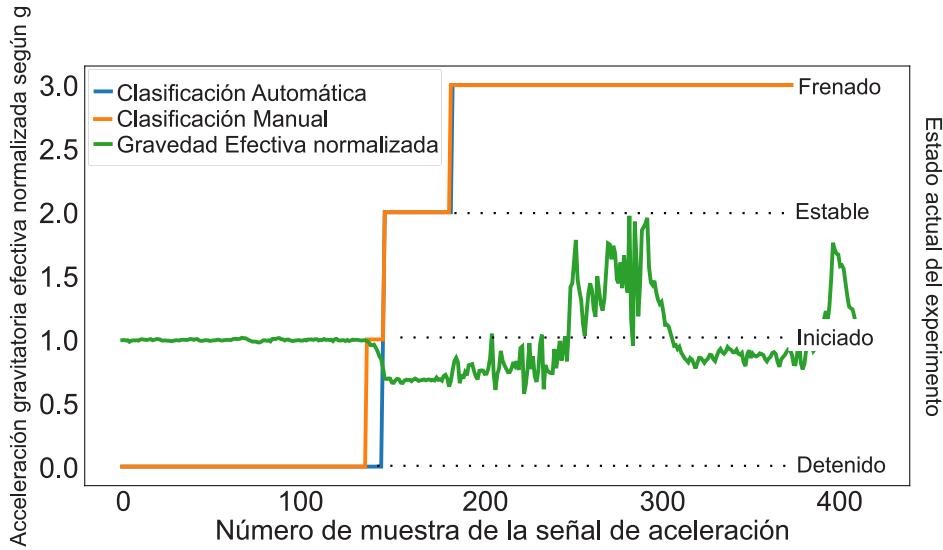


Figura 4.3: Evaluación de la clasificación automática con la función 1

4.3.2. Función de error 2

Para potenciar la detección del estado *Iniciado*, es posible aumentar la cuantización del error cuando el estado mal clasificado sea este. De esta forma, los algoritmos heurísticos evitan soluciones donde los fallos de clasificación ocurran en el estado *Iniciado*. Para esto se modificó la función de error 1, para que, cuando el estado mal clasificado fuese el *Iniciado*, en lugar de adicionar una unidad de error, se adicionen 11.

Los resultados obtenidos, en la mejor de treinta ejecuciones de cada algoritmo, se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Resultados de la optimización (función 2)

Algoritmo	k	ϵ_a	σ_a	μ_a	Ferr	Muestras mal clasificadas
PSO	5	0.0204	0.0137	0.0563	27	7
SA	7	0.0286	0.0265	0.0499	73	13
HS	5	0.0201	0.0053	0.0316	26	6

En este caso, si se logra detectar el estado *Iniciado*, como se muestra en la Figura 4.4.

Se debe notar que, en el caso de la segunda función, el error no coincide

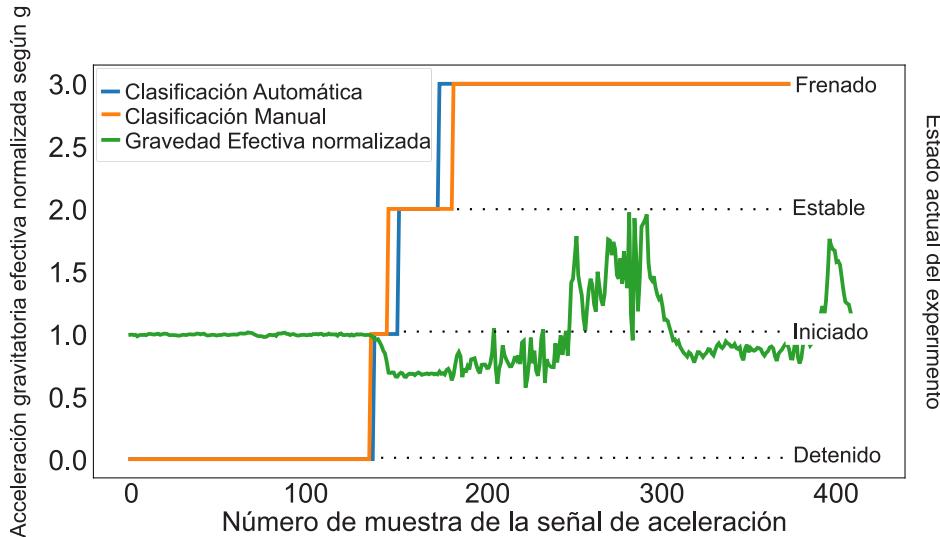


Figura 4.4: Evaluación de la clasificación automática con la función 2

con la cantidad de muestras mal clasificadas. Pudiera dar la impresión de que el error no disminuyó, pero en realidad si lo hizo. Para cuantificar esta disminución, se debe evaluar la función objetivo 1, cuyo valor si coincide con la cantidad de muestras mal clasificadas, usando el set de parámetros encontrados mediante la función objetivo número 2. En la Tabla 4.4 se observan la cantidad de muestras mal clasificadas usando los mejores sets de parámetros obtenidos con cada función objetivo.

Tabla 4.4: Resultados generales de la optimización

Función	k	ϵ_a	σ_a	μ_a	Fobj	Muestras mal clasificadas
1	4	0.0253	0.0033	0.06345	9	9
2	5	0.0201	0.0053	0.0316	26	6

De la tabla 4.4 se puede inferir que los parámetros $k = 5$, $\epsilon_a = 0,0201$, $\sigma_a = 0,0053$ y $\mu_a = 0,0316$ brindan los mejores resultados de clasificación. Estos serán los parámetros usados por el algoritmo de clasificación.

4.4. Conclusiones Parciales

Con el algoritmo de clasificación propuesto y los parámetros ajustados por el modelo de optimización, es posible clasificar en tiempo real las muestras de la señal de aceleración en uno de los 4 estados propuestos. Esto permite aprovechar al máximo el tiempo efectivo de los experimentos y desencadenar el evento inicio que activa los actuadores con bajo tiempo de retardo.

Si bien los resultados obtenidos con los parámetros encontrados mediante los algoritmos heurísticos no reducen el error a cero, logran reducirlo a una cantidad muy pequeña de muestras. Teniendo en cuenta que el tiempo entre muestras mínimo que permiten los sensores empleados es de 8 ms y la cantidad de muestras en un experimento crítico (correspondiente a una g_{eff} cuyo tiempo efectivo es mínimo) ronda las 180, el error final máximo se encuentra por debajo del 5%, lo cual es ampliamente aceptado por los investigadores consultados.

Capítulo 5

Caso de Estudio: Rodadura Sobre Medios Granulares

El planeta Marte ha estado en la mira de las investigaciones aeroespaciales durante décadas. NASA, por ejemplo, ha enviado varios *rovers* para estudiarlo. La naturaleza granular encontrada en su superficie [17, 18], combinada con la baja gravedad existente, impone retos especiales al movimiento de estos robots que ameritan ser estudiados en detalles. Debido al tamaño de dichos robots, la diferencia en gravedad y la composición de esta materia granular, es muy difícil recrear las condiciones en nuestro planeta para estudiar el movimiento de los robots en dicho ambiente.

La eficiencia en rodaduras sobre suelos granulares es un tema de enorme importancia práctica, de ahí que exista un conjunto de artículos científicos en el tema relativamente grande. La mayoría de estos trabajos centran sus esfuerzos en parámetros de impacto directo en ingeniería, como la naturaleza del suelo, el peso, tamaño y superficie de contacto de las ruedas y la velocidad o torque de control [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Debido a razones obvias, mucho menos material ha sido publicado discutiendo el comportamiento de las ruedas en ambientes gravitacionales diferentes al de nuestro planeta. Sin embargo, el comportamiento de los materiales granulares en estas condiciones es clave para la exploración espacial y la colonización eventual de cuerpos espaciales como la Luna o Marte. En esos casos, el relativamente pobre entendimiento de la dinámica de los medios granulares es agravado por los bajos valores de gravedad, lo cual complica sustancialmente los trabajos experimentales [27].

Sin embargo, un experimento pionero para examinar la eficiencia de ruedas a baja gravedad de forma controlada ha sido desarrollados recientemente.

Este fue reportado por Kobayashi *et al.* en 2010 [28]: basado en maniobras realizadas durante vuelos parabólicos, estudiaron el desempeño de una rueda cilíndrica en “condiciones de gravedad variable”, donde se alcanzaron mesetas de gravedades cercanas a la de Marte. Posteriormente, los mismos autores han sugerido que la realización de experimentos en Tierra, usando ruedas con la misma masa de aquellas empleadas en condiciones de baja gravedad, permite predecir el comportamiento en condiciones extraterrestres [29, 30].

Usando el instrumento diseñado en este trabajo es posible estudiar el movimiento de ruedas sobre medios granulares, así como evaluar la dependencia de la rodadura con parámetros intrínsecos al material, las dimensiones de la rueda e, incluso, la gravedad que actúa sobre esta. A continuación se presenta un experimento diseñado para estudiar la rodadura de la maqueta de una rueda de un *Mars Rover* sobre arena.

5.1. Montaje experimental

Inspirados en el *rover Opportunity* de la NASA se imprimió en 3D un modelo a escala de una de sus ruedas y fue colocado en el interior del cubo. La rueda se fijó a un brazo que limita el movimiento de la rueda a trayectorias en forma de circunferencia centrada mediante un pivote colocado en el centro del instrumento. La Figura 5.1 ilustra la disposición espacial de la rueda y los accesorios antes descritos.

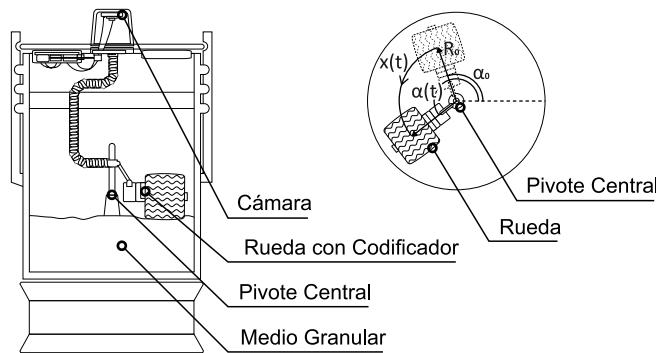


Figura 5.1: Experimento para evaluar la rodadura sobre medios granulares a diversas gravedades. La rueda se mueve describiendo una circunferencia alrededor del eje de simetría vertical del cubo.

5.2. Principio de las mediciones

La rueda está acoplada a un codificador de pulsos digitales. Mediante este codificador es posible estimar el ángulo de rotación de la rueda y usarlo para calcular la velocidad angular instantánea que posee. Esta medición de velocidad angular es luego usada para calcular el desplazamiento lineal de la rueda mientras rota sobre el arco de circunferencia usando la fórmula:

$$x_{\text{calc}}(t) = \int_0^t r\omega(t) dt \quad (5.1)$$

donde r es el radio de la rueda. Se debe notar que este desplazamiento lineal asume que no ocurrió ningún deslizamiento y, por ende, todo el movimiento de rotación se convirtió efectivamente en translación. Por tanto, este desplazamiento lineal puede ser usado como referencia ideal para estimar la eficiencia en el movimiento si fuésemos capaces de medir el desplazamiento lineal real.

Es posible obtener el desplazamiento lineal de la rueda, basado en el movimiento de su centro de masa, procesando las imágenes tomadas con la cámara en la tapa del cubo. Considerando la posición inicial de la rueda, descrita como un vector en coordenadas polares, donde R_0 es la distancia inicial entre el centro de la rueda y el pivote central colocado en el cubo, y α_0 es el ángulo inicial referido al semi-eje positivo de las x en el sistema de coordenadas colocado sobre el pivote central.

Debido a la restricción holónoma impuesta por el pivote central al movimiento de la rueda, se conoce que el movimiento seguirá la trayectoria de una circunferencia. Luego, para obtener el desplazamiento hasta un tiempo t podemos usar la siguiente expresión:

$$x_{\text{real}}(t) = R_0[\alpha(t) - \alpha_0] \quad (5.2)$$

Usando los valores de las funciones descritas por las ecuaciones 5.1 y 5.2 es posible cuantificar la eficiencia como:

$$\text{efficiency}(t) = \begin{cases} 1, & x_{\text{calc}}(t) = 0; \\ \frac{d}{dt}x_{\text{real}} / \frac{d}{dt}x_{\text{calc}}, & \text{otros}; \end{cases} \quad (5.3)$$

Usando los fundamentos antes descritos, se implementaron los *drivers* para el manejo del actuador, en este caso el motor acoplado a la rueda y el sensor de giro de la rueda.

Adicionalmente, se emplearon dos *scripts* de postprocesamiento. El primero permite obtener el desplazamiento lineal de la rueda mediante el pro-

cesamiento de las imágenes obtenidas por la cámara, empleando un LED verde como referencia para simplificar el algoritmo de seguimiento. El segundo automatiza el cálculo de la eficiencia de rodaduras, empleando los datos obtenidos por el sensor de giro y el resultado del primer *script*, mediante la ecuación 5.3.

5.3. Escalamiento de los parámetros

La maqueta empleada en estos experimentos posee una reducción en el radio y el ancho respecto a la rueda original. Para validar los resultados, considerando esas diferencias, es necesario hacer un escalamiento de la masa, para intentar reproducir con mayor fidelidad el desempeño del robot original en Marte.

Se asume que la densidad se conserva, y que todas las dimensiones escalan como el tamaño de la rueda. Entonces, si se considera que m , r y w son la masa, el radio y el ancho de la rueda de la maqueta y M , R y W la masa el radio y el ancho de la rueda del rover original, es posible estimar cual debería ser la masa de la maqueta según:

$$\frac{M}{R^2W} = \frac{m}{r^2w} \quad (5.4)$$

Sustituyendo con los valores actualmente empleados por el *rover* original y la maqueta:

$$m = \left[\frac{r^2w}{R^2W} \right] M \quad (5.5)$$

$$m = \left[\frac{0,070^2 m^2 \times 0,049 m}{0,25^2 m^2 \times 0,2 m} \right] \left[\frac{900 kg}{6 ruedas} \right] = 2,88 kg \quad (5.6)$$

5.4. Experimentación y Resultados

Para la validación del instrumento se realizaron varios experimentos, diseñados para obtener datos que puedan ser de interés para la comunidad científica. A continuación se irán presentando los experimentos acompañados de una breve discusión que conduce al siguiente experimento, hasta que finalmente se arriban a conclusiones.

Inicialmente, la rueda se configuró para rodar sobre arena a la gravedad de Marte. La velocidad angular empleada fue de 4 rad/s y la masa de la rueda fue de 1.05 kg, la cual está en el orden de magnitud de la masa calculada

mediante el escalamiento. Se empleó una masa ligeramente inferior pues se observó que el incremento en la masa conduce a peores resultados en cuanto al deslizamiento de la rueda. El actuador, motor acoplado a la rueda, fue configurado para recibir la señal de inicio mediante la detección automática de la gravedad. Los sensores empleados fueron: acelerómetro, cámara y sensor de giro de la rueda.

Luego de 10 repeticiones se obtuvieron los resultados resumidos en la Figura 5.2.

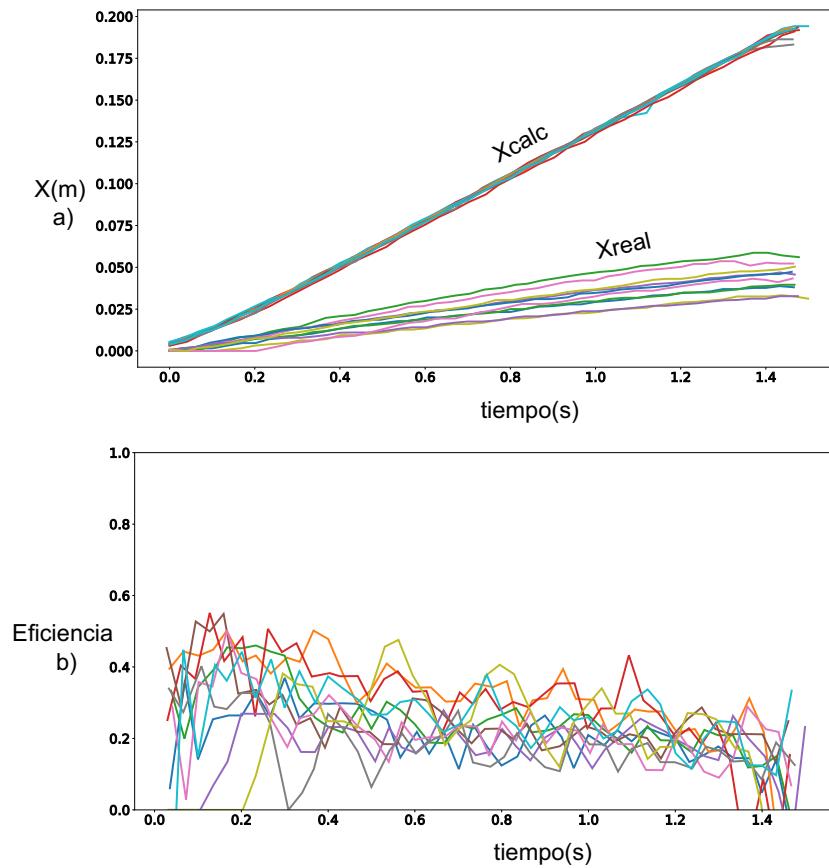


Figura 5.2: Rodadura sobre arena a la gravedad de Marte con una rueda a velocidad angular de 4 rad/s y masa de 1.05 kg. (a) Evolución de la posición linear en el tiempo, obtenida por ambas vías, durante 10 repeticiones del experimento. (b) Evolución temporal de la eficiencia de rodadura durante 10 repeticiones.

Seguidamente, se repitió un experimento con el mismo valor de velocidad angular y masa de la rueda, pero esta vez en la gravedad de la Tierra. Para ello se configuró el inicio del actuador de forma manual, debido a que la gravedad efectiva no varía en este tipo de experimentos. El resto de los parámetros se configuró igual que en el experimento anterior.

Este experimento se diseñó para determinar si la gravedad juega un papel importante en la eficiencia de rodadura sobre arena. La Figura 5.3 muestra un resumen de los datos obtenidos en 10 repeticiones de esta configuración.

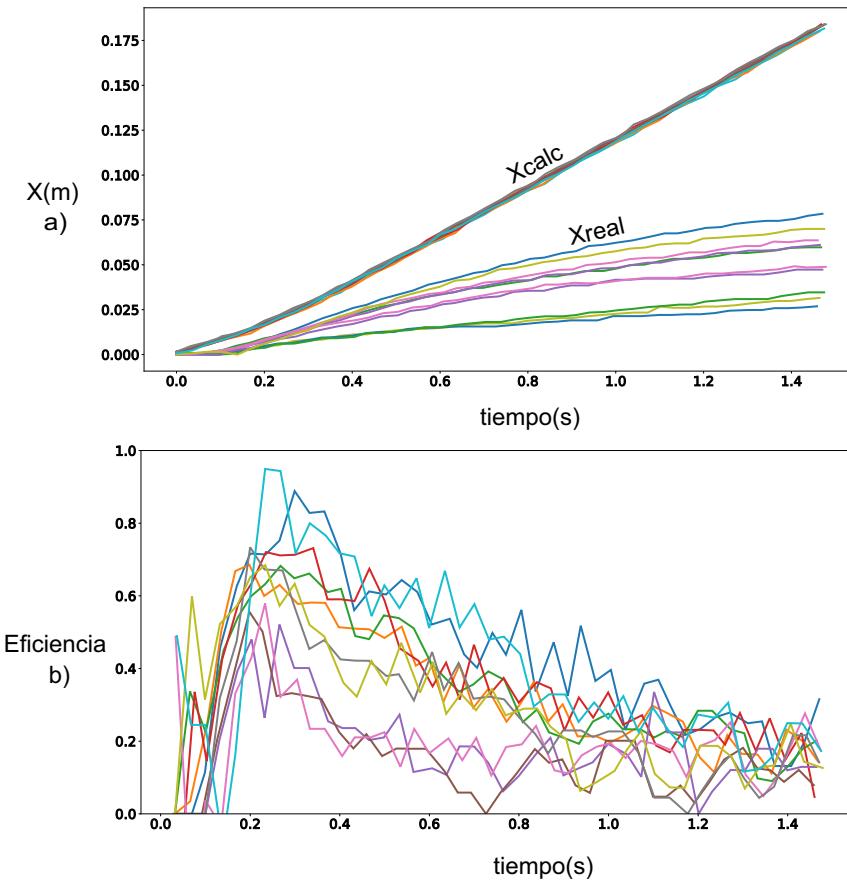


Figura 5.3: Rodadura sobre arena a la gravedad de la Tierra con una rueda a velocidad angular de 4 rad/s y masa de 1.05 kg. (a) Evolución de la posición en el tiempo, obtenida por ambas vías, durante 10 repeticiones del experimento. (b) Evolución temporal de la eficiencia de rodadura durante 10 repeticiones del experimento.

Luego de realizar experimentos con los mismos parámetros en Tierra que en Marte, se muestran los resultados promedio en la Figura 5.4. Nótese que en ambas condiciones de gravedad, la velocidad angular y la masa eran exactamente iguales.

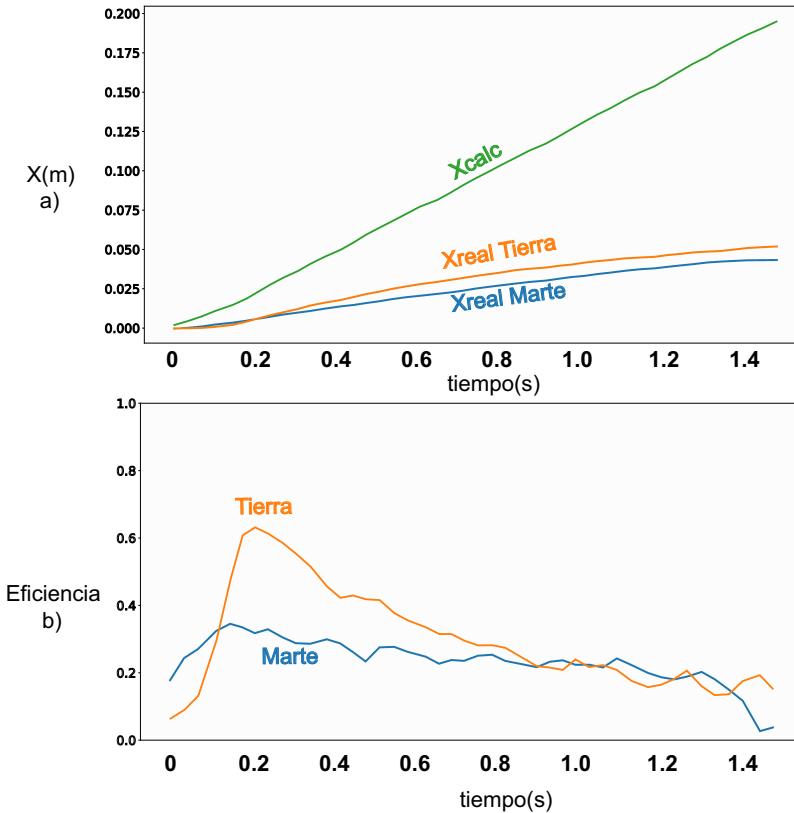


Figura 5.4: Comparación de rodaduras a velocidad angular de 4 rad/s y masa de 1.05 kg, para las condiciones gravitacionales de Marte y la Tierra. (a) Evolución de la posición lineal promedio, obtenida por ambas vías. (b) Evolución de la eficiencia promedio.

En la Figura 5.4 no se observan cambios significativos en el desempeño general de la rueda. La mayor diferencia radica en la evolución temporal de la eficiencia durante la arrancada. Esta anomalía pudiera sugerir que la gravedad juega algún papel en la rodadura sobre arena. Sin embargo, las diferencias observadas pueden ser debidas al efecto trivial de la pérdida de peso relacionada con el cambio de gravedad. Para determinar si las dife-

encias observadas tienen una relación con fenómenos intrínsecos del medio granular, es necesario compensar la masa de forma que se obtenga un peso constante tanto en la Tierra como en Marte.

Si se considera que la masa de 1.05 kg representa un peso de 3.889 N en Marte, es necesario calcular la masa de la rueda que equivale al mismo peso en Tierra que el peso obtenido en Marte. Esta masa puede ser obtenida según:

$$m_{\text{eq}} = \frac{P}{g} \quad (5.7)$$

Usando la ecuación 5.7 se obtiene que la masa necesaria para obtener el mismo peso en la Tierra es de 0.3968 kg. Con este valor de masa de la rueda y los mismos parámetros de configuración que el experimento anterior, se procedió a realizar 10 repeticiones de un experimento con este nuevo valor de masa, que garantiza que el peso sea constante, y la misma velocidad angular de 4 rad/s. Los resultados obtenidos en estos 10 experimentos se muestran en la Figura 5.5.

Luego de realizar experimentos con el mismo peso en Tierra que en Marte, se muestran los resultados promedio en la Figura 5.6. Nótese que en ambas condiciones de gravedad, la velocidad angular y el peso son exactamente iguales.

De la Figura 5.6 se puede concluir que el efecto de la gravedad en la rodadura sobre arena parece no depender únicamente de la variación experimentada en el peso de la rueda. Al parecer, ocurre una modificación entre las interacciones entre las partículas del medio granular que modifican el comportamiento general de la rueda. Una posible hipótesis es que la modificación de estas interacciones se compensa con la pérdida de peso de la rueda y permite explicar la similitud entre los resultados a la misma masa. Sin embargo, para arribar a conclusiones más certeras es necesario realizar más experimentos variando otros parámetros que permitan generalizar esta hipótesis.

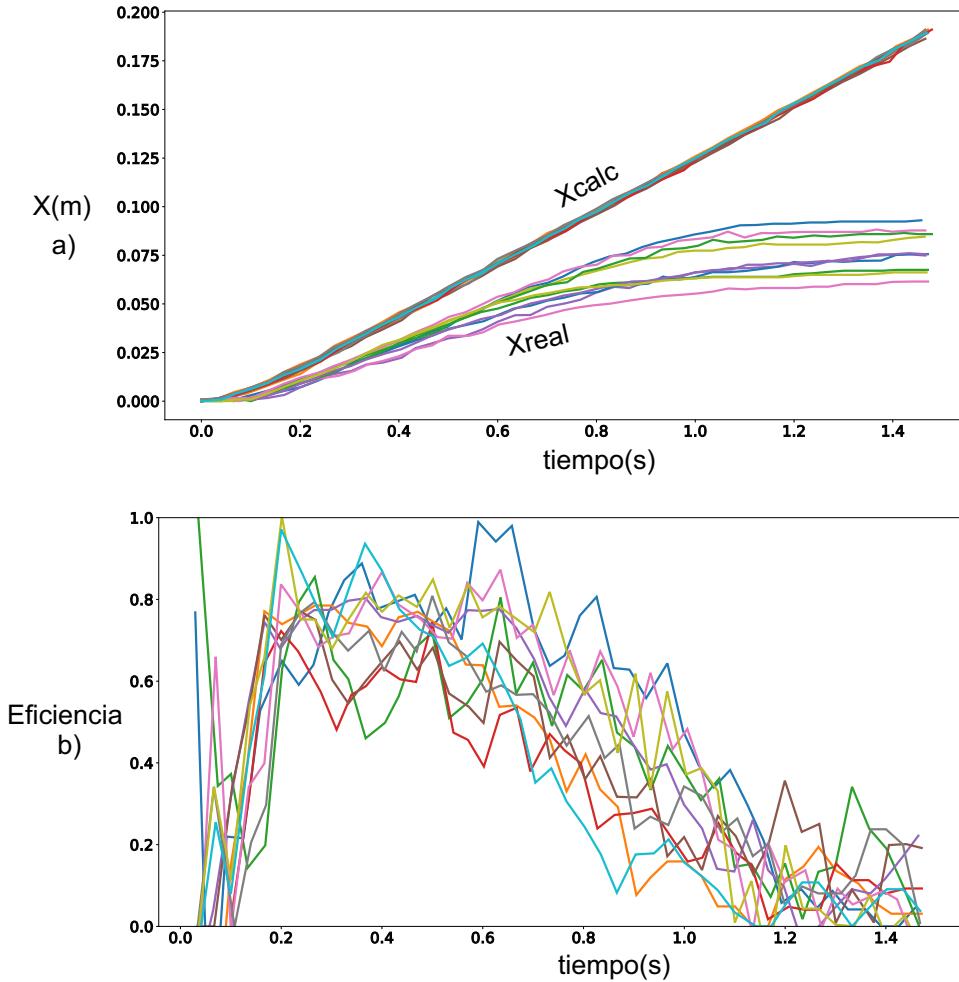


Figura 5.5: Rodadura sobre arena a la gravedad de la Tierra con una rueda a velocidad angular de 4 rad/s y masa de 0.3968 kg, para lograr el mismo peso que se obtuvo en los experimentos en las condiciones de Marte. (a) Evolución de la posición lineal real en el tiempo durante 10 repeticiones del experimento. (b) Evolución temporal de la eficiencia de rodadura durante 10 repeticiones del experimento.

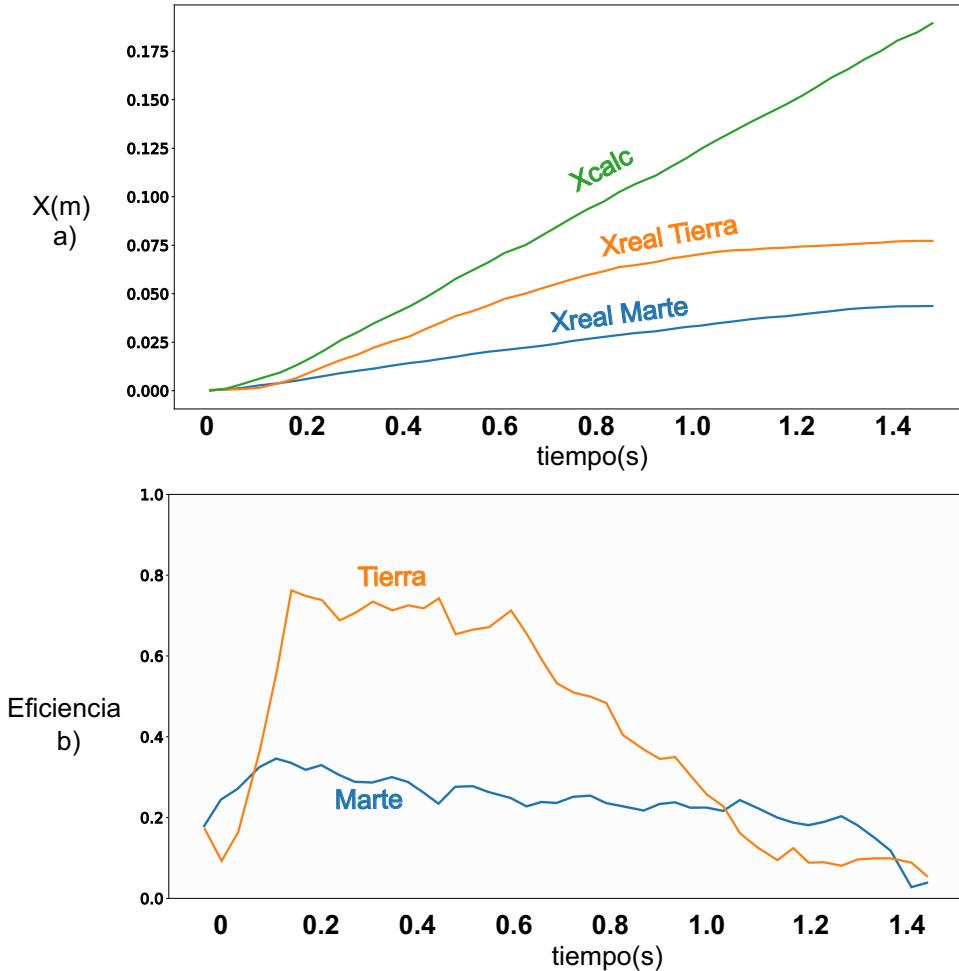


Figura 5.6: Comparación de rodaduras a velocidad angular de 4 rad/s y peso de 3.889 N, para las condiciones gravitacionales de Marte y la Tierra. (a) Evolución de la posición lineal real en el tiempo promediada en 10 repeticiones del experimento. (b) Evolución temporal de la eficiencia de rodadura promediada en 10 repeticiones del experimento.

5.5. Conclusiones Parciales

Con el instrumento diseñado es posible recrear un ambiente apropiado para el estudio de fenómenos físicos a diversas gravedades, particularmente comprobado mediante el análisis de rodaduras sobre medios granulares.

La gravedad parece afectar el proceso de rodadura de la rueda de forma no trivial. Sin embargo, es necesario realizar experimentos de este tipo para varios valores de masa y velocidad angular, con el fin de observar si se mantiene la dependencia entre la eficiencia de la rodadura y la gravedad.

Conclusiones

El diseño y construcción del instrumento requirió la solución de problemas de índole mecánico, electrónico y computacional, que una vez resueltos condujeron a perfeccionar el desempeño alcanzable por este. A continuación se sintetizan las principales conclusiones que han surgido de la solución de los problemas enfrentados a lo largo de la investigación.

- Se analizaron los fundamentos físicos que sustentan la experimentación a diversas gravedades.
- El instrumento diseñado constituye una solución efectiva y de bajo costo para la realización de experimentos que requieren modificar la gravedad efectiva en bajos intervalos de tiempo en el rango de 0.4 g a 1.2 g.
- La flexibilidad que provee el sistema computacional permite ajustar diversos parámetros en el funcionamiento del instrumento sin necesidad de realizar modificaciones de hardware. Esto permite que el espectro de experimentos compatibles con el instrumento sea muy amplio.
- Con el algoritmo de clasificación propuesto y los parámetros ajustados por el modelo de optimización, es posible clasificar en tiempo real las muestras de la señal de aceleración, en uno de los 4 estados propuestos. Esto permite aprovechar al máximo el tiempo efectivo de los experimentos y desencadenar la activación de los actuadores con bajo tiempo de retardo.
- Con el instrumento diseñado es posible recrear un ambiente apropiado para el estudio de rodaduras a diversas gravedades. Con mediciones preliminares se observó que la gravedad parece afectar el proceso de rodadura de la rueda de forma no trivial.

- Relativo al caso de estudio, es necesario realizar más experimentos de rodadura para varios valores de gravedad, masa y velocidad angular, con el fin de observar si se mantiene la dependencia entre la eficiencia de la rodadura y la gravedad.

Recomendaciones

- Evaluar la posibilidad de ampliar el rango de gravedades alcanzable con el instrumento.
- Diseñar nuevos experimentos científicos que hagan uso de las bondades de la plataforma diseñada.
- Continuar con el empleo del intrumento para el estudio de la eficiencia de rodadura sobre medios granulares a diversas gravedades, dados los resultados preliminares obtenidos al respecto en este trabajo.
- Diseñar un instrumento complementario basado en máquinas centrifugadoras que permita alcanzar con facilidad los valores de $g_{\text{eff}} > g$ que no pueden ser alcanzados con el método propuesto.

Bibliografía

- [1] Domínguez Rubio, Leonardo: *Plataforma experimental y computacional para el estudio de la dinámica de crecimiento de pilas granulares*. B.Sc. Thesis, Universidad de La Habana, Cuba, 2016. (Citado en la página x).
- [2] Sánchez-Colina, G, L Alonso-Llanes, E Martínez, AJ Batista-Leyva, C Clement, C Fliedner, R Toussaint y E Altshuler: *Note: “Lock-in accelerometry” to follow sink dynamics in shaken granular matter*. Review of scientific instruments, 85(12):126101, 2014. (Citado en la página x).
- [3] Reyes González, Alfredo: *Hacia una comprensión cuantitativa de la “exploración libre” en insectos sociales*. B.Sc. Thesis, Universidad de la Habana, Mayo 2016. (Citado en la página x).
- [4] Pletser, Vladimir: *Short duration microgravity experiments in physical and life sciences during parabolic flights: the first 30 ESA campaigns*. Acta Astronaut., 55(10):829–854, 2004. (Citado en las páginas x, xi y 1).
- [5] Brown, Dwayne y Guy Webster: *Now a Stationary Research Platform, NASA’s Mars Rover Spirit Starts a New Chapter in Red Planet Scientific Studies*. http://www.nasa.gov/mission_pages/mer/news/mer20100126.html. Consultado: 2016-10-15. (Citado en la página x).
- [6] Altshuler, E, H Torres, A González-Pita, G Sánchez-Colina, C Pérez-Penichet, S Waitukaitis y RC Hidalgo: *Settling into dry granular media in different gravities*. Geophys. Res. Lett., 41(9):3032–3037, 2014. (Citado en las páginas xi, xi, 5, 7, 8, 9 y 10).
- [7] Callens, Natacha, Javier Ventura-Traveset, Thomas Louis de Lophem, Carlos Lopez de Echazarreta, Vladimir Pletser y Jack JWA van Loon: *Esa parabolic flights, drop tower and centrifuge opportunities for university students*. Microgravity Science and Technology, 23(2):181–189, 2011. (Citado en las páginas 1 y 2).

- [8] Murdoch, Naomi, B Rozitis, SF Green, T L De Lophem, P Michel y W Losert: *Granular shear flow in varying gravitational environments*. *Granular Matter*, 15(2):129–137, 2013. (Citado en la página 2).
- [9] Von Kampen, Peter, Ulrich Kaczmarczik y Hans J Rath: *The new drop tower catapult system*. *Acta Astronautica*, 59(1):278–283, 2006. (Citado en la página 4).
- [10] Loon, Jack JWA van, Jutta Krausse, Humberto Cunha, Joao Goncalves, Hugo Almeida y Peter Schiller: *The large diameter centrifuge, LDC, for life and physical sciences and technology*. En *Life in Space for Life on Earth*, volumen 663, 2008. (Citado en la página 5).
- [11] Goldman, Daniel I y Paul Umbanhowar: *Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media*. *Phys. Rev. E*, 77(2):021308, 2008. (Citado en la página 5).
- [12] Sunday, Cecily, Naomi Murdoch, Olivier Cherrier, S Morales Serrano, C Valeria Nardi, Tristan Janin, I Avila Martinez, Yves Gourinat y David Mimoun: *A novel facility for reduced-gravity testing: A setup for studying low-velocity collisions into granular surfaces*. *Rev. Sci. Instrum.*, 87(8):084504, 2016. (Citado en las páginas 5 y 7).
- [13] IvenSense: *MPU6050*. <http://www.daedalus.ei.tum.de/attachments/article/57/PS-MPU-6000A.pdf>, 2011. (Citado en la página 15).
- [14] Bosch: *BMP180*. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>, 2013. (Citado en la página 15).
- [15] HoneyWell: *HMC5883L*. https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf, 2010. (Citado en la página 15).
- [16] Doerner, Karl F., Michel Gendreau, Peter Greistorfer, Walter J. Gutjahr, Richard F. Hartl y Marc Reimann: *Metaheuristics Progress in Complex Systems Optimization*. Springer, 2007, ISBN 978-0-387-71919-1. (Citado en la página 37).
- [17] Christensen, Philip R, Joshua L Bandfield, James F Bell III, Noel Gorelick, Victoria E Hamilton, Anton Ivanov, Bruce M Jakosky, Hugh H Kieffer, Melissa D Lane, Michael C Malin y cols.: *Morphology and composition of the surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS results*. *Science*, 300(5628):2056–2061, 2003. (Citado en la página 42).

- [18] Golombek, Matthew P: *The surface of Mars: Not just dust and rocks*. Science, 300(5628):2043–2044, 2003. (Citado en la página 42).
- [19] Gee-Clough, D: *The effect of wheel width on the rolling resistance of rigid wheels in sand*. Journal of Terramechanics, 15(4):161–184, 1978. (Citado en la página 42).
- [20] Oida, A, A Satoh, H Itoh y K Triratanasirichai: *Three-dimensional stress distributions on a tire-sand contact surface*. Journal of terramechanics, 28(4):319–330, 1991. (Citado en la página 42).
- [21] Coutermash, Barry: *Velocity effect of vehicle rolling resistance in sand*. Journal of Terramechanics, 44(4):275–291, 2007. (Citado en la página 42).
- [22] Taberlet, Nicolas, Stephen W Morris y Jim N McElwaine: *Washboard road: the dynamics of granular ripples formed by rolling wheels*. Physical review letters, 99(6):068003, 2007. (Citado en la página 42).
- [23] De Blasio, Fabio Vittorio y May Britt Saeter: *Rolling friction on a granular medium*. Physical Review E, 79(2):022301, 2009. (Citado en la página 42).
- [24] Mohamed, Abdalsalam y Marte Gutierrez: *Comprehensive study of the effects of rolling resistance on the stress-strain and strain localization behavior of granular materials*. Granular Matter, 12(5):527–541, 2010. (Citado en la página 42).
- [25] Ding, Liang, Haibo Gao, Zongquan Deng, Keiji Nagatani y Kazuya Yoshida: *Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil*. Journal of Terramechanics, 48(1):27–45, 2011. (Citado en la página 42).
- [26] Burns, Keaton J, Neil J Balmforth y Ian J Hewitt: *Rolling resistance of shallow granular deformation*. En *Proc. R. Soc. A*, volumen 473, página 20170375. The Royal Society, 2017. (Citado en la página 42).
- [27] Wilkinson, R Allen, Robert P Behringer, James T Jenkins y Michel Y Louge: *Granular materials and the risks they pose for success on the moon and mars*. En *AIP conference proceedings*, volumen 746, páginas 1216–1223. AIP, 2005. (Citado en la página 42).

- [28] Kobayashi, Taizo, Yoichiro Fujiwara, Junya Yamakawa, Noriyuki Yasufuku y Kiyoshi Omine: *Mobility performance of a rigid wheel in low gravity environments*. Journal of Terramechanics, 47(4):261–274, 2010. (Citado en la página 43).
- [29] Wong, JY y Taizo Kobayashi: *Further study of the method of approach to testing the performance of extraterrestrial rovers/rover wheels on earth*. Journal of Terramechanics, 2012. (Citado en la página 43).
- [30] Nakashima, Hiroshi y Taizo Kobayashi: *Effects of gravity on rigid rover wheel sinkage and motion resistance assessed using two-dimensional discrete element method*. Journal of terramechanics, 53:37–45, 2014. (Citado en la página 43).