



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Sistema de detección objetiva de cojera en caballos  
System for objective detection of lameness in horses

Autora

Marta Lanau Coronas

Director

Roberto Casas Nebra

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
2020



# RESUMEN

Diversos estudios afirman que la enfermedad más frecuente diagnosticada en caballos es la cojera, suponiendo grandes pérdidas económicas. La forma habitual de detección de cojera es mediante una evaluación subjetiva, lo cual sufre numerosas limitaciones. Por ello, aprovechando el gran avance tecnológico de las últimas décadas, se han estudiado posibles soluciones objetivas al problema. Sin embargo, no está clara una solución definitiva por el momento. En este contexto, el objetivo de este TFM es realizar una revisión del estado del arte de los métodos de sensado desarrollados hasta la actualidad, estudiar, proponer y diseñar una solución alternativa y novedosa al problema, así como validarla experimentalmente.



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y objetivos . . . . .	1
1.2. Metodología . . . . .	2
<b>2. Estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1. Análisis cinético . . . . .	3
2.2. Análisis cinemático . . . . .	6
2.3. Discusión . . . . .	12
<b>3. Sensorización</b>	<b>13</b>
3.1. Opciones de sensorización . . . . .	13
3.1.1. Galgas extensiométricas . . . . .	13
3.1.2. Sensor óptico IR . . . . .	14
3.1.3. Sensor magnético . . . . .	14
3.2. Discusión . . . . .	14
3.3. Sensorizado magnético . . . . .	15
3.3.1. Fundamentos teóricos . . . . .	15
3.3.2. Configuraciones propuestas . . . . .	17
<b>4. Diseño y desarrollo</b>	<b>19</b>
4.1. Elementos . . . . .	19
4.1.1. Microcontrolador . . . . .	19
4.1.2. Batería . . . . .	20
4.1.3. Sensor magnético . . . . .	20
4.1.4. Imanes . . . . .	21
4.2. Desarrollo . . . . .	21
4.2.1. Código . . . . .	22
<b>5. Experimentación</b>	<b>25</b>
5.1. Simulación y sistema 2D . . . . .	25

5.2. Casco real . . . . .	27
5.2.1. Extracción y análisis de datos . . . . .	28
5.3. Caballo <i>in vivo</i> . . . . .	32
<b>6. Conclusiones</b>	<b>43</b>
6.1. Trabajo futuro . . . . .	44
<b>7. Bibliografía</b>	<b>45</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>51</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>53</b>
<b>Anexos</b>	<b>54</b>
<b>A. Código Arduino</b>	<b>57</b>
<b>B. Código Python</b>	<b>61</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto y objetivos

Según diversos estudios, la enfermedad más frecuente diagnosticada en caballos es la cojera [1][2]. En 2016, el National Equine Health Survey (NEHS) publicó que este síndrome supuso un tercio de los casos reportados en Reino Unido [3]. En este contexto, es necesario describir la cojera como un trastorno en la marcha normal debido a un desorden funcional o estructural del sistema locomotor, el cual atribuye normalmente dolor ortopédico [4]. Debido a su sistema locomotor, el caballo es ampliamente utilizado como animal de ocio y deportes, como carreras, lo cual exige un gran rendimiento. Por ello, las alteraciones de este sistema son los principales motivos de consultas veterinarias [5]. De hecho, conlleva el mayor gasto económico médico en el campo equino, alcanzando los 1000 millones de dólares anuales sólo en los Estados Unidos [1].

La forma habitual de detección de la cojera en caballos es mediante una evaluación subjetiva por parte de los veterinarios. Se trata de realizar un examen visual de la marcha para detectar asimetrías en el movimiento, la característica clínica común relacionada la cojera [6]. Sin embargo, este análisis subjetivo está limitado por numerosos factores, como la resolución temporal máxima del ojo humano, la percepción de asimetría y la memorización. Otra desventaja es la falta de acuerdo en el diagnóstico de distintos expertos. Esto es debido, en parte, a la falta de uniformidad de las distintas escalas de medida de cojera [5]. En [7] se detalla un estudio sobre la repetibilidad de la evaluación subjetiva de la cojera. En distintos casos, el acuerdo entre los expertos varió del 52 % al 93 %, correspondiendo el porcentaje inferior a casos de cojera leve.

En los últimos años, un número creciente de sistemas de análisis de marcha ha entrado en el mercado, lo que resalta la demanda de esta tecnología en las ortopedias equinas. El análisis cuantitativo de la marcha tiene el potencial de ofrecer información imparcial de la marcha que puede ayudar a la toma de decisiones clínicas [5]. Los

métodos objetivos cuantifican la cojera en una escala continua, lo que los hace más precisos frente a las escalas discretas de los métodos subjetivos. De esta manera, también será más probable la detección de una mejora parcial en la cojera después del tratamiento [8]. Sin embargo, por el momento no existe una solución clara al problema de detección objetiva de cojera.

Por todo lo anterior, el objetivo último de este Trabajo de Fin de Máster es elaborar un método alternativo al problema. Para ello, como primer paso, se debe realizar una investigación crítica sobre los métodos de sensado desarrollados. De esta manera, será posible conocer el estado del arte, analizar cuáles son las técnicas más utilizadas, entre otros factores. Tras estudiar los diferentes tipos de sensores existentes, se busca proponer un sistema electrónico novedoso que se ajuste a las necesidades de la cuestión. Una vez elaborada la idea inicial del sistema, se pretende diseñar e implementar el hardware para la recogida de información. Posteriormente, la intención es realizar su validación mediante diferentes entornos de test, simulados y reales, para finalmente llevar a cabo la experimentación con un caballo *in vivo*. Tras la recogida de datos, la meta es relacionar los datos obtenidos con la naturaleza de la pisada del caballo.

## 1.2. Metodología

El enfoque y las herramientas utilizadas en el desarrollo del trabajo han sido las siguientes:

Tras una fase de documentación y revisión bibliográfica para conocer las tecnologías utilizadas, se ha realizado el diseño electrónico de un sistema de sensado capaz de captar la deformación del casco del caballo, puesto que es un factor muy ligado a la pisada del animal. Este sistema emplea unos imanes de neodimio adheridos al casco y consta de un sensor capaz de obtener datos tanto inerciales como magnéticos.

Por un lado, el microcontrolador utilizado para ello es un ESP32, programado con el entorno de desarrollo Arduino. Para la recogida de información, los datos son enviados vía WiFi en tiempo real a un ordenador, para lo que se ha elaborado un programa en lenguaje Python con el entorno PyCharm de la empresa JetBrains. Una vez obtenidos, se han cargado en el programa Microsoft Excel, donde se han analizado los datos recogidos. Previamente, el sistema se ha modelado mediante el software de simulación COMSOL Multiphysics para verificar su comportamiento.

Por otro lado, la redacción de la memoria se ha realizado en LaTeX mediante el editor Overleaf.



# Capítulo 2

## Estado del arte

Con el auge científico y tecnológico de las últimas décadas, se han desarrollado numerosas técnicas para el análisis del movimiento. Estudios sobre el movimiento humano y su sistema locomotor, como la marcha, tienen sus aplicaciones en la detección de factores como enfermedades o lesiones, en cuanto a salud, y fatiga, en cuanto a rendimiento deportivo [9]. Esta información supone una herramienta más en la toma de decisiones. Sin embargo, en el campo equino, no está clara la forma de abordar este aspecto.

En la literatura, las técnicas para evaluar de forma objetiva la marcha de los caballos se basan en la cuantificación de la fuerza (análisis cinético) y/o del movimiento (análisis cinemático). Esto permite conocer los parámetros biomecánicos de la marcha equina. Numerosos estudios se centran en la detección de cojera, sin embargo, difieren en los métodos utilizados.

Los estudios cinéticos analizan las fuerzas internas y externas resultantes del trabajo músculo-esquelético, mientras que los cinemáticos se centran en movimiento de los segmentos del cuerpo durante la locomoción [5].

### 2.1. Análisis cinético

El método más común de análisis cinético de la marcha en caballos son las plataformas de fuerza [10]. Se trata de sistemas mecánicos capaces de medir las fuerzas de reacción del suelo mediante celdas de carga. Estas pueden contener elementos piezoeléctricos o galgas extensométricas que causan una tensión proporcional a la fuerza aplicada [11].

Tanto en condiciones naturales como en casos de cojera inducida, cuanto más severa es la cojera en un miembro, más decrece el pico de fuerza de reacción vertical (pVRF). En la Figura 2.1 se muestran las fuerzas de reacción producidas por la pata delantera izquierda de un caballo en contacto con una plataforma de fuerza.  $F_x(-)$  se trata de la

fuerza medial,  $F_x(+)$  la fuerza lateral,  $F_y(-)$  es la fuerza de frenada,  $F_y(+)$  la propulsiva y  $F_z(+)$  la fuerza vertical [12].

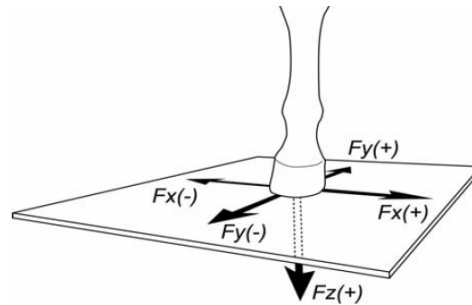


Figura 2.1: Fuerzas de reacción generadas por el contacto de un miembro del caballo con una plataforma de fuerza [12].

Controlando la velocidad del trote y recogiendo suficientes golpes válidos, la media de pVGRF puede incluso detectar la cojera no vista a simple vista [12]. En [13], este método se utiliza para diferenciar y cuantificar enfermedades de cojera en los miembros posteriores y ataxia espinal. Sin embargo, en ocasiones pVGRF no es una medida válida para diferenciar caballos sanos de cojos, ya que algunas condiciones de cojera no causan un cambio en el pico medio, si no un cambio en la forma de la señal VGRF. Además, la forma de la curva VGRF puede contener información significativa para localizar la cojera dentro de la extremidad afectada [10]. En la Figura 2 se muestran las curvas típicas de las fuerzas de reacción frente al tiempo generadas por ordenador.

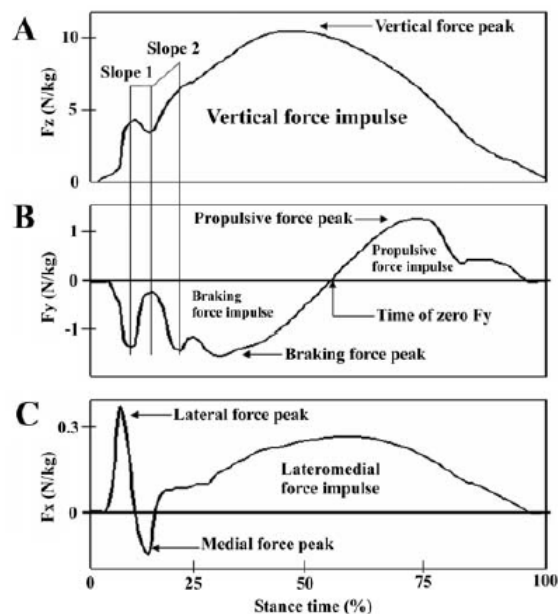


Figura 2.2: Curvas típicas generadas por ordenador de las fuerzas de reacción frente al tiempo [12].

Un inconveniente de utilizar placas de fuerza es el alto tiempo que requiere. Esto es debido a la dificultad de que los golpes capturados sean válidos (la pisada debe ser el centro), puros (que solo un miembro golpee en ese instante), con el miembro de interés, en un pequeño rango controlado de velocidades, y debido a su superficie limitada sólo permite la recogida de una muestra por prueba. Existen otras desventajas, ya que las fuerzas de reacción son sensibles a la velocidad de las patas, del torso y a movimientos en la cabeza (en patas delanteras). Además, no todas las cojeras exhiben el mismo dolor en todas las zancadas, ni dolor en cada una, para lo cual sería necesario hacer un análisis durante más tiempo [10].

Otros métodos han sido desarrollados en relación con la cinética del movimiento. Dos métodos potenciales para medir la cojera en pasos continuos son las herraduras telemedidas [14] y las cintas de correr equinas [15], ambos para medir la fuerza. En el primer caso, aún no se ha logrado un dispositivo que cumpla las condiciones necesarias para que no se vea alterado el paso del caballo. El segundo incorpora múltiples piezoeléctricos sensibles a la carga en la plataforma de la cinta de correr y un sistema de posicionamiento. Este dispositivo ha generado información importante sobre la relación entre VGRF y cojera, pero está hecha a medida, es costosa y requiere una considerable experiencia para su uso, lo cual es un gran impedimento para un uso cotidiano [10].

Otra opción para la medida de fuerzas en la pisada es mediante la colocación de galgas extensiométricas en la pared del casco del animal [16] [17]. Distintas patentes se han elaborado al respecto [18] [19]. También en [20] y [21] tratan de identificar características de la marcha del caballo (como velocidad, dirección del movimiento, tipo de herradura...) mediante el análisis de datos de esfuerzo en el casco. Para ello se colocaron galgas extensiométricas en la parte anterior y lateral de este. Un problema observado fue la baja repetibilidad del método debido al patrón de movimiento único de cada caballo. Ya que estas mediciones pueden variar en función de diversos factores como la forma del casco, la presencia o ausencia de herraduras, o las condiciones de la superficie del suelo, la asociación entre cojera y deformación del casco podría describirse para distintas combinaciones de estos factores [10].

Otros métodos se han desarrollado para obtener la relación entre la deformación del casco y la fuerza aplicada. En [22] este estudio se realiza mediante la fotogrametría. Se describe un sistema para la medida de deformación tridimensional del casco para diferentes cargas. Este está compuesto de una placa de fuerza para controlar el peso y tres cámaras que siguen un movimiento circular alrededor del casco con unos marcadores. Estas medidas se hacen mientras el caballo está quieto. Como se muestra la Figura 2.3, la aplicación de una fuerza vertical hacia abajo conlleva un movimiento

de expansión horizontal de la parte trasera de las paredes del casco.

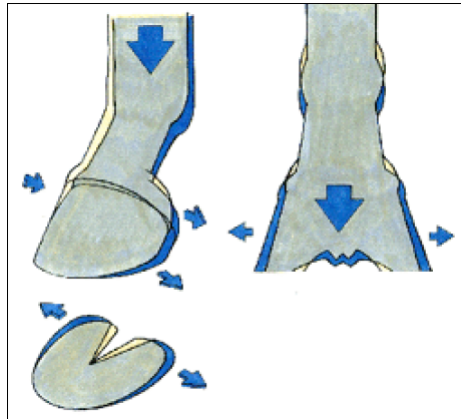


Figura 2.3: Movimiento del casco tras la aplicación de una fuerza vertical [22].

La tecnología FBG (fibra con rejilla de Bragg) también es empleada para el estudio de la marcha equina. En [23] se describen dos técnicas de uso, en la primera el sensor es fijado directamente en el casco del caballo mientras que en la segunda, más robusta, se encapsula en un compuesto reforzado con fibra de carbono en forma de herradura. Esta técnica permite obtener datos en tiempo real e identificar tanto la compresión y deformación como la frecuencia del paso que podrían detectar anomalías en la marcha. Los valores de esfuerzo mediante la primera técnica son similares a los obtenidos mediante galgas extensiométricas en [24].

Otros casos de estudio utilizan sensores de tipo inercial unidos a la extremidad o la pared del casco. Son capaces de medir fenómenos de impacto, como la frecuencia y la amplitud de la vibración de impacto, que pueden estar asociados con la cojera. Sin embargo, dichos dispositivos no miden pVGRF, el parámetro cinético más estrechamente asociado con la cojera [10].

## 2.2. Análisis cinemático

Muchos investigadores han preferido centrarse en el análisis cinemático en vez del cinético por la facilidad para la recolección de datos de varios pasos sucesivos. La cojera en un miembro se manifiesta mediante un aumento en la asimetría del movimiento del cuerpo y las extremidades. Esto que permite decidir un índice a partir del cual la asimetría existe, para cada parámetro cinemático [10].

Actualmente, un sistema muy utilizado para el diagnóstico de cojera es el basado en sistemas ópticos de captura de movimiento (OMC) en 3D. Estos sistemas utilizan varias cámaras fijas (principalmente infrarrojas) y rastrean la posición de varios marcadores

reflectantes simultáneamente, corrigiendo los errores de perspectiva que pueden influir en sistemas 2D [5].

Para ello, en el estudio descrito en [25] utilizan 28 cámaras infrarrojas y colocan marcadores esféricos reflectantes en las partes del caballo representativas para la detección de cojera (cabeza, cadera y extremidades). Sin embargo, rastrear la posición de distintas partes del cuerpo del caballo utilizando cámaras fijas y marcadores pasivos sufre limitaciones en el campo de visión ya que algunos pueden estar ocultos durante el movimiento. Inicialmente, este inconveniente requería que las pruebas se realizaran en una cinta de correr. Sin embargo, el equipo para este análisis es costoso y requiere mucho tiempo de operación. Además, se debe entrenar a los caballos para la tarea. Una ventaja de este método, es que mediante la cinta se puede controlar la velocidad, por lo que disminuirá la variación del movimiento, ya que está demostrado que el patrón del movimiento depende de la velocidad. En la actualidad este problema está solventado debido al aumento del campo de visión de las cámaras. Otra limitación, es el desplazamiento de los sensores en la piel, aunque se le da menos importancia por afectar de manera similar a animales del mismo tamaño [5].

Un método menos utilizado para el análisis del movimiento de los caballos es mediante sensores de radar. En [2] se describe un caso de estudio en el que los sensores son colocados al final de un corredor por el que se hace caminar y trotar a un caballo. Este sensor captura una firma micro-Doppler tanto a la ida como a la vuelta. Posteriormente se extraen características de estas firmas y se comparan las de los caballos sanos y los cojos. Sin embargo, el inconveniente de este método es la dificultad de obtener información comparable trabajando con caballos, ya que no son cooperativos. Esto provoca que no sigan exactamente las mismas trayectorias en las distintas recogidas de datos.

Otro método de análisis de marcha es el basado en sensores inerciales. Se trata de sensores inalámbricos equipados con acelerómetros y/o giroscopios. Estos sensores son adheridos a ciertas partes del cuerpo y obtienen información del movimiento durante la locomoción. Es un sistema muy barato ya que no necesita coste de infraestructura. Además, no son invasivos, son rápidos y sencillos de colocar y permiten recolección de datos en tiempo real. Una desventaja es que estos sensores son propensos a la acumulación de error, por lo que se van volviendo imprecisos, aunque existen técnicas para tratar de compensarlo.

En [8], se muestra un estudio que compara un sensor basado en acelerómetro y giroscopio piezoeléctrico con un sistema de análisis de movimiento basado en vídeo. Se concluye una alta correlación entre las interpretaciones de los resultados por ambos métodos. Los mismos investigadores, en 2011 afirmaron que el sistema inercial

tiene una repetibilidad adecuada para estudiar su uso clínico [26]. Además, un año más tarde, junto con placas de fuerza, este sistema se utilizó para detectar el miembro más afectado en casos de cojera bilateral [27]. Este prototipo basado en sensores inerciales fue entonces introducido en el mercado (Lameness Locator, Equinosis LLC<sup>1</sup>), siendo utilizado en estudios posteriores relacionados con el diagnóstico de cojera. Algunos de ellos son [28], [29] o [30].

En otro estudio publicado en 2018, [6], se utiliza un sistema basado en 8 sensores IMU. Los datos son cogidos y enviados de forma inalámbrica en tiempo real. Se realizó una comparación de este sistema con OMC, por ello los caballos también fueron equipados con marcadores reflectantes, cogiendo datos con 18 cámaras infrarrojas sin necesidad de una cinta de correr. El acuerdo entre los sistemas OMC e inercial fue en general bueno, excepto por errores atribuidos a la configuración del sistema OMC: las cámaras tienen dificultades con la percepción de profundidad a esta distancia, y la ubicación del marcador en las extremidades anteriores no fue óptima. De hecho, esto puede resaltar la fortaleza de los sistemas basados en IMU, especialmente para medir variables de marcha que los sistemas OMC no pueden rastrear fácilmente.

En [31], se utilizan de forma complementaria junto con placas de fuerza. El estudio reportado aquí arrojó evidencia preliminar de que las mediciones de sensores inerciales del movimiento pélvico vertical asimétrico pueden proporcionar información relevante sobre la naturaleza de la cojera de las extremidades posteriores.

---

<sup>1</sup><https://equinosis.com/>

Herramienta de medida	Detalles	Suelo / Cinta	Nº sujetos	Procesado	Comparado con	Resultados	Ref.
Plataforma de fuerza - IMU	2 ac. (cabeza, pelvis) gir. (ext. delantera)	Suelo	Sanos/ cojera leve en extr. posteriores : 21	Regresión lineal por pasos para observar asociaciones entre las posiciones máxima y mínima de la cadera con las fuerzas obtenidas		Correlación moderada entre la posición mínima pélvica y VGRF: $R_a^2 = 0.6$ , $P < 0.001$	[31]
Plataforma de fuerza		Suelo	Cojera inducida en ext. delantera : 32	Cálculo del coeficiente de correlación, sensibilidad, sensibilidad y el coeficiente de variación de cada parámetro cinético	Análisis subjetivo	Decrezen las fuerzas medidas (pVGRF, propulsiva...) en la cojera. Coeficientes de Spearman entre grado de cojera y: pVGRF(0.882) , pico de la fuerza de frenado (0.679)	[12]
Plataforma de fuerza		Suelo	Sanos: 12 Cojera (extr. traseras): 12 Ataxia espinal: 12	Análisis de varianza para determinar si los parámetros cinéticos se alteran por la cojera o la ataxia espinal	Análisis subjetivo	Diferencia entre cojera y ataxia espinal Coeficiente de correlación de Spearman entre cojera subj. y obj. (parámetro VFP): $\rho = 0.727$	[13]
OMC	28 cámaras infrarrojas Marcadores en cabeza, extr., columna, pelvis	Suelo en línea recta	Sanos: 12	Parámetros de simetría en función del desplazamiento de marcadores.		Los parámetros de simetría varían según las condiciones de las pruebas (línea recta/circular, repeticiones)	[25]
IMU	8 sensores inalámbricos Datos enviados en tiempo real	Suelo	Sanos: 7	Obtención de parámetros de simetría, ángulos de los miembros	OMC, 18 cámaras	Alta correlación, unas medidas de otras distan mm, errores atribuidos a la configuración de OMC	[6]

Radar	Captura de firma micro-Doppler	Suelo en línea recta	Sano: 1 Cojera severa en extr. delantera : 1	Extracción de características para clasificación entre sanos/cojos mediante Support Vector Machine (SVM) y Nearest Neighbour (kNN)		Es posible inferir diferencias entre la marcha de sanos y cojos. Se utilizan 3 parámetros de entrada en dos clasificadores, con una precisión del 90%	[2]
IMU	2 ac. (cabeza, pelvis) 2 gir. (extr. delantera y trasera)	Cinta mecánica	Sanos: 2 Cojera inducida: 4 Enfermedad navicular (cojera): 2	Análisis estadístico de los datos	Video-based motion analysis system	Alta correlación entre sistemas: extr. delanteras: $r^2 = 0.954$ extr. traseras: $r^2 = 0.8235$	[8]
IMU	2 ac. (cabeza, pelvis) 1 gir (extr. delantera)	Suelo en línea recta	Sanos: 236	Análisis de patrones del movimiento mediante técnicas de procesado de la señal (integrado con corrección de error, convolución, ajuste de curva...)		Alta repetibilidad de las medidas de asimetría del torso para determinar cojera en extr. traseras	[26]
IMU	Ac. (cabeza) gir (extr. delantera)	Suelo en línea recta	Cojera en extr. delantera : 18	Ecuaciones de regresión, medida de error, cálculo del coeficiente de correlación intraclass para cada variable.	Plataforma de fuerza	83.3% de clasificación correcta de cojera en extr. delantera mediante la asimetría del movimiento de la cabeza	[27]
IMU	2 ac. (cabeza, pelvis) 1 gir (extr. delantera)	Suelo , línea recta	Sanos/cojera leve/moderada: 106	Análisis de patrones del movimiento mediante técnicas de procesado de la señal (integrado con corrección de error, convolución, ajuste de curva...)	Análisis subjetivo	Correlación entre la altura mínima de la cabeza y el análisis subjetivo $R^2 = 0.511$	[32]



Galgas extensiométricas	Unidas a la pared del casco	Suelo	35 caballos de distintas razas y condiciones	Análisis de componentes principales, wavelets y redes neuronales artificiales		92% de clasificación correcta de tipo de herradura (back-propagation network)	[20]
Galgas extensiométricas	Unidas a la pared del casco	Suelo	35 caballos de distintas razas y condiciones	Self-Organizing Maps (SOM)		El agrupamiento de la SOM se basa en las características individuales. Cada caballo tiene su patrón de marcha.	[21]
Galgas extensiométricas	Unidas a la pared del casco	Cinta mecánica	Caballos: 6 Burros: 2	Análisis de señal		Identificación de las fuerzas resultantes y sus causas	[17]
Fiber Bragg Gratings (FBG)	2 técnicas: directamente en el casco y encapsulado Sincronizado con cámara		Caballos: 2	Procesado digital de imagen, identificación de puntos de interés para asociarlos con los datos de los sensores FBG		Identificación de la intensidad de compresión y deformación y la frecuencia del paso. Captura de características de distintos tipos de marcha.	[23]
Fotogrametría	Plataforma de fuerza + 3 cámaras	Estático		Diseño de la red fotogramétrica y modelado 3D		Medida de deformación del casco con diferentes cargas con precisión de 0.1-0.2 mm con respecto a la referencia	[22]

Tabla 2.1. Recopilación de distintos casos de estudio para la detección objetiva de cojera

## 2.3. Discusión

Como se ha visto, los métodos desarrollados para el diagnóstico objetivo de cojera en caballos son diversos. Entre ellos, no sólo difieren en la herramienta utilizada, sino también en los parámetros medidos o la colocación de los sensores, entre otros. En la Tabla 2.1 se muestra una recopilación de casos de estudio en la que se observan las características de cada uno de ellos.

Es cierto que todos ellos tienen ventajas e inconvenientes, por ello puede ser importante utilizarlos de forma complementaria. Algunos sistemas son menos accesibles por el nivel económico que requieren, como los que necesitan de una cinta de correr equina. Además de la limitación económica, existen otras dificultades como tener que entrenar al caballo para una situación en la que no está acostumbrado. Esto, además de poder modificar su marcha, puede requerir un excesivo tiempo de entrenamiento del caballo. Los sistemas OMC requieren un elevado número de cámaras y marcadores, lo que eleva su complejidad de uso y calibración. Las plataformas de fuerza presentan el inconveniente de la imposibilidad de obtener datos de pisadas sucesivas. Sin embargo, las desventajas comentadas son superadas por los sensores inerciales. Estos sensores no son invasivos, lo cual es importante para evitar cambios en la marcha normal del animal. También permiten una recolección de datos de forma continua, en tiempo real, inalámbrica y son accesibles económicamente. Además, los resultados obtenidos parecen tener una alta eficacia.

Como se trata de un método de análisis cinemático, podría ser interesante utilizarlo de forma simultánea con otros tipos de métodos. Varias propuestas se discuten en el siguiente Capítulo.

# Capítulo 3

## Sensorización

A partir de las conclusiones obtenidas mediante el análisis del estado del arte, se han propuesto distintas soluciones alternativas al problema de detección de cojera en caballos y estudiado sus ventajas e inconvenientes para concluir con una decisión final para la sensorización.

La mayoría de estas ideas surgen principalmente de la hipótesis de que es posible conocer si un caballo padece cojera en una extremidad a partir de variaciones en la apertura de la parte trasera del casco de dicha extremidad.

Como se ha comentado previamente en el Capítulo 2, en [22] se demostró cómo esa apertura varía según la fuerza aplicada. Además, según diversos artículos relacionados con el análisis cinético de la marcha del caballo, las fuerzas de reacción del suelo difieren para caballos sanos y cojos. De esta manera, podría relacionarse dicha medida con el diagnóstico del caballo. Por ello, el enfoque podría ser conocer esta distancia cuando se aplica una fuerza sobre una pata del animal, más concretamente, durante la marcha, para así trabajar con medidas de pisadas sucesivas.

A continuación, se muestran las distintas opciones que se han valorado para el desarrollo de la sensorización. La idea es mostrar los motivos que condujeron a pensar en ellas y por qué se han seleccionado o descartado para proceder a su desarrollo.

### 3.1. Opciones de sensorización

#### 3.1.1. Galgas extensiométricas

La elaboración de un sistema basado en galgas extensiométricas fue una de las ideas iniciales. Surge de la intención de incorporar un método cinético al mismo tiempo que se utiliza uno cinemático como podría ser los sensores inerciales. Este método no se basa en la medida de la apertura del casco, sino que directamente mide fuerzas resultantes en este durante la marcha. La propuesta de esta técnica es adherir las galgas en la superficie del casco para estudiar los esfuerzos que se producen en este y relacionarlos

con casos de cojera.

### 3.1.2. Sensor óptico IR

Con motivo del objetivo comentado al inicio de este capítulo, se ha contemplado el uso de sensores ópticos para medir la apertura del casco del animal. La idea es adherir el sensor a la parte trasera del casco de forma que sobresalga, e incluir una superficie rígida al otro lado, de tal forma que el sensor sea capaz de medir la distancia a esta y detectar las variaciones que producidas durante la pisada del caballo.

El sensor óptico escogido para ello es el GP2Y0A21YK0F<sup>1</sup>. Se trata de un sensor de medición de distancia infrarrojo mediante el método de triangulación. Este sensor proporciona una tensión analógica de salida proporcional a la distancia detectada.

Se escogió este sensor frente a otros con propósitos similares tras la comparación de algunas de sus características. Por ejemplo, los sensores ópticos láser tienen un alto coste y los sensores ultrasónicos tienen una baja tasa de refresco en la toma de medida, lo que no los hace adecuados para la detección de movimientos rápidos, como es nuestro caso.

### 3.1.3. Sensor magnético

Siguiendo la línea de medir la apertura de la parte trasera del casco, otra opción planteada para la sensorización fue mediante sensores magnéticos. Una de las aplicaciones de este tipo de sensores es la medición de distancias, como en este caso. Básicamente, la hipótesis parte de que el sensor captará más líneas de campo conforme más cerca esté el imán. De esta manera, se plantea la colocación de imanes en la parte trasera del casco y observar la variación de campo magnético durante la pisada. Una de las ventajas de este método es que no se ve afectado por factores como la suciedad o incidencia de luz, como sucede con otros tipos de sensores.

## 3.2. Discusión

Como parece lógico, los métodos propuestos deben ser elaborables en el contexto de un Trabajo de Fin de Máster, sin excederse en presupuesto (como el caso de la cinta de correr equina comentada en el Estado del Arte [15]) y con una suficiente sencillez en su uso para que permita la realización de pruebas experimentales con caballos.

---

<sup>1</sup>[http://www.farnell.com/datasheets/1657845.pdf?\\_ga=2.18415545.1833399445.1591204418-2114043130.1590512166&\\_gac=1.220529964.1591204538.EAIaIQobChMI50iV5ZLm6QIVQpnVCh2U8gEjEAYAAiAAEgIcWfd\\_BwE](http://www.farnell.com/datasheets/1657845.pdf?_ga=2.18415545.1833399445.1591204418-2114043130.1590512166&_gac=1.220529964.1591204538.EAIaIQobChMI50iV5ZLm6QIVQpnVCh2U8gEjEAYAAiAAEgIcWfd_BwE)

Tras una valoración del conjunto de ideas iniciales para la sensorización, se ha concluido que la mejor decisión es la realización del método basado en el sensado magnético, el cual se detalla en las siguientes secciones de la memoria.

Conforme se ha estudiado la técnica basada en galgas extensiométricas, se ha observado que en el pasado se ha utilizado numerosas veces, aunque como método independiente. De hecho, se han lanzado distintas patentes al respecto como se comenta en el Estado del Arte [18] [19]. Es por ello que este método quedó descartado para su diseño e implementación en este TFM ya que la motivación es buscar nuevos enfoques no explorados.

En cuanto a los sensores ópticos infrarrojos, se han excluido, entre otros factores, por su alta sensibilidad a la suciedad y al polvo. Debido a las condiciones del entorno de pruebas, es muy difícil superar este aspecto y evitar el ruido que provocaría en la señal. Mientras el caballo trota es muy probable que la lente del sensor adherido al casco no se mantenga completamente limpia. Sin embargo, hay más motivos que conllevan a su descarte, ya que estos sensores también son sensibles a la luz. Además, el rango de trabajo del sensor seleccionado inicialmente es de 10 a 80 cm, es decir, en algunos casos se vería restringido por el límite inferior por necesitar medir menores tamaños.

Por los anteriores motivos, se ha concluido que el mejor método para medir distancias en este contexto son los sensores magnéticos. Concretamente, se propone relacionar la apertura del casco con la variación de campo magnético.

### 3.3. Sensorizado magnético

Para validar el método propuesto, en primer lugar, se han estudiado los fundamentos físicos teóricos en los que se basa. Posteriormente, en relación a lo deducido, se han ideado distintas configuraciones del sistema.

#### 3.3.1. Fundamentos teóricos

El campo magnético generado por un dipolo magnético es descrito en numerosos libros de texto [33][34]. Este campo, considerado a una distancia  $R$  suficientemente mayor que el tamaño del dipolo, se define como

$$\vec{B} = \frac{(2 \cos \theta \cdot \hat{\alpha}_r + \sin \theta \cdot \hat{\alpha}_\theta) \mu_0 m}{4\pi R^3} \quad (3.1)$$

donde

- $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío,
- $m$  es el momento magnético del dipolo,

- $\theta$  es el ángulo entre el eje del dipolo y la dirección al punto donde el campo es medido, y
- $\hat{\alpha}_r$  y  $\hat{\alpha}_\theta$  son vectores unitarios de dirección radial y tangencial respectivamente.

De la Ecuación 3.1 se deduce que el campo generado por un dipolo es inversamente proporcional a  $R^3$  [35]. Se observa también la importancia de la orientación.

En la Figura 3.1 se muestran las líneas de flujo magnético creado por un imán, siguiendo el sentido de norte a sur.

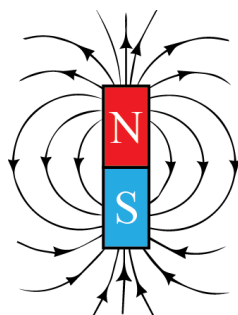


Figura 3.1: Líneas de campo magnético generado por un dipolo.

Sin embargo, cuando dos imanes son colocados suficientemente cerca, sus líneas de campo magnético interactúan y se perturban. Acercar los dos polos norte (o los dos sur) causa una repulsión en los imanes y una desviación en las líneas de campo (Figura 3.2a). En el caso contrario, acercar los polos opuestos de los imanes, causa una atracción entre estos y que las líneas de flujo se unan y se vuelvan más densas entre los polos (Figura 3.2b).

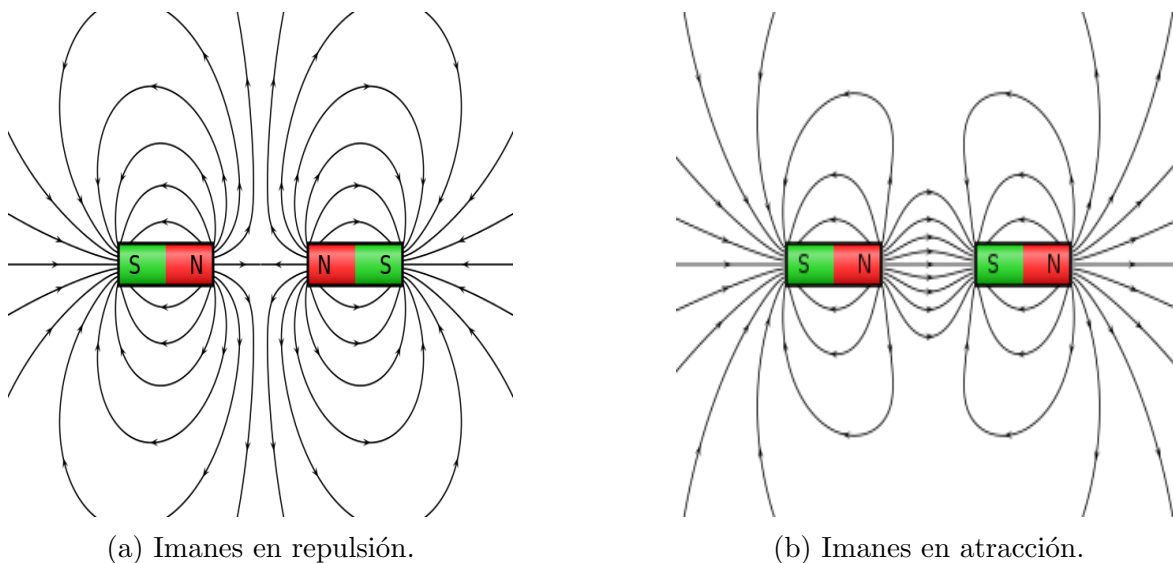


Figura 3.2: Flujo magnético de imanes según su colocación.

### 3.3.2. Configuraciones propuestas

Se han contemplado distintas configuraciones para la posición del sensor y el/los imán/es, cuya explicación se ayuda de la Figura 3.3, donde se muestra la anatomía de la pata.

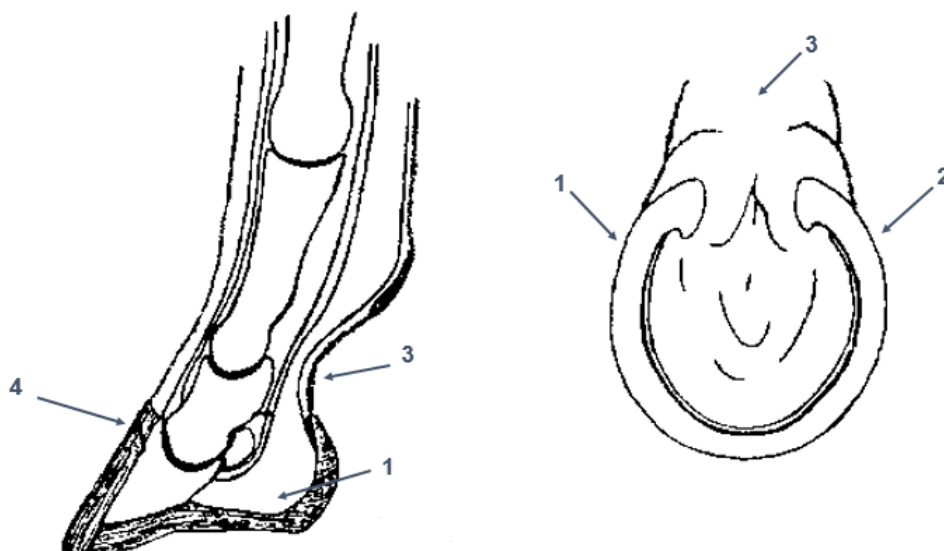


Figura 3.3: Anatomía de la parte inferior de la pata de un caballo

**Configuración I.** Colocar tanto imán como sensor en la parte trasera del casco. Uno a cada lado (en **1** y **2**), de forma que la dirección del campo esté en línea con el sensor. Esto es debido a que según la Ecuación 3.1, para una misma distancia  $R$ ,  $\theta = 0$  provoca un campo máximo. Si bien es cierto que debido a la curvatura del casco, este ángulo siempre será algo mayor.

**Configuración II.** Colocar el sensor en la parte trasera, encima del casco (en **3**). Dos imanes idénticos en la parte trasera del casco, uno a cada lado (en **1** y **2**). Ambos deben posicionarse con los polos enfrentados, de forma que se repelan (polos norte o sur enfrentados), para maximizar la captación de campo. En primera instancia, no importa el sentido ya que queremos medir valores relativos y no absolutos, es decir, variaciones de la señal.

**Configuración III.** Colocar el sensor en la parte delantera del casco (en **4**). Dos imanes en la parte trasera del casco, uno a cada lado (en **1** y **2**), siguiendo el mismo criterio que en el caso anterior.

El objetivo de estas propuestas es ser capaz de establecer una relación entre la deformación del casco y la variación de las líneas de campo que atraviesan al sensor cuando los imanes se alejan o acercan a este.





# Capítulo 4

## Diseño y desarrollo

En el presente capítulo se describe el sistema implementado para la recogida de información de la pisada del caballo para comprobar la validez del método propuesto. Como se ha comentado, se pretende observar la deformación del casco producida durante la pisada mediante la variación de campo magnético para, en un posterior análisis, concluir si el método es efectivo y cumple con los objetivos planteados.

### 4.1. Elementos

El sistema desarrollado consta de un microcontrolador, una batería, un sensor e imanes. A continuación se detallan cada uno de ellos.

#### 4.1.1. Microcontrolador

El microcontrolador utilizado ha sido el ESP32<sup>1</sup> (Figura 4.1), de la empresa Espressif. Se trata de un chip de muy bajo consumo, destinado por ello a su uso en dispositivos móviles, tecnología *wearable* y aplicaciones IoT (*Internet of Things*) donde es necesario un consumo mínimo, como es el caso de esta aplicación. Dispone también de conectividad WiFi y Bluetooth.

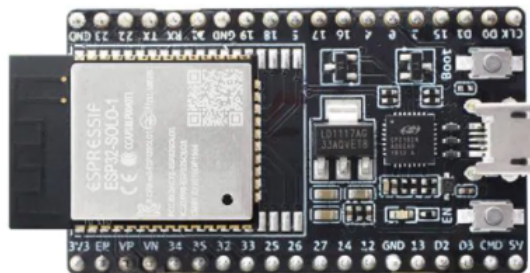


Figura 4.1: Microcontrolador ESP32

<sup>1</sup><https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/overview>

### 4.1.2. Batería

Para alimentar el microcontrolador durante la recogida de datos se ha utilizado una batería externa recargable (*Power bank*) con salida DC de 5V. Es necesario que la alimentación sea portátil ya que el sistema se va a colocar en la pata de un caballo.

### 4.1.3. Sensor magnético

Se ha planteado el uso de dos sensores inteligentes: BNO055<sup>2</sup> y MPU-9250<sup>3</sup>, los cuales se muestran en las Figuras 4.2a y 4.2b, respectivamente. Ambos cuentan con acelerómetro, giróscopo y magnetómetro triaxiales. Los datos del rango y resolución del magnetómetro están recogidos en la Tabla 4.1.

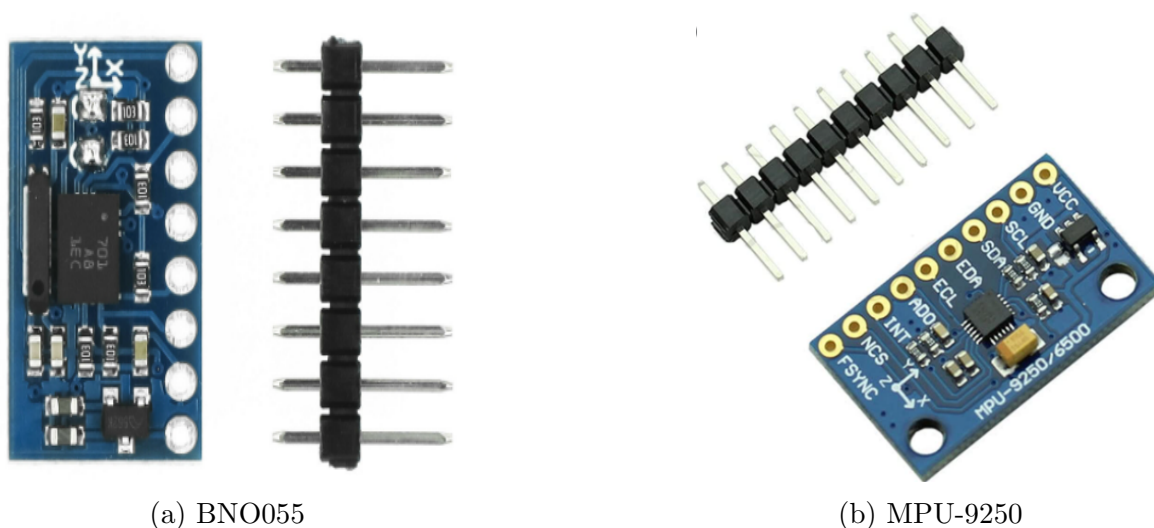


Figura 4.2: Sensores inteligentes

	BNO055	MPU-9250
<b>Rango (<math>\mu T</math>)</b>	Ejes x,y: $\pm 1300$ Eje z: $\pm 2500$	$\pm 4800$
<b>Sensibilidad (<math>\mu T</math>)</b>	$\sim 0,3$	0,6

Tabla 4.1: Especificaciones de los magnetómetros.

Se observa que mientras que el MPU posee un rango mayor, el BNO tiene una mejor sensibilidad. Puesto la característica que más nos interesa es la sensibilidad para aumentar la precisión de los datos recogidos, finalmente se ha escogido el BNO para la recogida de datos, aunque es cierto que ambos poseen valores similares. El rango es

<sup>2</sup>Datasheet: <https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensors/bno055.html>

<sup>3</sup>Datasheet: [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/TDK%20PDFs/MPU-9250\\_Rev\\_1.1.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/TDK%20PDFs/MPU-9250_Rev_1.1.pdf)

una característica menos relevante ya que, a las distancias de trabajo, no se supera en ninguno de los casos.

#### 4.1.4. Imanes

Se han utilizado imanes de neodimio, material escogido por su gran remanencia. Se han comprado en *supermagnete*<sup>4</sup>, proveedor de imanes que permite a los clientes la elección entre una gran variedad de tamaños y formas de imanes.

Con motivo de comparar el comportamiento del sistema para distintas configuraciones, se han realizado pruebas de la variación de campo magnético utilizando imanes de distintas formas y tamaños. Su especificación técnica se encuentra recogida en la Tabla 4.2.

Los imanes de geometría plana (disco y bloque) se pensaron para adherirlos por la cara de mayor superficie. De esta manera se consigue una mayor estabilidad y se cumple que, en el caso de la primera configuración, el eje del imán esté alineado con el sensor, o que los polos estén enfrentados en las otras dos configuraciones. Los imanes de forma cúbica permiten una mayor versatilidad en su posicionamiento, ya que todas sus caras proporcionan la misma estabilidad. En el caso de imanes esféricos, su forma facilita modificar la orientación de los polos.

Geometría	Dimensiones (mm)	Nivel de magnetización <sup>5</sup>	Fza. sujeción aprox. (g)
Disco	Ø 3 x 1	N48	190
	Ø 4 x 2	N45	420
Bloque	5 x 4 x 1,5	N48	500
Cubo	4	N42	500
	10	N42	3800
Esfera	Ø 5	N42	360

Tabla 4.2: Especificaciones de los imanes.

## 4.2. Desarrollo

Este sistema se ha diseñado con el objetivo de obtener datos del sensor (acelerómetro, giróscopo y magnetómetro) durante la pisada de un caballo y almacenarlos en un archivo csv para su posterior análisis.

Tanto en el caso del BNO como del MPU, la comunicación entre el ESP32 y el sensor se realiza vía I2C. Se trata de un protocolo de comunicación serie entre maestro

<sup>4</sup><https://www.supermagnete.es/>

<sup>5</sup>El valor tras la N indica el nivel de magnetización, siendo el N52 el máximo.

y esclavo, donde la información se transmite bit a bit por un cable (línea SDA), mientras la línea SCL se encarga de llevar la señal de reloj [36].

Los datos enviados son 9, correspondiendo a las 3 dimensiones de las magnitudes leídas. Una vez adquiridos, el microcontrolador los trata y manda vía WiFi a un ordenador que lo almacena en un archivo csv. Para ello, es necesario que tanto el ESP32 como el PC estén conectados a la misma red WiFi.<sup>6</sup> El protocolo utilizado para ello es UDP (*User Datagram Protocol*), perteneciente a la familia de protocolos de Internet. Mediante este protocolo se realiza una transmisión sin conexión en redes basadas en IP. Los mensajes enviados son datagramas, los cuales no necesitan el establecimiento de conexión porque incorporan información de direccionamiento en su cabecera. En consecuencia, el tiempo de transmisión es muy bajo, ya que tampoco se espera una respuesta del receptor, lo que permite una comunicación rápida y sin retardos. Por contra, este protocolo no garantiza que los paquetes lleguen completos ni en orden [37].

### 4.2.1. Código

En esta sección se describe la implementación del código desarrollado para la recogida, comunicación y tratamiento de la información.

El microcontrolador ESP32 se ha programado en el entorno de desarrollo Arduino. Aunque la experimentación final se ha realizado con el sensor BNO055, se ha implementado el código también para el sensor MPU-9250. A continuación, se describe la implementación para el caso del BNO, cuyo código puede encontrarse en el Anexo A.

1. Se incluyen las **librerías** necesarias para las comunicaciones (I2C, WiFi, UDP) y para trabajar con el sensor.
2. Se realiza la declaración de **constantes** y **variables** que utiliza el programa; como las credenciales para la conexión WiFi, la dirección IP a la que se enviarán los datos para almacenarlos (constantes) o los datos 9 que recoge el sensor, de tipo *float* (variables).
3. La función ***void setup()*** se ejecuta la primera y solo una vez. En ella se establece la comunicación WiFi, el puerto UDP, se asignan los pines para la comunicación I2C...
4. La función ***void loop()*** se ejecuta seguidamente, se trata de un bucle infinito. El retraso entre ejecuciones sucesivas es de 20 ms y en cada una de ellas se leen los

---

<sup>6</sup>En el ordenador, el perfil de la red debe configurarse como privado, de esta manera el dispositivo es reconocible y será posible el envío de datos.

datos del sensor (aceleración lineal, velocidad angular y magnetómetro) que son almacenados en un buffer. La frecuencia escogida (50 Hz) parece suficiente para el objetivo de ver la evolución del campo magnético durante la pisada. Aunque el tiempo de transmisión de datos vía UDP es pequeño (1-2 ms), los datos son enviados cada 5 iteraciones para incrementar en menor medida el tiempo entre la recogida de datos sucesivos.

Para almacenar la información recogida se ha elaborado un programa en lenguaje python en el entorno de desarrollo PyCharm. El código se encuentra en el Anexo Y. Básicamente, el funcionamiento del programa es el siguiente:

1. Se importan las librerías necesarias para trabajar con archivos csv, recibir datos por socket y obtener la hora actual.
2. Se crea el archivo csv.
3. Se crea el socket y se indica el puerto (mismo que el indicado en el ESP32) y la dirección IP del ordenador.
4. En un bucle que termina con una interrupción de teclado cuando decide el usuario, continuamente se espera recibir el buffer con los datos. Estos se escriben línea por línea en el archivo csv junto a la fecha en ese instante.



# Capítulo 5

## Experimentación

Para testear el sistema basado en sensado magnético se programaron 3 experimentos. El primero de ellos se realizó en dos dimensiones y se comparó con un modelo simulado por ordenador para validar el sistema, para el segundo se utilizó un casco real de caballo y finalmente la experimentación se llevó a cabo *in vivo* en un caballo. Se realizaron pruebas con todos los imanes propuestos (sección 4.1.4) para las distintas configuraciones (sección 3.3.2) para proceder a su elección o descarte según los resultados obtenidos. Como resultados óptimos consideramos aquellos datos que presentan una mayor sensibilidad, es decir, una mayor variación de campo magnético respecto al desplazamiento, lo cual se ve influido por la forma, orientación y fuerza de los imanes. Una vez seleccionados los imanes y configuración del sistema óptimo se realizaron las pruebas *in vivo*.

### 5.1. Simulación y sistema 2D

Se ha evaluado la densidad de flujo magnético en un cierto punto durante el desplazamiento de dos imanes, todo ello en el mismo plano. Se pretende observar las variaciones de campo que se producen, tanto empíricamente como por simulación.

Por un lado, se ha modelado el sistema mediante *COMSOL Multiphysics*<sup>®1</sup>, un software de simulación para el análisis y resolución por elementos finitos en aplicaciones físicas y de ingeniería. Por otro lado, se ha realizado el experimento desplazando los imanes manualmente sobre una superficie plana.

Tanto el sistema simulado como experimental consisten en dos imanes de neodimio colocados en repulsión con sus polos norte enfrentados (Figura 5.1). Se ha medido el flujo de campo magnético en un punto equidistante a ambos, a 9 cm de sus ejes.

Puesto que tanto el punto donde se quiere medir el campo como los imanes se encuentran en el mismo plano, es posible una simulación del modelo en dos dimensiones,

---

<sup>1</sup><https://www.comsol.com/>

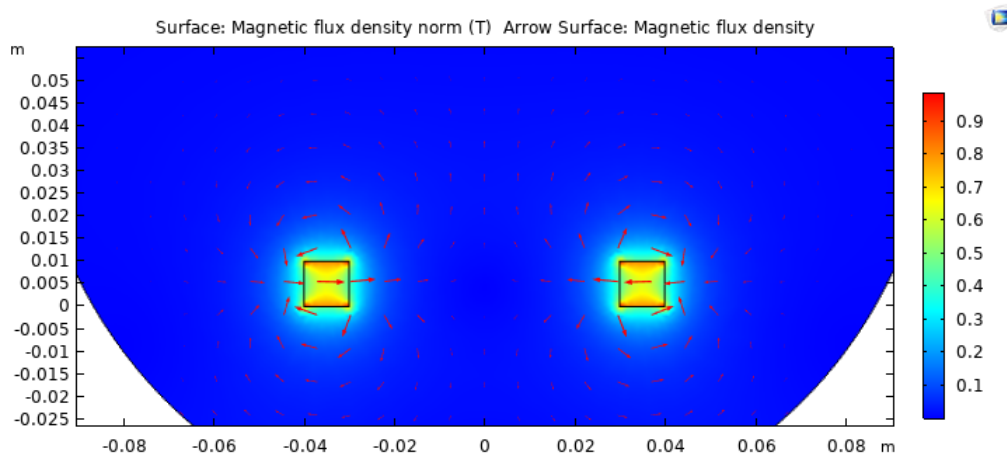


Figura 5.1: Modelo simulado en 2D

lo que facilita considerablemente la tarea de modelado. Es cierto que la reducción de dimensiones conlleva una simplificación del modelo y, en consecuencia, que no sea exactamente el real. De hecho, la simulación asume una longitud infinita de los imanes, mientras que en el caso real son cúbicos. Sin embargo, en este caso no se pretende constatar tanto la magnitud absoluta del flujo magnético, como la existencia de una variación de flujo cuando los imanes se desplazan sobre sus ejes.

El proceso de modelado y simulación en *COMSOL* se explica a continuación. Dentro de las opciones físicas que posibilita el programa, se ha escogido modelar campos magnéticos (sin corrientes) con estudio estacionario. Posteriormente, se han definido las geometrías: dos cuadrados de 10x10 mm separados entre sí 70 mm dentro de una circunferencia. A continuación, se han definido las propiedades de los materiales (permeabilidad relativa) para asignarlos a las geometrías, siendo el interior de la circunferencia aire y los cuadrados neodimio, constituyendo 3 dominios. Se ha aplicado *Magnetic Insolation* sobre la circunferencia y *Magnetic Flux Conservation* en cada dominio. Para cada imán se ha definido el campo remanente ( $B_r$ ) de 1,29 T en la dirección del flujo. Este dato se ha obtenido de la hoja de características<sup>2</sup> del fabricante de los imanes del modelo experimental. Posteriormente, se ha realizado el mallado sobre las geometrías (*extremly fine* en los imanes). De esta manera, se ha computado el análisis del modelo, el cual permite obtener el valor del campo magnético en los distintos puntos dentro de la circunferencia. En la Figura 5.1 se ve representado mediante colores el valor de la densidad de flujo magnético en las distintas geometrías y se han superpuesto las flechas para observar la dirección de este flujo.

En el procedimiento experimental se ha realizado la misma colocación de los imanes,

<sup>2</sup><https://www.supermagnete.de/eng/physical-magnet-data>



situando el sensor magnético en el punto donde interesa medir el campo.

Tanto en el modelo simulado como en el experimental, se han tomado medidas para una separación de los imanes de 70 hasta 50 mm, disminuyendo 5 mm en cada desplazamiento. Los datos recogidos mediante la simulación se observan en la Figura 5.2a y los experimentales en 5.2b. En este último caso, se han tomado 100 medidas en cada posición, motivo de la forma escalonada de los datos, mientras que las oscilaciones son causa del movimiento manual de los imanes.

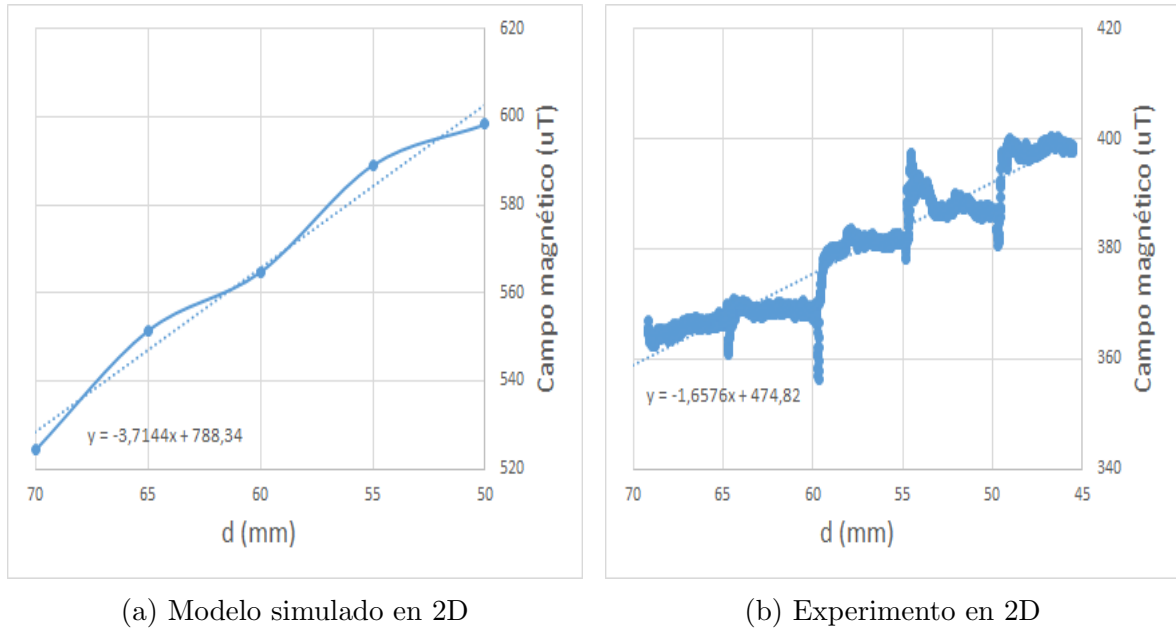


Figura 5.2: Variación del campo magnético en un punto en función de la distancia entre los imanes

Se observa que, en ambos casos, conforme los imanes se aproximan el campo magnético aumenta. Las magnitudes difieren a causa de la simplificación en 2D comentada. Para el caso experimental se obtiene una variación de  $1.66 \mu T/mm$ , mientras que en el caso simulado se ha obtenido una variación de  $3.71 \mu T/mm$ , como muestra la pendiente de las gráficas.

Los resultados obtenidos validan que, en el rango de trabajo, se cumple una relación de linealidad entre la distancia ( $d$ ) y el campo magnético.

## 5.2. Casco real

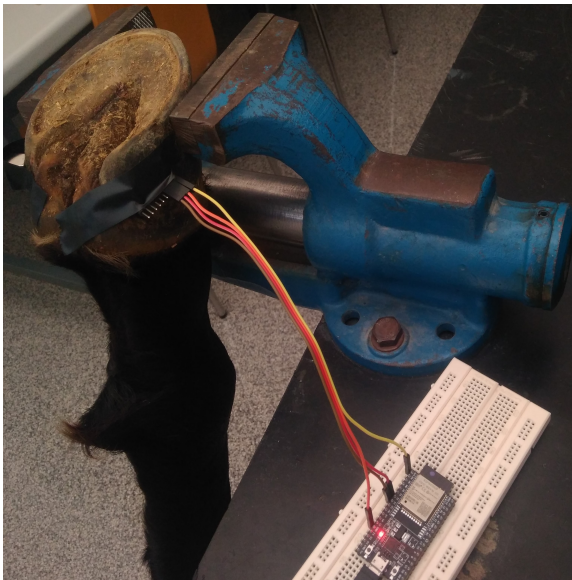
Tras observar cómo varía el campo magnético generado por dos imanes en función de su distancia tanto en un modelo simulado como de forma empírica, se ha procedido a realizar pruebas sobre el casco de un caballo.

Esto ha sido posible gracias a que la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza dispone de patas de caballo conservadas en congelador y nos ha proveído de

algunas para la experimentación. Tras colocar el sistema, se ha observado la variación del campo magnético durante la deformación del casco, para concluir qué imanes y qué configuración del sistema es la óptima, es decir, qué casos presentan una mayor variación de campo.

El movimiento que nos interesa en este trabajo es la expansión de la parte trasera del casco durante la pisada del caballo. Para recrear esa deformación de la misma manera que ocurre en el caso real se necesita una presión que incida desde arriba. Esto se podría conseguir con, por ejemplo, una prensa que presionara desde la parte superior, como se muestra en [38]. Sin embargo, debido a la complejidad de recrearlo por la carencia de estos medios, se ha procedido a realizar la compresión del casco. Este movimiento es similar y puede igualmente servir para los objetivos de esta experimentación: obtener una relación entre la señal del magnetómetro y la deformación para distintos imanes y colocaciones del sistema.

Para ejercer esta compresión se ha utilizado un tornillo de banco. El procedimiento ha consistido en colocar el casco entre las sujeciones del tornillo, adherir los imanes y el sensor con cinta aislante y mediante un calibre medir la distancia de los imanes durante la compresión del casco, como se muestra en la Figura 5.3.



(a) Tornillo de banco de hierro



(b) Tornillo de banco de madera

Figura 5.3: Experimentación del sistema en casco real mediante un tornillo de banco.

### 5.2.1. Extracción y análisis de datos

A continuación se describen las distintas pruebas realizadas.

## Experimento 1

Para decidir qué tipo de imanes utilizar, el criterio seguido ha sido que la sensibilidad del sistema será mejor cuanto mayor sea la variación de campo durante la compresión. Es decir, se debe escoger aquellos imanes que maximicen esta variación.

Para ello, se han realizado pruebas con todos los tipos de imanes recogidos en la sección 4.1.4 para las tres configuraciones propuestas. Visualizando la Figura 5.4, en la Configuración *I* el sensor se coloca en **1** y un imán en **2**. En las Configuraciones *II* y *III*, en **1** y **2** se colocan los imanes y difieren que en la segunda el sensor se coloca en **3** y en la tercera en **4**.

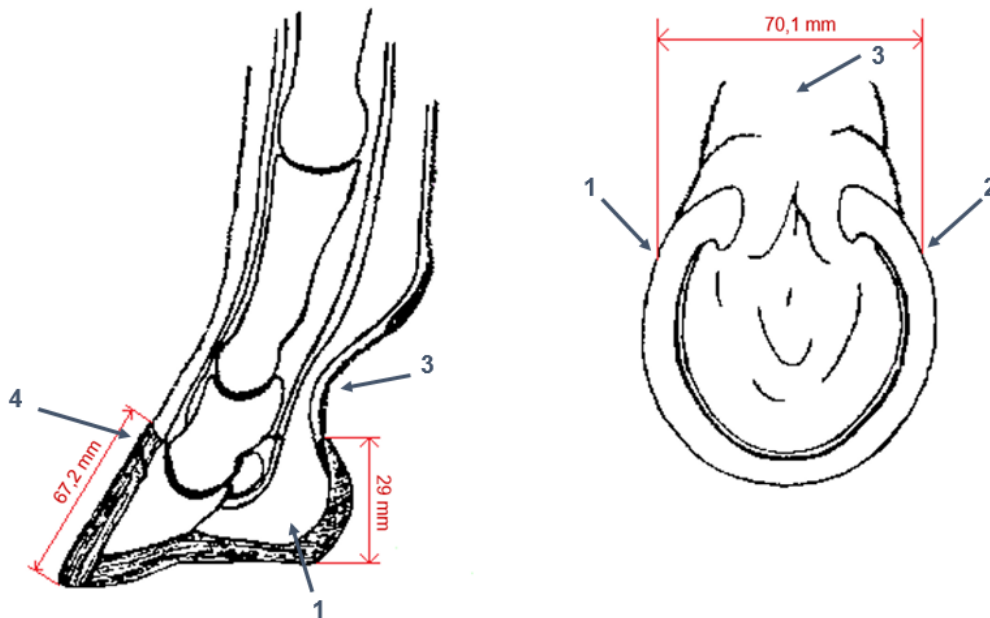


Figura 5.4: Medidas del casco del caballo.

En este experimento, la compresión se midió en los grados de vuelta en el tornillo. Se han tomado datos para tres posiciones: 0, 90 y 180°, correspondiendo a 59, 54 y 50 mm respectivamente. En la Tabla 5.1 se muestra una agregación de los datos obtenidos para los tres ejes del magnetómetro y el módulo del vector resultante. La cifra mostrada corresponde a la variación de campo en cada caso. Se ha realizado el promedio de los 100 datos tomados en cada posición y la unidad utilizada son  $\mu T$ .

Se observa que el imán con cambios más significativos es el cubo de 10 mm, ya que las variaciones del resto de imanes se mueven en un rango muy pequeño. Por ello, en los siguientes experimentos, el tipo de imán utilizado es el cubo de 10 mm de lado.

Imán	Conf. I				Conf. II				Conf. III			
	x	y	z	$\ \mathbf{B}\ $	x	y	z	$\ \mathbf{B}\ $	x	y	z	$\ \mathbf{B}\ $
Cubo 10	86,7	59,7	5,3	85,9	73,8	15,6	9,5	75,6	35,9	27,8	50,6	66,4
Cubo 5	30,2	15,1	22,9	40,6	2,5	3,8	2,3	2,3	8,8	15,6	6,3	17,9
Cubo 4	1,7	7,6	0,6	5,8	1,6	1,1	1,1	1,8	0,7	3,0	1,1	2,5
Disco 4x2	0,3	2,6	0,4	0,5	0,4	0,3	0,0	0,3	0,6	1,7	1,3	1,4
Disco 3x1	0,2	1,3	0,1	0,5	0,0	0,0	0,5	0,2	0,1	2,9	2,2	3,2
Bloque	6,6	1,8	3,5	7,6	1,1	0,2	1,1	0,7	1,0	5,7	2,8	6,1
Esfera	0,6	2,7	2,4	0,9	0,1	0,6	1,2	1,0	1,1	1,1	1,0	1,3

Tabla 5.1: Variación del campo magnético para distintas imanes y configuraciones tras la compresión del casco

## Experimento 2

El segundo experimento se ha centrado en estudiar y discutir el comportamiento de las distintas configuraciones. Para ello, se ha utilizado el imán con mejores resultados en el Experimento 1 y se han realizado pruebas de compresión del casco para las diferentes colocaciones. De esta manera, como en el caso anterior, se ha observado cómo varía el campo respecto a la distancia de los imanes.

Este mismo experimento se ha realizado en dos escenarios de test. En el primero, se utilizó un tornillo de banco de hierro (Figura 5.3a). Sin embargo, se observó que los datos del magnetómetro podían sufrir alteraciones producidas por la composición del tornillo, además de oscilaciones periódicas causadas por la barra metálica que gira para comprimir el casco. Posteriormente, en consecuencia, se realizó el mismo experimento con un tornillo con sujeciones de madera para que la magnitud de los datos se asemejara más a la real (Figura 5.3b).

Esta hipótesis se verificó tras comparar los datos obtenidos en ambos casos. Las señales de la Figura 5.5 corresponden a la colocación de imán y sensor en la parte trasera del casco separados por una distancia similar, pero difieren en el tipo de tornillo utilizado. La distancia entre imán y sensor varió de 70 mm, correspondiendo a las primeras muestras, hasta 61 mm. Cada 100 muestras la parte trasera se comprimió 1 mm. Se observa cómo el campo magnético recogido es mayor en el caso del tornillo de hierro debido a su composición y el efecto provocado por la barra metálica, el cual se trató de minimizar durante la recogida de datos con el tornillo de madera, por ello su duración es más corta.

Por este motivo, en el análisis de los datos se han utilizado los recogidos con el tornillo de madera. Las medidas del casco empleado en ese experimento se encuentran recogidas en la Figura 5.4. Para cada configuración propuesta se han realizado dos

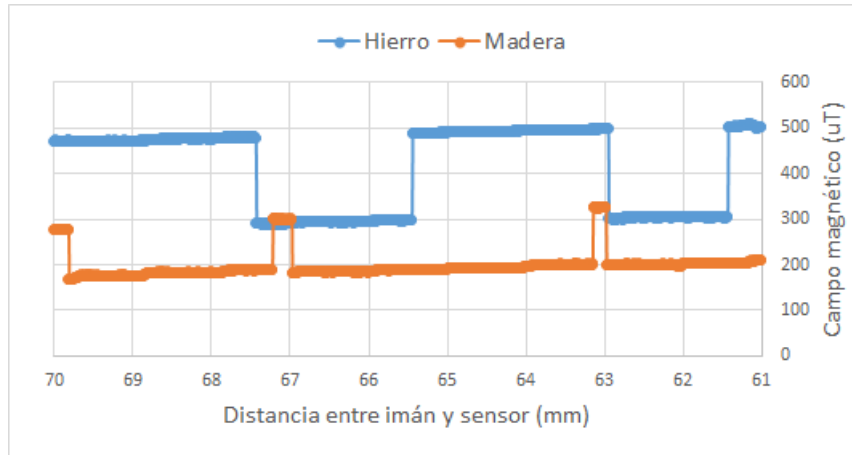


Figura 5.5: Campo generado con la Configuración *I* utilizando un tornillo de banco de hierro y de madera.

repeticiones, obteniendo valores similares en ambas. En cada caso, se ha comprimido un centímetro la parte trasera del casco del animal. Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 5.6.

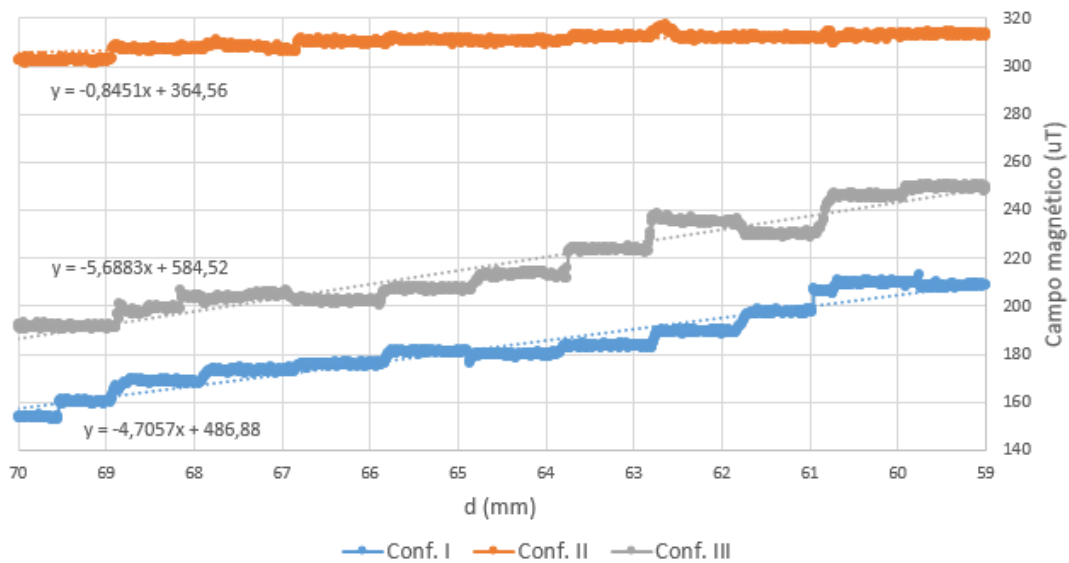


Figura 5.6: Variación del campo magnético durante la compresión del casco para las distintas configuraciones propuestas.

Cada 100 muestras tomadas en una posición, se ha comprimido el casco en 1 mm, causa de la forma escalonada de las señales de la gráfica. Finalmente, en el procesamiento de los datos se ha eliminado el *offset* creado por la barra metálica que altera las medidas. Los datos recogidos con el magnetómetro tienen tres componentes; sin embargo, para observar la magnitud total del campo y realizar la comparación entre las tres configuraciones se ha calculado y representado el módulo del vector tridimensional.

En la Tabla 5.2 se encuentran algunas estadísticas de los datos recogidos. Se observa que el caso que presenta una mayor variación de campo magnético es la Configuración *III*, seguido de la Configuración *I*. Esto se verifica también mediante la pendiente de las líneas de tendencia: 4.7, 0.8 y 5.7  $\mu T/mm$  para las Configuraciones *I*, *II* y *III* respectivamente.

	Conf. I	Conf. II	Conf. III
Desviación estándar ( $\mu T$ )	15,60	3,19	18,84
Media ( $\mu T$ )	183,61	310,09	217,91
Coefficiente de variación (%)	8,50	1,03	8,65

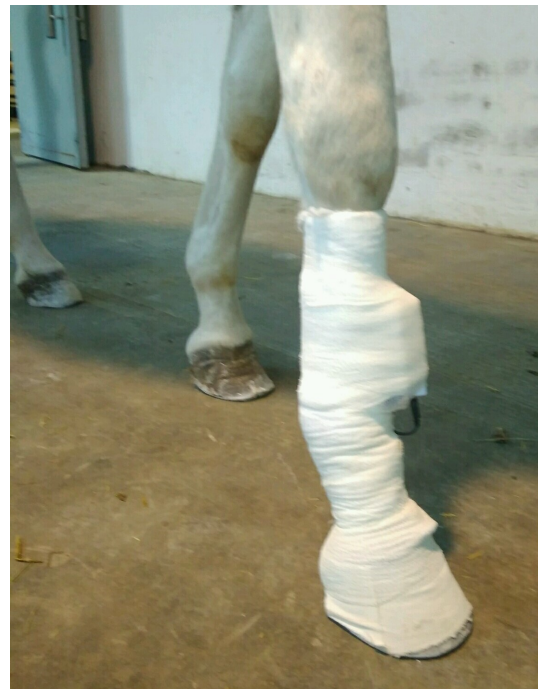
Tabla 5.2: Estadística de la variación del campo magnético durante compresión del casco para las distintas configuraciones

### 5.3. Caballo *in vivo*

Posteriormente, se han realizado los experimentos *in vivo* con un caballo. Estos han tenido lugar en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Zaragoza.



(a) Imanes en parte trasera del casco



(b) Resultado de la sujeción del sistema

Figura 5.7: Colocación del sistema en un caballo.

En primer lugar, se estudió cómo proteger y adherir el sistema. Los imanes se pegaron con *superglue* al casco (Figura 5.7a) y se cubrieron con una venda adhesiva para mejorar la sujeción. El sensor se recubrió de un plástico deformable y se pegó

directamente en el casco de la extremidad derecha delantera, sana. La orientación del sensor fue la siguiente: ejes X e Y tangenciales al casco hacia arriba y derecha respectivamente y el eje Z perpendicular hacia dentro del casco. Por otro lado, la placa electrónica se introdujo en una caja de plástico junto a la batería y se vendó a la pata con cinta adhesiva. El resultado final se muestra en la Figura 5.7b. El caballo no llevaba herradura en ninguna de sus patas.

Las pruebas se hicieron con la configuración *III*, es decir, el sensor colocado en el número 4 de la Figura 5.8, donde también se encuentran las medidas del casco, y los imanes en 1 y 2. Por un lado, esta opción se eligió frente a utilizar la configuración *I* ya que ambas presentaron resultados similares en cuanto a variación de campo, pero en la primera configuración el sensor se encuentra muy cerca del lugar donde se recibe el impacto al caminar y podría provocar su rotura. Por otro lado, se ha elegido frente a la configuración *II* por presentar claramente mejores resultados.

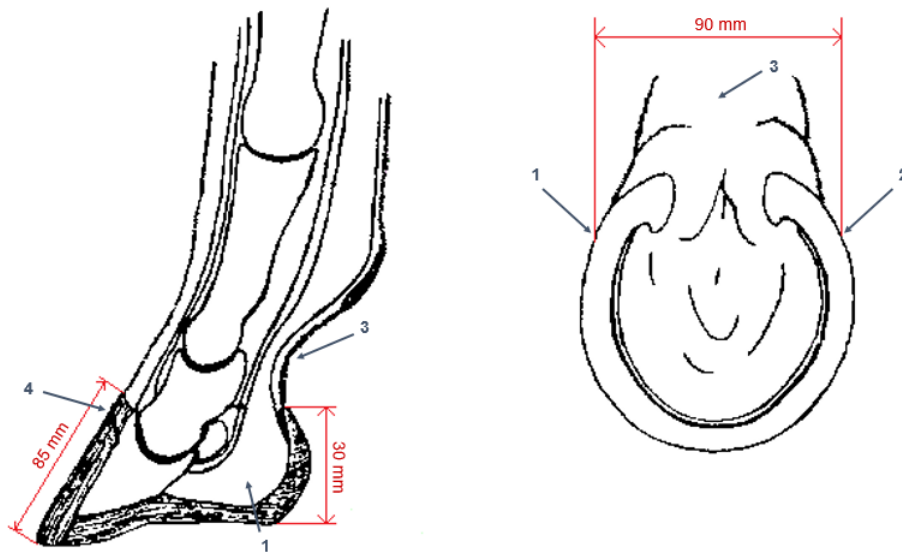


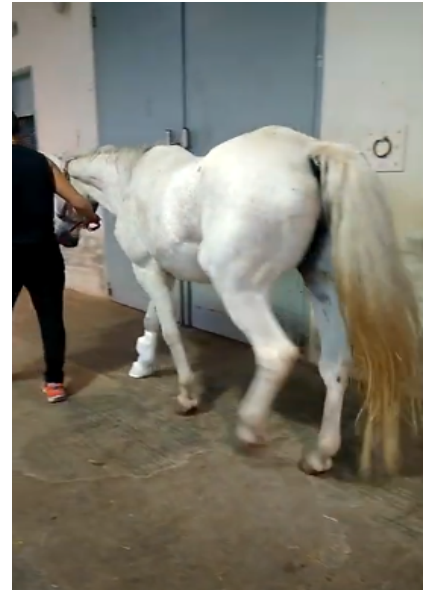
Figura 5.8: Medidas del casco del caballo.

La recogida de datos se realizó para cuatro condiciones distintas, en diferentes escenarios y tipos de andadura: al paso en línea recta en un pasillo interior (Figura 5.9), al trote en línea recta en el exterior (Figura 5.10) y al trote en círculos hacia los dos sentidos (Figura 5.11).

Debido a las condiciones de cada situación, la expansión del casco difiere para los distintos casos. Si se compara el caso de caminar y trotar en línea recta, el segundo conlleva velocidades de giro del casco más rápidas, lo que puede influir en el impulso que da el caballo durante la pisada. En los casos de trotar en círculos, el caballo ejerce una fuerza mayor en las patas interiores, lo que puede provocar una mayor deformación en el casco.



(a)

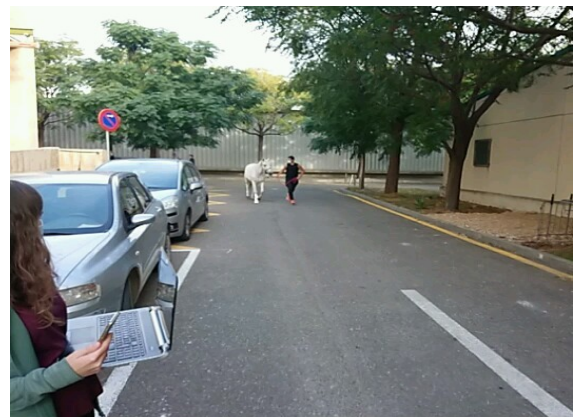


(b)

Figura 5.9: Caballo caminando en pasillo interior



(a)



(b)

Figura 5.10: Caballo trotando en línea recta en el exterior



Figura 5.11: Caballo trotando en círculos, sentido horario.



Una vez recogida la información, se ha realizado una correlación entre las señales recogidas y el patrón de la andadura. Esto se ha detectado mediante los datos periódicos del giróscopo y de un estudio de los vídeos grabados durante las pruebas.

En las Figura 5.12 se muestra un fragmento temporal de la señales del giróscopo cuando el caballo camina. Se aprecia que la componente Y es la señal que más varía y en la que más claro podemos diferenciar los estados del movimiento, marcados en la figura. Es por ello que esta señal se ha utilizado para deducir el patrón de la pisada, es decir, cuándo está subiendo (1), bajando (2) o apoyada (3).

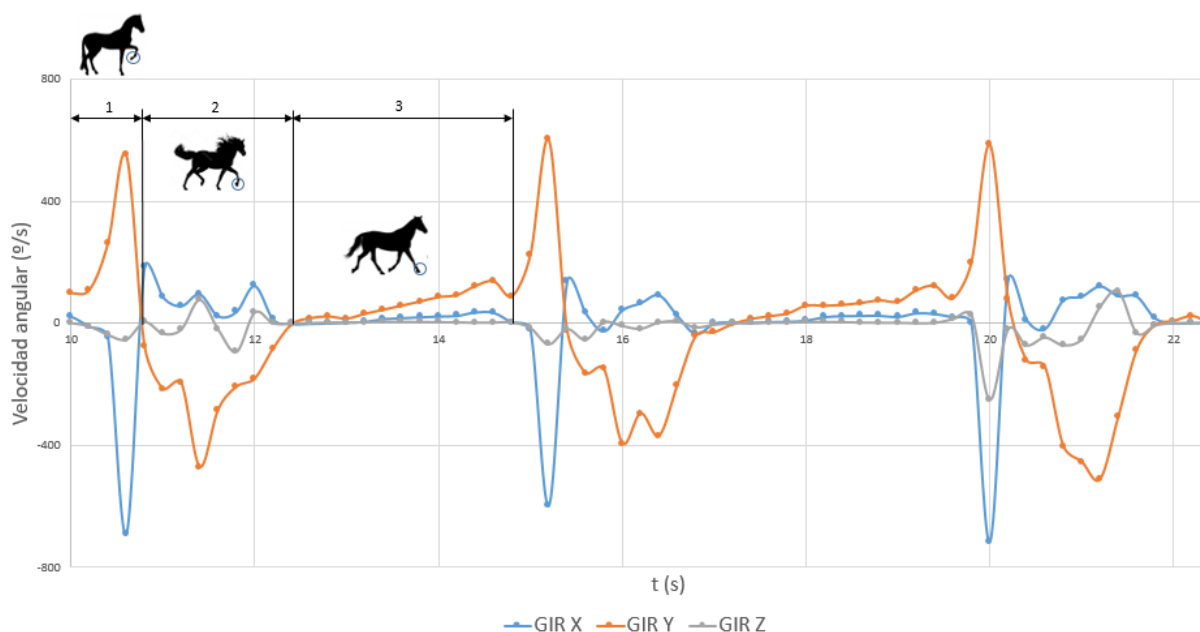


Figura 5.12: Señal del giróscopo mientras el caballo camina.

Por otro lado, se ha estudiado el movimiento del caballo en los vídeos realizados durante las pruebas. Mientras camina, el caballo levanta la pata y la lanza hacia delante. La inercia de este movimiento conlleva un giro en el casco (1). Posteriormente, cuando va a apoyar esa extremidad, el casco gira en la dirección contraria para apoyar en primer lugar la parte delantera del casco y finalmente la trasera (2). En ese momento la pata queda apoyada (3), produciendo un impulso contra el suelo, que da lugar al siguiente paso. Debido a la orientación del sensor, cuando está subiendo la velocidad angular es positiva y al descender negativa.

Una vez aclarado a qué corresponde la señal del giróscopo, se ha superpuesto la señal Y con las del magnetómetro para hacer una correlación del movimiento con los valores magnéticos.

A continuación, se describe cada una de las situaciones y los datos recogidos:

## 1. Al paso, línea recta.

Se han realizado pruebas para el caso del caballo caminando en línea recta por un pasillo interior, como se muestra en la Figura 5.9.

La representación de un fragmento temporal de los datos recogidos se encuentra en las Figuras 5.13 y 5.14. En la primera se muestran las señales del magnetómetro junto a la del giróscopo (componente Y) en función del tiempo, mientras que en la segunda se visualiza la información del magnetómetro de forma ampliada. Además, en la última se ha superpuesto la distancia aproximada de la parte trasera del casco.

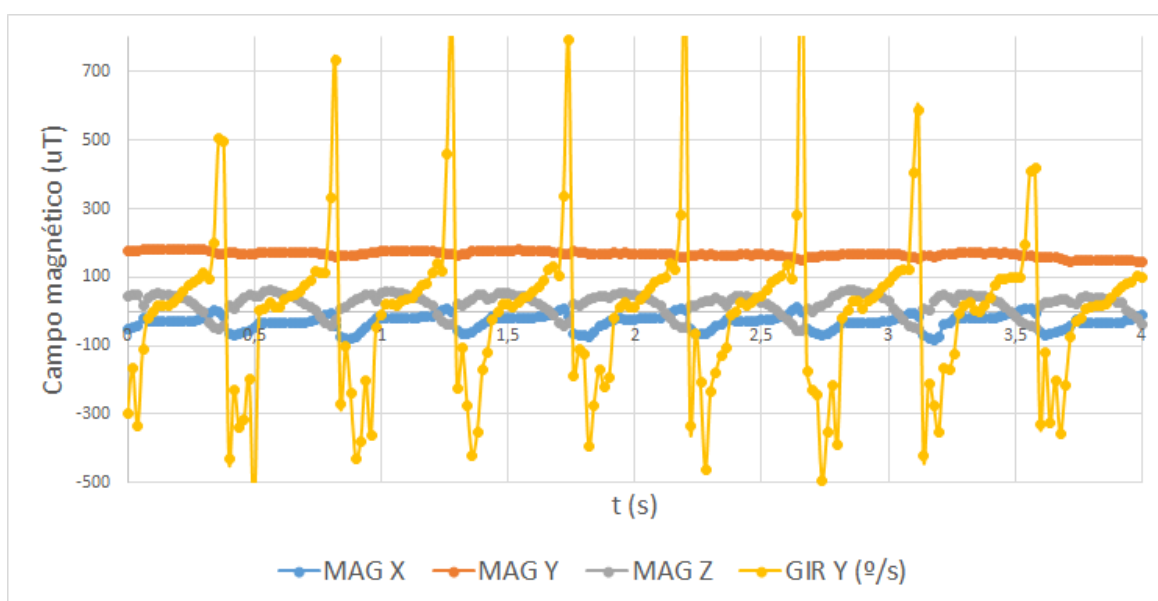


Figura 5.13: Señales del magnetómetro y componente Y del giróscopo mientras el caballo camina

Se observa que las componentes del magnetómetro que varían de forma más significativa en los sucesivos pasos son las señales X y Z, mientras que la componente Y no presenta grandes cambios durante la pisada. En la misma gráfica se observa también cómo se produce un pico en la señal X, que corresponde al final de la pisada, el cual se podría relacionar con el momento del impulso (mayor fuerza contra el suelo) para dar el siguiente paso. Aparecen marcadas 4 fases, que representan cuando el casco está en vuelo (1), cuando empieza a apoyar (2), cuando está pisando (3) y, finalmente, cuando el caballo realiza el impulso para volver a alzarlo (4).

En la Tabla 5.3 se recogen algunos datos estadísticos de los valores del magnetómetro. Se observa cómo la magnitud Z es la que más variabilidad tiene, seguido de la X, mientras la Y tiene una menor desviación típica, lo que significa que los datos tienden a estar cerca de la media.

En la Sección 5.2 se ha demostrado experimentalmente la relación lineal entre

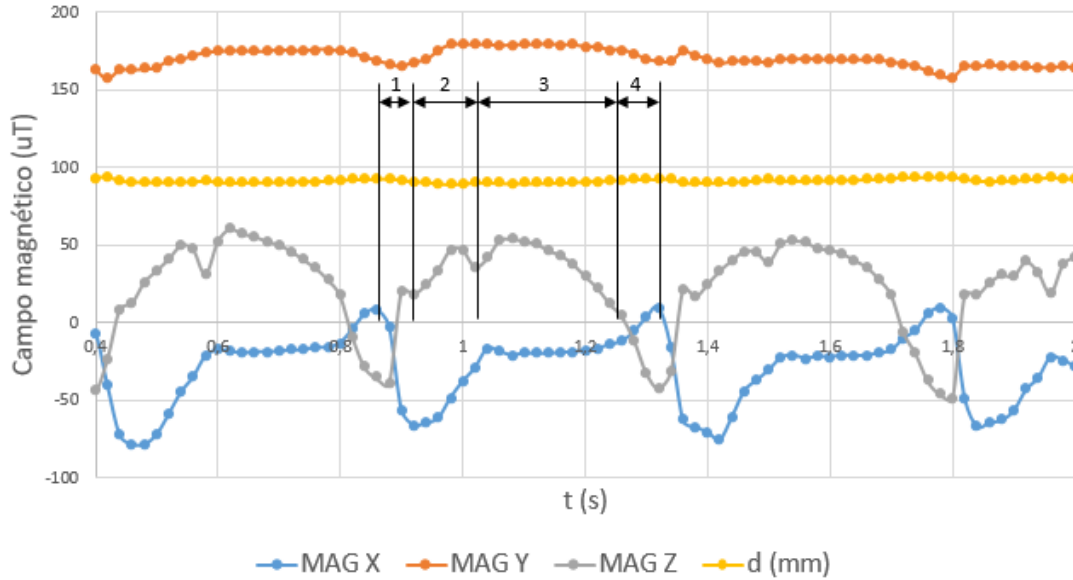


Figura 5.14: Señales del magnetómetro y apertura del casco mientras el caballo camina

	x	y	z
<b>Desviación estándar (<math>\mu T</math>)</b>	23,69	9,77	33,31
<b>Media (<math>\mu T</math>)</b>	-23,89	166,35	18,07
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	99,17	5,87	184,33

Tabla 5.3: Estadística del campo magnético medido mientras el caballo camina

la variación de campo magnético y la apertura del casco, como se mostraba en la Figura 5.6. Para la configuración utilizada en este caso, la relación es de  $5,68 \mu T/mm$ . Conociendo este dato y la distancia de la parte trasera cuando el casco está en su posición natural (Figura 5.8), es posible estimar la apertura del casco en función del campo medido. Esta distancia se muestra en la Figura 5.14 superpuesta al campo magnético.

## 2. Al trote, línea recta.

Posteriormente, la recogida de datos se realizó durante el trote del caballo en línea recta, como muestra la Figura 5.10.

Las representaciones de los datos del magnetómetro se encuentran en la Figura 5.15 y la agregación de los datos estadísticos en la Tabla 5.4.

	x	y	z
<b>Desviación estándar (<math>\mu T</math>)</b>	28,65	10,79	24,12
<b>Media (<math>\mu T</math>)</b>	0,08	73,64	15,99
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	33923,59	14,65	150,84

Tabla 5.4: Estadística del campo magnético medido durante el trote en línea recta

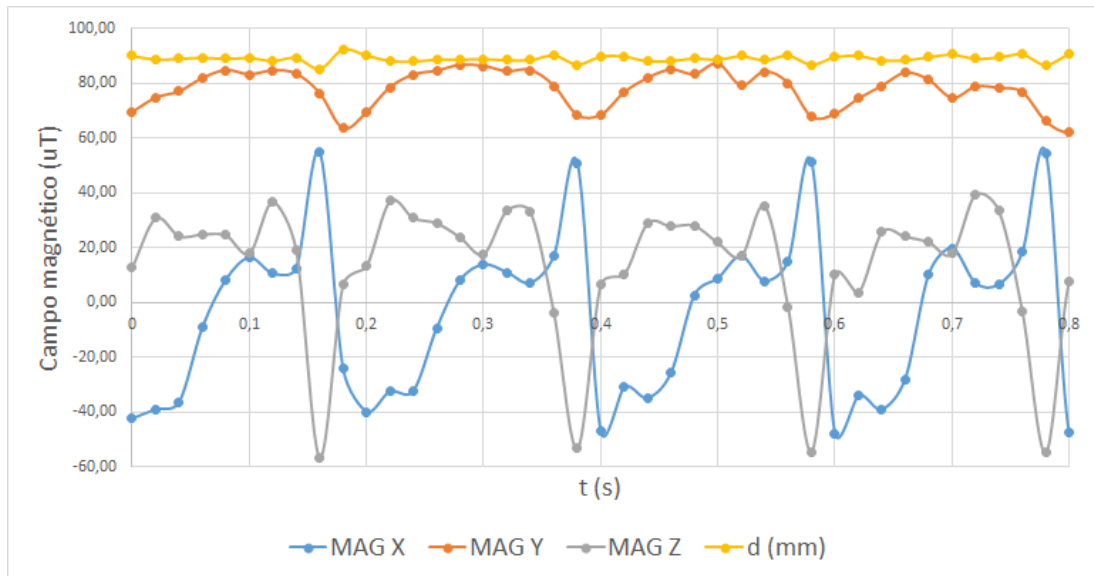


Figura 5.15: Señales del magnetómetro y apertura del casco mientras el caballo trotaba en línea recta

En este caso, como en el anterior, las señales X y Z son las que más varían, con una desviación estándar muy similar al escenario anterior. La forma de las señales X y Z también guardan cierta similitud con el primer caso, pero los picos al final de la pisada son más acentuados y de mayor magnitud como se aprecia comparando las Figuras 5.14 y 5.15. Esto podría atribuirse a que al trotar da más impulso que al caminar, ya que es un factor que se repite en todos los escenarios de trote. Además, las señales en el primer caso tienen una mayor estabilidad, formando una línea que se asemeja a la horizontal durante cuando el casco está totalmente apoyado, lo que no ocurre en los casos de trote.

En la Figura 5.15 se ha superpuesto la magnitud estimada de la distancia entre imanes conforme varía el campo magnético. Estos valores se han obtenido a partir de la relación  $\mu T - mm$  calculada en la sección anterior.

### 3. Trote, sentido horario.

En esta situación, el caballo trotaba en círculos manteniendo la pata derecha, donde se encuentra el sensor, en el interior (Figura 5.11).

En la Figura 5.16 se observan las señales del magnetómetro, mientras que en la Tabla 5.5 se recoge información estadística.

Se aprecia que la señal Y sigue una tendencia descendente y que, además, su variabilidad es mayor que en las pruebas anteriores. Los casos de trote circular tienen la peculiaridad de que las tres señales oscilan a una frecuencia más o menos estable. El periodo de estas oscilaciones corresponde al tiempo que le cuesta al caballo dar una

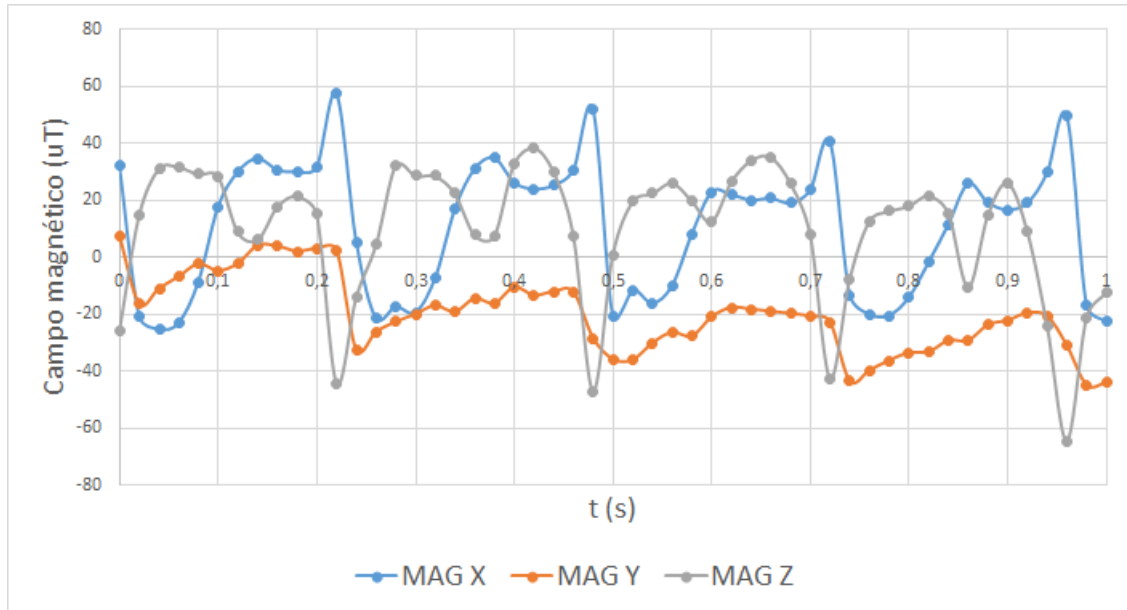


Figura 5.16: Señales del magnetómetro mientras el caballo trotea en círculos (sentido horario)

	x	y	z
<b>Desviación estándar (<math>\mu T</math>)</b>	25,19	18,85	28,16
<b>Media (<math>\mu T</math>)</b>	-6,85	-7,97	17,42
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	367,58	236,64	161,63

Tabla 5.5: Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido horario

vuelta al ruedo (14 pisadas del sensor aproximadamente). Este factor se atribuye a la influencia del campo magnético terrestre y afecta sobretodo a la componente Y debido a la orientación del sensor. En los casos anteriores los datos también se ven afectados por el magnetismo terrestre; sin embargo, al ser el movimiento en línea recta, no es necesario un ajuste de los datos ya que influye siempre en la misma magnitud.

Por ello, las métricas estadísticas calculadas están alteradas. Para analizar los datos sin distorsión comentada, se ha filtrado el ruido provocado por el movimiento giratorio del caballo, cuya frecuencia es de menor orden que la señal que nos interesa, correspondiente a las pisadas.

A partir de los datos oscilatorios iniciales, se ha deducido la ecuación que define este movimiento ondulatorio para cada componente del campo magnético y restado a las señales recogidas para eliminar la onda de baja frecuencia.

En la Tabla 5.6 se agrupan las estadísticas de la nueva muestra. Se observa, como en los anteriores casos, que las señales X y Z son las que mayor variabilidad tienen y cómo se ha reducido la variabilidad de la magnitud Y tras aplicar el filtrado, ya que

su valor real se encuentra muy cerca de la media.

	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
<b>Desviación estándar (<math>\mu T</math>)</b>	20,87	9,89	29,45
<b>Media (<math>\mu T</math>)</b>	-6,08	-7,82	16,80
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	343,03	126,56	175,25

Tabla 5.6: Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido horario, tras eliminar las oscilaciones

En la Figura 5.17 se muestran las señales del magnetómetro tras eliminar las oscilaciones de baja frecuencia. Se visualiza también la variación en la apertura del casco según varía el campo, aproximación obtenida, como en los anteriores casos, a partir de la relación lineal calculada.

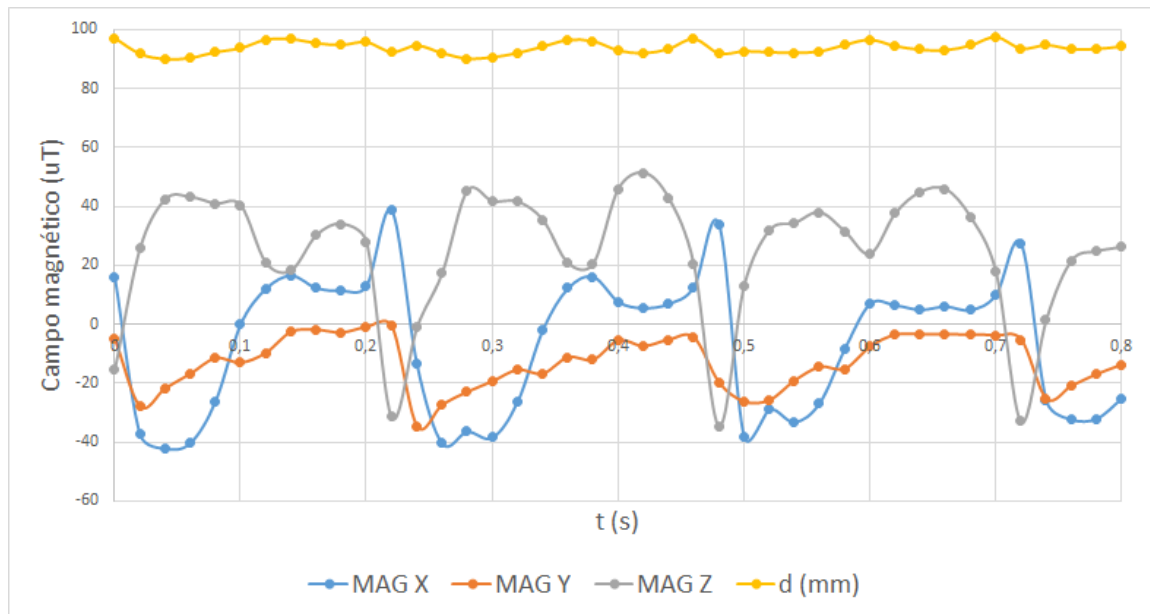


Figura 5.17: Señales del magnetómetro mientras el caballo trotea en círculos (sentido horario) sin oscilaciones

#### 4. Trote, sentido antihorario.

En esta situación, los datos se han tomado mientras el caballo trotea en sentido antihorario, al contrario que en el caso anterior. Es por ello que la pata del sensor quedaría en el exterior. En la Figura 5.18 se observan las señales del magnetómetro para un fragmento temporal correspondiente a cuatro pisadas y en la Tabla 5.7 se recogen algunos datos estadísticos.

Al igual que en el caso anterior, las señales obtenidas están distorsionadas por el magnetismo terrestre a causa del movimiento giratorio, provocando una oscilación en

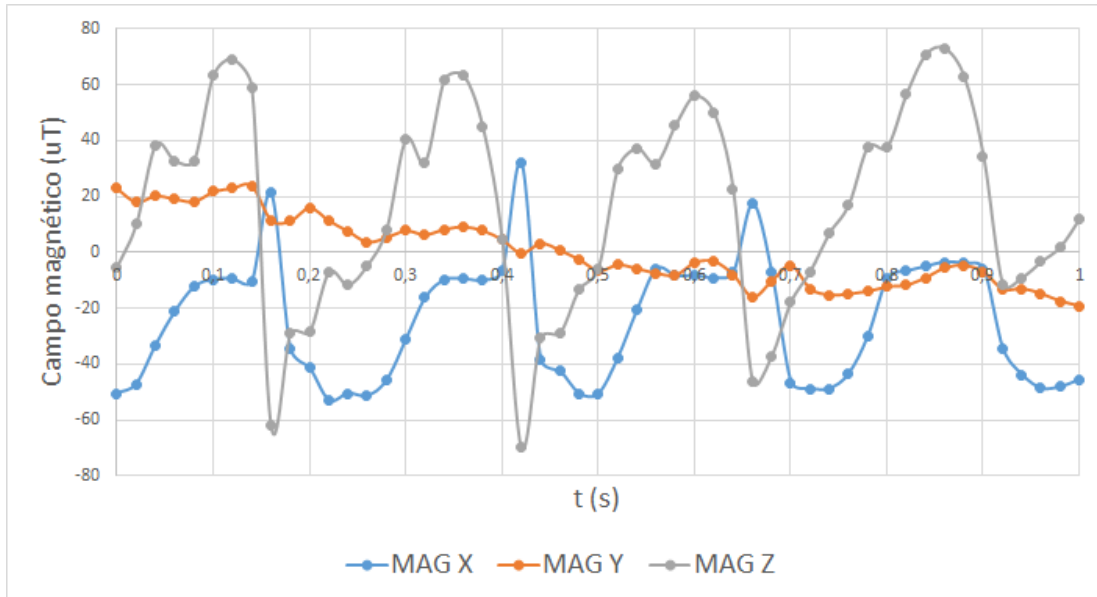


Figura 5.18: Señales del magnetómetro mientras el caballo trotea en círculos (sentido antihorario)

	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
<b>Desviación estándar (<math>\mu T</math>)</b>	28,65	19,71	31,71
<b>Media (<math>\mu T</math>)</b>	-6,70	12,19	14,92
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	427,55	161,75	212,47

Tabla 5.7: Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido antihorario

los datos. Debido a la orientación del sensor, la señal que se ve más afectada es la Y, seguido de la X y por último Z. Se ha obtenido la ecuación de la onda que causa el ruido y restado a la inicial para filtrar la información. En la Tabla 5.8 se recogen las estadísticas de la nueva muestra de datos y en la Figura 5.19 se ha representado un fragmento temporal de estos. Además, en esta última se visualiza la variación de la apertura del casco estimada de forma simultánea al campo magnético. La aproximación de esta magnitud se ha realizado de igual manera que en los casos anteriores.

	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
<b>Desviación estándar (<math>\mu T</math>)</b>	26,23	4,30	30,94
<b>Media (<math>\mu T</math>)</b>	-5,84	8,55	14,43
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	449,01	50,24	214,46

Tabla 5.8: Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido antihorario tras eliminar las oscilaciones

Se observa cómo la variabilidad de la magnitud Y es mínima en comparación a las demás, sugiriendo que no es una variable relevante en el estudio de la deformación del

casco durante la pisada.

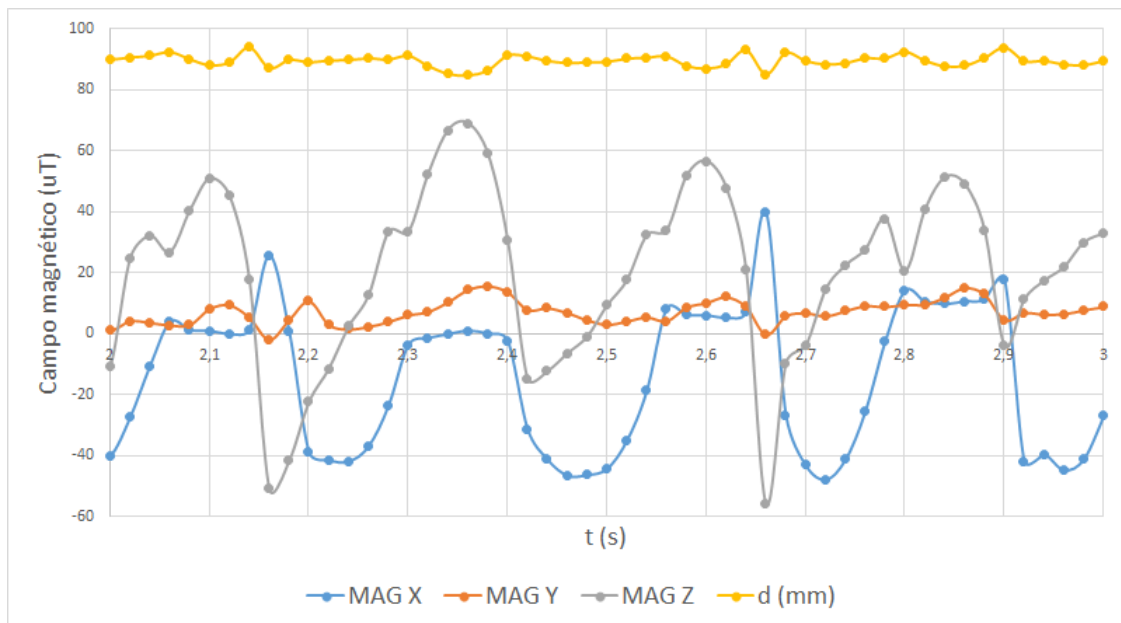


Figura 5.19: Señales del magnetómetro mientras el caballo trotta en círculos (sentido antihorario) sin oscilaciones



# Capítulo 6

## Conclusiones

En el presente trabajo se ha implementado y validado un sistema para la detección de la deformación del casco durante la pisada basado en sensado magnético, factor influyente en el diagnóstico de cojera. Para ello, se ha investigado el problema a fondo y se ha decidido utilizar una aproximación novedosa al problema que nadie había aplicado en el campo.

Mediante un software de simulación de problemas físicos, se ha modelado el sistema y validado que el campo magnético varía linealmente con la distancia de los imanes, para un cierto rango. También se ha estudiado el comportamiento del sistema para una amplia variedad de imanes y colocaciones, concluyendo y justificando cuál es la configuración con mejores resultados mediante pruebas con un casco real de caballo. Entre los distintos imanes estudiados, el que mejor sensibilidad ha dado al sistema es el cubo de neodimio de 10 *mm* de lado. Posteriormente, se han realizado pruebas con las distintas configuraciones para averiguar cuál es la que mejor sensibilidad ofrece, concluyendo que la Configuración *III* es la más adecuada. Además, se ha observado linealidad entre la variación del campo magnético y la apertura del casco. Como la apertura del casco es una característica ligada a la cojera, a partir de la medida del campo magnético podría derivarse en una detección de esta patología.

Los datos magnéticos obtenidos a través de las pruebas experimentales con el caballo *in vivo* representan claramente las distintas fases de la marcha del caballo. La correlación se ha realizado en base al giróscopo y vídeos durante las pruebas. Se han estudiado estadísticamente y visualizado gráficamente las tres componentes del campo por separado, lo que ha permitido observar que algunas variables tienen una mayor variabilidad, lo que indica que son las que se ven más afectadas durante la andadura del caballo. Además, estas señales han mostrado formas distintas para los diferentes escenarios, lo que significa que es posible detectar diferencias en la forma de caminar según las señales del magnetómetro.

Además de ser analizadas por separado, se han compuesto las tres señales captadas

para formar el módulo del vector de campo magnético. A partir de las variaciones de esta magnitud, se ha representado la deformación de la parte trasera del casco. La relación de variación de campo respecto a la apertura del casco obtenida mediante la experimentación con el casco real ha permitido que se pueda estimar la apertura del casco en la experimentación *in vivo*.

## 6.1. Trabajo futuro

En definitiva, se ha creado un sistema de medida y se ha validado que funciona para la detección de la deformación del casco del caballo durante la pisada para distintos tipos de escenarios. Sin embargo, la toma de datos experimentales se ha realizado con únicamente un caballo. Por ello, como trabajo futuro, sería interesante estudiar el comportamiento del sistema para una muestra amplia y variada de individuos, que incluya tamaños de casco distintos, ya que es una característica con gran variabilidad. Esta muestra también debería comprender caballos sanos y cojos para realizar una comparación entre las pisadas en ambos casos. Para realizar este estudio, podría plantearse la colocación del sistema en las 4 patas del animal. Así, mediante un análisis de los datos recogidos se observarían las asimetrías en la pisada mediante la variación del campo magnético en cada pata.

Otras mejoras al respecto podrían ser realizar la caracterización del sistema sin artefactos metálicos, de manera que las medidas del sensor se asemejen lo máximo posible a la realidad, y construir un sensor embebido y tomar una mayor cantidad de datos.

# Capítulo 7

## Bibliografía

- [1] Animal United States Department of Agriculture and Plant Health Inspection Service. National economic cost of equine lameness, colic and equine protozoal myeloencephalitis (epm) in the united states. 2001.
- [2] A Shrestha, J Le Kerneec, F Fioranelli, JF Marshall, and L Voute. Gait analysis of horses for lameness detection with radar sensors. 2017.
- [3] Josh Slater. National equine health survey (nehs) 2016. *Blue Cross for Pets2016*, 2016.
- [4] HH Florian Buchner. Gait adaptation in lameness. *BACK, W.; CLAYTON, H. Equine locomotion. St. Louis: Saunder Elsevier*, pages 175–197, 2013.
- [5] FM Serra Bragança, Marie Rhodin, and PR van Weeren. On the brink of daily clinical application of objective gait analysis: What evidence do we have so far from studies using an induced lameness model? *The Veterinary Journal*, 234:11–23, 2018.
- [6] Stephan Bosch, Filipe Serra Bragança, Mihai Marin-Perianu, Raluca Marin-Perianu, Berend Jan Van der Zwaag, John Voskamp, Willem Back, René Van Weeren, and Paul Havinga. Equimoves: A wireless networked inertial measurement system for objective examination of horse gait. *Sensors*, 18(3):850, 2018.
- [7] KG Keegan, EV Dent, DA Wilson, J Janicek, J Kramer, A Lacarrubba, DM Walsh, MW Cassells, TM Esther, P Schiltz, et al. Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses. *Equine veterinary journal*, 42(2):92–97, 2010.
- [8] Kevin G Keegan, Yoshiharu Yonezawa, P Frank Pai, David A Wilson, and Joanne Kramer. Evaluation of a sensor-based system of motion analysis for detection and

- quantification of forelimb and hind limb lameness in horses. *American journal of veterinary research*, 65(5):665–670, 2004.
- [9] S Egan, P Brama, and D McGrath. Research trends in equine movement analysis, future opportunities and potential barriers in the digital age: A scoping review from 1978 to 2018. *Equine veterinary journal*, 51(6):813–824, 2019.
- [10] Kevin G Keegan. Evidence-based lameness detection and quantification. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 23(2):403–423, 2007.
- [11] Kathleen A Lamkin-Kennard and Marko B Popovic. Sensors: Natural and synthetic sensors. 2019.
- [12] Akikazu Ishihara, Alicia L Bertone, and Päivi J Rajala-Schultz. Association between subjective lameness grade and kinetic gait parameters in horses with experimentally induced forelimb lameness. *American journal of veterinary research*, 66(10):1805–1815, 2005.
- [13] Akikazu Ishihara, Stephen M Reed, Päivi J Rajala-Schultz, James T Robertson, and Alicia L Bertone. Use of kinetic gait analysis for detection, quantification, and differentiation of hind limb lameness and spinal ataxia in horses. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 234(5):644–651, 2009.
- [14] L Roepstorff and S Drevemo. Concept of a force-measuring horseshoe. *Cells Tissues Organs*, 146(2-3):114–119, 1993.
- [15] Michael A Weishaupt, Hermann P Hogg, Thomas Wiestner, Jachen Denoth, Edgar Stüssi, and Jörg A Auer. Instrumented treadmill for measuring vertical ground reaction forces in horses. *American journal of veterinary research*, 63(4):520–527, 2002.
- [16] JJ Thomason, WW Bignell, D Batiste, and W Sears. Effects of hoof shape, body mass and velocity on surface strain in the wall of the unshod forehoof of standardbreds trotting on a treadmill. *Equine and Comparative Exercise Physiology*, 1(2):87–97, 2004.
- [17] Young Hui Chang, Johanna Sherrill, and John EA Bertram. Hoof wall function in horses and donkeys: Experimental alteration of surface strain. In *1993 IEEE Annual Northeast Bioengineering Conference*, pages 64–65. IEEE, 1993.

- [18] Jeryl G Fullen and George R Fullen. Apparatus and method for measuring the magnitude and distribution of forces on the foot of a quadruped, March 21 2000. US Patent 6,038,935.
- [19] Robert Ritzinger. Procedimiento para la determinación de las relaciones de fuerza en un casco particularmente de équidos, 2007. ES2265537T3.
- [20] David Calvert, Ellen Bajcar, Deborah Stacey, and J Thomason. Analysis of equine gait through strain measurement. In *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE Cat. No. 03CH37439)*, volume 3, pages 2370–2373. IEEE, 2003.
- [21] Ellen Bajcar, David Calvert, and Jeff Thomason. Analysis of equine gaitprint and other gait characteristics using self-organizing maps (som). In *2004 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No. 04CH37541)*, volume 1, pages 23–27. IEEE, 2004.
- [22] Patrick Jordan, Jochen Willneff, Nicola D’Apuzzo, Michael Weishaupt, Thomas Wistner, and Jörg Auer. Photogrammetric measurement of deformations of horse hoof horn capsules. In *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, volume 4309, pages 204–211. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [23] Jose Rodolfo Galvao, André Biffe Di Renzo, Pedro Esber Schaphauser, Guilherme Dutra, Uilian Jose Dreyer, Alessandra Kalinowski, John Canning, Carlos R Zamarreno, Jean Carlos Cardozo Da Silva, and Cicero Martelli. Optical fiber bragg grating instrumentation applied to horse gait detection. *IEEE Sensors Journal*, 18(14):5778–5785, 2018.
- [24] JJ Thomason, AA Biewener, and JE Bertram. Surface strain on the equine hoof wall in vivo: implications for the material design and functional morphology of the wall. *Journal of Experimental Biology*, 166(1):145–168, 1992.
- [25] AM Hardeman, FM Serra Braganca, Jan-Hein Swagemakers, PR van Weeren, and Lars Roepstorff. Variation in gait parameters used for objective lameness assessment in sound horses at the trot on the straight line and the lunge. *Equine veterinary journal*, 51(6):831–839, 2019.
- [26] Kevin G Keegan, Joanne Kramer, Yoshiharu Yonezawa, Hiromitchi Maki, P Frank Pai, Eric V Dent, Thomas E Kellerman, David A Wilson, and Shannon K Reed.

- Assessment of repeatability of a wireless, inertial sensor–based lameness evaluation system for horses. *American journal of veterinary research*, 72(9):1156–1163, 2011.
- [27] Kevin G Keegan, Charles G MacAllister, David A Wilson, Carl A Gedon, Joanne Kramer, Yoshiharu Yonezawa, Hiromitchi Maki, and P Frank Pai. Comparison of an inertial sensor system with a stationary force plate for evaluation of horses with bilateral forelimb lameness. *American journal of veterinary research*, 73(3):368–374, 2012.
- [28] Pitiporn Leelamankong, Roberto J Estrada, Porrakote Rungsri, Stäcker Wolfgang, Carolin DVS Müller, and Christoph J Lischer. Objective evaluation of the response to perineural analgesia of the deep branch of the lateral plantar nerve and intraarticular analgesia of the tarsometatarsal joint in horses with suspected proximal metatarsal pain using body-mounted inertial sensors. *Journal of equine veterinary science*, 70:91–95, 2018.
- [29] Sylvia Maliye, Lance C Voute, and John F Marshall. Naturally-occurring forelimb lameness in the horse results in significant compensatory load redistribution during trotting. *The Veterinary Journal*, 204(2):208–213, 2015.
- [30] JF Marshall, DG Lund, and LC Voute. Use of a wireless, inertial sensor-based system to objectively evaluate flexion tests in the horse. *Equine veterinary journal*, 44:8–11, 2012.
- [31] Rhodes P Bell, Shannon K Reed, Mike J Schoonover, Chase T Whitfield, Yoshiharu Yonezawa, Hiromitchi Maki, P Frank Pai, and Kevin G Keegan. Associations of force plate and body-mounted inertial sensor measurements for identification of hind limb lameness in horses. *American journal of veterinary research*, 77(4):337–345, 2016.
- [32] Kevin G Keegan, David A Wilson, Joanne Kramer, Shannon K Reed, Yoshiharu Yonezawa, Hiromitchi Maki, P Frank Pai, and Marco AF Lopes. Comparison of a body-mounted inertial sensor system–based method with subjective evaluation for detection of lameness in horses. *American journal of veterinary research*, 74(1):17–24, 2013.
- [33] David Keun Cheng et al. *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India, 1989.
- [34] Ruth W Chabay and Bruce A Sherwood. *Electric and magnetic interactions*. 1994.

- [35] Yaakov Kraftmakher. Magnetic field of a dipole and the dipole–dipole interaction. *European journal of physics*, 28(3):409, 2007.
- [36] Jayant Mankar, Chaitali Darode, Komal Trivedi, Madhura Kanoje, and Prachi Shahare. Review of i2c protocol. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(1), 2014.
- [37] Jon Postel et al. User datagram protocol. 1980.
- [38] Jean-Marie Denoix. Functional anatomy of tendons and ligaments in the distal limbs (manus and pes). *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 10(2):273–322, 1994.





# Lista de Figuras

2.1. Fuerzas de reacción generadas por el contacto de un miembro del caballo con una plataforma de fuerza [12]. . . . .	4
2.2. Curvas típicas generadas por ordenador de las fuerzas de reacción frente al tiempo [12]. . . . .	4
2.3. Movimiento del casco tras la aplicación de una fuerza vertical [22]. . . . .	6
3.1. Líneas de campo magnético generado por un dipolo. . . . .	16
3.2. Flujo magnético de imanes según su colocación. . . . .	16
3.3. Anatomía de la parte inferior de la pata de un caballo . . . . .	17
4.1. Microcontrolador ESP32 . . . . .	19
4.2. Sensores inteligentes . . . . .	20
5.1. Modelo simulado en 2D . . . . .	26
5.2. Variación del campo magnético en un punto en función de la distancia entre los imanes . . . . .	27
5.3. Experimentación del sistema en casco real mediante un tornillo de banco. . . . .	28
5.4. Medidas del casco del caballo. . . . .	29
5.5. Campo generado con la Configuración <i>I</i> utilizando un tornillo de banco de hierro y de madera. . . . .	31
5.6. Variación del campo magnético durante la compresión del casco para las distintas configuraciones propuestas. . . . .	31
5.7. Colocación del sistema en un caballo. . . . .	32
5.8. Medidas del casco del caballo. . . . .	33
5.9. Caballo caminando en pasillo interior . . . . .	34
5.10. Caballo trotando en línea recta en el exterior . . . . .	34
5.11. Caballo trotando en círculos, sentido horario. . . . .	34
5.12. Señal del giróscopo mientras el caballo camina. . . . .	35
5.13. Señales del magnetómetro y componente Y del giróscopo mientras el caballo camina . . . . .	36

5.14. Señales del magnetómetro y apertura del casco mientras el caballo camina	37
5.15. Señales del magnetómetro y apertura del casco mientras el caballo trota en línea recta . . . . .	38
5.16. Señales del magnetómetro mientras el caballo trota en círculos (sentido horario) . . . . .	39
5.17. Señales del magnetómetro mientras el caballo trota en círculos (sentido horario) sin oscilaciones . . . . .	40
5.18. Señales del magnetómetro mientras el caballo trota en círculos (sentido antihorario) . . . . .	41
5.19. Señales del magnetómetro mientras el caballo trota en círculos (sentido antihorario) sin oscilaciones . . . . .	42

# Lista de Tablas

2.1. Recopilación de distintos casos de estudio para la detección objetiva de cojera. . . . .	11
4.1. Especificaciones de los magnetómetros. . . . .	20
4.2. Especificaciones de los imanes. . . . .	21
5.1. Variación del campo magnético para distintas imanes y configuraciones tras la compresión del casco . . . . .	30
5.2. Estadística de la variación del campo magnético durante compresión del casco para las distintas configuraciones . . . . .	32
5.3. Estadística del campo magnético medido mientras el caballo camina . .	37
5.4. Estadística del campo magnético medido durante el trote en línea recta	37
5.5. Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido horario . . . . .	39
5.6. Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido horario, tras eliminar las oscilaciones . . . . .	40
5.7. Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido antihorario . . . . .	41
5.8. Estadística del campo magnético medido durante el trote circular en sentido antihorario tras eliminar las oscilaciones . . . . .	41



# Anexos



# Anexos A

## Código Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <WiFi.h>

#define I2C_SDA 33
#define I2C_SCL 32

TwoWire I2CBNO = TwoWire(0);
Adafruit_BNO055 bno;

// WIFI UDP definitions
const char * WF_SSID = "SSID";
const char * WFPWD = "PWD";
const char * udpAddress = "192.168.43.208";
const int udpPort = 44444;

float aX, aY, aZ, gX, gY, gZ, mX, mY, mZ;

// UDP instance
WiFiUDP udp;

//Are we currently connected?
boolean connected = false;

String data = "";
int contador = 0;

void setup() {
  delay(1000); // Wait for power supply to stabilize
  Serial.begin(115200);
  while(!Serial);
  delay(10);

  //Connect to the WiFi network
  connectToWiFi(WF_SSID, WFPWD);

  I2CBNO.begin(I2C_SDA, I2C_SCL, 400000);
  bno = Adafruit_BNO055(-1, 0x29, &I2CBNO);
  if (!bno.begin()){
    Serial.print("No_BNO055_detected ,_check_your_wiring_or_I2C_ADDR!");
  }
}
```

```

    while (1);
}
delay(1000);
}

void loop() {
    contador++;

    sensors_event_t magnetometerData, angVelocityData, linearAccelData;
    bno.getEvent(&linearAccelData, Adafruit_BNO055::VECTOR_LINEARACCEL);
    bno.getEvent(&angVelocityData, Adafruit_BNO055::VECTOR_GYROSCOPE);
    bno.getEvent(&magnetometerData, Adafruit_BNO055::VECTOR_MAGNETOMETER);

    float Buffer[9];
    // print the sensor values:
    printEvent(&linearAccelData, Buffer);
    printEvent(&angVelocityData, Buffer);
    printEvent(&magnetometerData, Buffer);

    for(int i = 0; i <= 7; i++){
        data = data + (String)Buffer[i] + ",";
    }
    data = data + (String)Buffer[8] + "\n";

    if(connected && contador == 5){
        // Send Buffer to server
        udp.beginPacket(udpAddress, udpPort);
        udp.print(data);
        udp.endPacket();
        Serial.println(data);
        data = "";
        contador = 0;
    }
    // delay before next reading:
    delay(20);
}

void printEvent(sensors_event_t* event, float b[]) {
    double x = -1000000, y = -1000000, z = -1000000;

    if (event->type == SENSOR_TYPE_ACCELEROMETER) {
        aX = event->acceleration.x;
        aY = event->acceleration.y;
        aZ = event->acceleration.z;
        b[0] = aX;
        b[1] = aY;
        b[2] = aZ;
    }
    else if ((event->type == SENSOR_TYPE_GYROSCOPE) ||
             (event->type == SENSOR_TYPE_ROTATION_VECTOR)) {
        gX = event->gyro.x;
        gY = event->gyro.y;
        gZ = event->gyro.z;
        b[3] = gX;
        b[4] = gY;
        b[5] = gZ;
    }
}

```



```

else if (event->type == SENSOR_TYPE_MAGNETIC_FIELD) {
    mX = event->magnetic.x;
    mY = event->magnetic.y;
    mZ = event->magnetic.z;
    b[6] = mX;
    b[7] = mY;
    b[8] = mZ;
}
}

void connectToWiFi(const char * ssid , const char * pwd){
    Serial.println("Connecting to WiFi network:_" + String(ssid));

    // delete old config
    WiFi.disconnect(true);
    //register event handler
    WiFi.onEvent(WiFiEvent);

    //Initiate connection
    WiFi.begin(ssid , pwd);

    Serial.println("Waiting for WIFI connection ...");
}

//wifi event handler
void WiFiEvent(WiFiEvent_t event){
    switch(event) {
        case SYSTEM_EVENT_STA_GOT_IP:
            //When connected set
            Serial.print("WiFi_connected!_IP_address:_");
            Serial.println(WiFi.localIP());
            //initializes the UDP state
            //This initializes the transfer buffer
            udp.begin(WiFi.localIP() ,udpPort);
            connected = true;
            break;
        case SYSTEM_EVENT_STA_DISCONNECTED:
            Serial.println("WiFi_lost_connection");
            connected = false;
            break;
        default: break;
    }
}
}

```



# Anexos B

## Código Python

```
import csv
import socket
import time

name = time.strftime("%Y_%m_%d_%H_%M_%S", time.gmtime())
f = open(name+'.csv', 'wt');
writer = csv.writer(f, delimiter='\t')

writer.writerow("TITULO")
HOST = '192.168.43.208'
PORT = 44444
BUFFER_SIZE = 65536

s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
s.bind((HOST, PORT))

try:
    while True:
        data = s.recv(BUFFER_SIZE)
        print(data)
        writer.writerow((time.strftime("%Y_%m_%d_%H_%M_%S",
            time.gmtime()), data))
except KeyboardInterrupt:
    print("Ctrl-C para salir del bucle")
    pass

f.close();
s.close();
```