



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

INGENIERÍA BIOMEDICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y
DETECCIÓN DE COJERAS EN CABALLOS**

Alumno: ÁLVARO CAMACHO GONZÁLEZ

**Director: D. CARLOS ALBERTO TALAYERO GIMÉNEZ
DE AZCÁRATE**

JUNIO 2025

TÍTULO: SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y DETECCIÓN DE COJERAS EN EQUINOS

AUTOR: ÁLVARO CAMACHO GONZÁLEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO: CARLOS ALBERTO TALAYÉRO GIMENEZ DE AZCARÁTE

FECHA: 26 de mayo de 2025

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no solo ha representado un reto académico a superar, sino también ha sido el reflejo del apoyo de múltiples personas. En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Carlos Alberto Talayero por dirigir este TFG y ayudarme durante su desarrollo, así como a José Luis Lafuente por dirigir la asignatura y más especialmente a su equipo de investigación por prestarme ayuda con la cámara termográfica.

Por otro lado, quisiera agradecer a un gran apoyo durante el desarrollo de este proyecto Isabel Romero, la veterinaria de equinos de la clínica de grandes animales los molinos. La cual me ha dado consejos y me ha ayudado a comprender la anatomía y fisiología de los equinos. Además de agradecer al personal y jefes del centro hípico el Cerrillo por permitirme las instalaciones para la realización de pruebas y su ayuda durante el desarrollo de estas.

Por último, agradecer a familiares y amigos los cuales me han ayudado durante todo el proceso, en especial a mis padres por el desembolso económico durante los años de estudio y a Enrique el cual me ha ayudado con múltiples soluciones técnicas durante el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

El Trabajo Fin de Grado desarrolla un sistema de instrumentación orientado a la detección de cojeras en equinos mediante el uso de sensores inerciales de bajo coste (MPU-6050) y microcontroladores ESP32. El sistema consta de tres unidades de sensorización las cuales están colocada de manera estratégica en la extremidad delantera del caballo (caña, antebrazo y hombro). Estas unidades capturan datos de la IMU y posteriormente son transmitidos de forma inalámbrica al dispositivo maestro mediante el protocolo ESP-NOW, permitiendo una comunicación eficiente sin necesidad de conexión Wi-Fi. La información recogida es procesada en tiempo real a través de una aplicación desarrollada en MATLAB, la cual calcula los ángulos relativos entre los sensores mediante el uso del filtro Madgwick, permitiendo visualizar y almacenar las variaciones en la cinemática del movimiento. El sistema ha sido probado en un entorno real con un caballo sano, mostrando su capacidad para detectar eventos anómalos como tropiezos, así como distinguir fases de paso y trote. Gracias a su diseño portátil y de bajo coste, esta herramienta ofrece un gran potencial como apoyo para veterinarios y profesionales del sector ecuestre, facilitando el seguimiento de la salud locomotora del animal y contribuyendo a la mejora del bienestar equino.

Palabras Clave: Cojeras en caballos, Sensores inerciales, Biomecánica de caballos, Detección del Movimiento

ABSTRACT

The Final Degree Project develops an instrumentation system aimed at detecting lameness in horses through the use of low-cost inertial sensors (MPU-6050) and ESP32 microcontrollers. The system consists of three sensing units strategically placed on the horse's front limb (cannon, forearm, and shoulder). These units capture IMU data, which is then transmitted wirelessly to a master device via the ESP-NOW protocol, enabling efficient communication without the need for a Wi-Fi connection. The collected information is processed in real time through an application developed in MATLAB, which calculates the relative angles between the sensors using the Madgwick filter, allowing the visualization and storage of variations in movement kinematics. The system has been tested in a real environment with a healthy horse, demonstrating its ability to detect anomalous events such as stumbling, as well as to distinguish between walking and trotting phases. Thanks to its portable and low-cost design, this tool offers great potential as a support system for veterinarians and equine professionals, facilitating the monitoring of the animal's locomotor health and contributing to improved equine welfare.

Key words: Equine lameness, Inertial sensors, Horse biomechanics, Motion detection.

ABREVIATURAS

GPS – Sistema Global de Posicionamiento

IMU – Unidad de Medida Inercial

ECG – Electrocardiograma

MEMS – Sistema Microelectromecánico

I2C – Circuitos Inter-Integrados

CLK – Clock o Reloj

P2P – Punto a Punto

ADC – Convertidor Analógico Digital

FSSH – Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia

IoT – Internet de las Cosas

PLA – Ácido Poliláctico

DMV – Dispositivo Mínimo Viable

CSV – Comma-Separated Values

BLE – Bluetooth Low Energy

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	4
Capítulo 1. RESUMEN DEL PROYECTO.....	10
1.1 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	10
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO	11
Capítulo 2. INTRODUCCIÓN	12
2.1 CONTEXTO	12
2.2 ESTADO DEL ARTE	12
2.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
Capítulo 3. DESCRIPCIÓN BIOMECANICA Y FISIOLÓGICA DEL CABALLO	15
3.1 Introducción a los aires de los caballos	15
3.2 Conceptos de la biomecánica	16
3.3 Anatomía de los cuartos delanteros del equino	17
3.3.1 Sistema musculoesquelético	17
3.4 Análisis de los andares del caballo	21
3.4.1 El paso	22
3.4.2 El trote	23
3.5 Enfermedades típicas causantes de cojeras	25
3.6 Detección de las cojeras	26
Capítulo 4. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	28
4.1 Materiales.....	28
4.2 Componentes	28
4.2.1 MPU-6050	28
4.2.2 PORTABATERÍAS.....	30
4.2.3 BATERIA 18650.....	30
4.2.4 ESP-32.....	31

4.3	Sistema de Comunicación	32
4.3.1	I2C	32
4.3.2	ESP-NOW	33
Capítulo 5.	PLANTAMIENTO DEL SISTEMA	35
5.1	Diagrama de dispositivos	35
5.2	Diagrama de flujo	35
5.3	Diseño de carcasas	36
5.4	Colocación de dispositivos.....	37
5.5	Cálculo de los ángulos.....	38
Capítulo 6.	PROTOTIPADO Y EVALUACIÓN	39
6.1	Metodología.....	39
6.2	Visualización y almacenamiento de las pruebas	39
6.3	Proceso de Desarrollo y Montaje del Sistema.....	41
6.4	Prueba de Campo y Resultados	43
6.5	Análisis de fallos y riesgos.....	45
Capítulo 7.	ESTUDIO ECONÓMICO Y PRESUPUESTO.....	47
7.1	Resumen ejecutivo.....	47
7.2	Contexto Actual	47
7.3	Cifras Actuales	48
7.4	Presupuesto	48
Capítulo 8.	LINEAS FUTURAS	50
Capítulo 9.	CONCLUSIONES.....	51
ANEXO I:	ESQUEMA CAUSAS DE LA LAMINITIS	52
ANEXO II:	TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE GASTO EN EL SECTOR ECUESTRE	53
ANEXO III:	TABLA DE EVOLUCIÓN DEL SECTOR ECUESTRE	54
ANEXO IV:	CODIGO PLACA ESCLAVA	55
ANEXO V:	CODIGO PLACA MAESTRA	58
ANEXO VI:	CODIGO MATLAB.....	61
BIBLIOGRAFÍA		72

Índice de Figuras

<i>Figura I Esqueleto miembros anteriores. Fuente "Anatomía clínica del caballo"</i>	18
<i>Figura II Disección superficial de la musculatura del miembro anterior. Fuente "Anatomía clínica del caballo"</i>	21
<i>Figura III Representación de la secuencia de pisadas que constituye el paso. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"</i>	22
<i>Figura IV Representación del tempo en la secuencia de las pisadas en el paso. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"</i>	23
<i>Figura V Representación de la secuencia de pisada que constituye el trote. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"</i>	24
<i>Figura VI Representación del tempo en la secuencia de las pisadas en el trote. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"</i>	24
<i>Figura VII Mano caballo lamítico. Fuente "propia"</i>	25
<i>Figura VIII Radiografía tarso LM LAT posterior izquierdos chips óseos. Fuente "propia"</i>	26
<i>Figura IX Grados de libertad MPU-6050. Fuente "naylorlampmechatronics"</i>	29
<i>Figura X IMU MPU-6050. Fuente "naylorlampmechatronics"</i>	30
<i>Figura XI Battery Shield V8. Fuente "eledelito"</i>	30
<i>Figura XII Baterías 18650. Fuente "opencircuit"</i>	31
<i>Figura XIII Esquema de Pines ESP-32. Fuente "vasanza.blogspot"</i>	31
<i>Figura XIV Implementación Típica del Protocolo I2C. Fuente "A basic guide to I2C"</i>	33
<i>Figura XV Descripción de la comunicación por bytes en I2C. Fuente "A basic guide to I2C"</i>	33
<i>Figura XVI Diagrama de Dispositivos en el DMV. Fuente "propia"</i>	35
<i>Figura XVII Diagrama de Conexión Placa Esclava. Fuente "Propia"</i>	36
<i>Figura XVIII Diagrama de Conexión Placa Maestra. Fuente "Propia"</i>	36
<i>Figura XIX Carcasa de los Componentes. Fuente "propia"</i>	37
<i>Figura XX Pantalla Visualización de Datos. Fuente "propia"</i>	40
<i>Figura XXI Muestra de Guardado de Datos CSV Caballo Bribón. Fuente "propia"</i>	41
<i>Figura XXII Sistema Montado con Protoboard. Fuente "Propia"</i>	42
<i>Figura XXIII Montaje Final del Sistema. Fuente "propia"</i>	43
<i>Figura XXIV Prueba de Campo Bribón. Fuente "propia"</i>	44
<i>Figura XXV Datos de Prueba de Trote Bribón. Fuente "propia"</i>	45
<i>Figura XXVI Distribución del sector por CCAA. Fuente "estudio del impacto del sector ecuestre 2022"</i>	47

Índice de Tablas

<i>Tabla I Descripción de los aires. Fuente "Propia"</i>	16
<i>Tabla II Descripción de velocidades de protocolos I2C. Fuente "A basic guide to I2C"</i>	32
<i>Tabla III Comparación ESP-NOW y otros protocolos comunes. Fuente "Luis Llamas, protocolo esp-now"</i>	34
<i>Tabla IV Gastos de Material. Fuente "propia"</i>	48
<i>Tabla V Gastos de Dispositivos. Fuente "propia"</i>	49
<i>Tabla VI Gastos de Licencias. Fuente "propia"</i>	49
<i>Tabla VII Gastos de personal. Fuente "propia"</i>	49
<i>Tabla VIII Tabla Distribución de gasto en los Sectores de la Equitación. Fuente "estudio del impacto del sector ecuestre 2022"</i>	53
<i>Tabla IX Evolución del Sector Ecuestre Desde 2013 a 2022. Fuente " estudio del impacto del sector ecuestre 2022"</i>	54

Capítulo 1. RESUMEN DEL PROYECTO

1.1 PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA

Los caballos han estado muy ligados a la historia humana. Habiendo sido domesticados hace aproximadamente 4.200 años en las estepas pónicas del norte del Cáucaso[1]. Antiguamente eran fundamentales en una gran variedad de labores como el transporte, trabajo el campo y la misma guerra. Hoy en día, con la aparición de los motores, estos grandes animales han sido relegados a un ámbito más deportivo, lúdico y de alimentación.

Con el fin de volverlos más eficientes y eficaces en el desarrollo de las muchas tareas que se les encomendaban, se empezó a hacer una selección genética de los mismos. Esto ha dado lugar a una gran variedad de razas hoy en día. Algunas de estas razas han sufrido grandes cambios a lo largo de los siglos, en gran medida causado por el cambio de necesidades. Uno de los ejemplos más claros de este cambio es la raza Trakhener. De ser considerados una de las mejores razas para la guerra siendo así mismo uno de los caballos más feos en su etapa primitiva, a ser uno de los caballos más codiciados para la doma clásica por su gran elegancia y belleza.

Esta intromisión en la naturaleza por parte de la humanidad ha llevado a que los equinos, al menos en su mayoría, se hayan vuelto dependientes de la humanidad para sobrevivir. No solo por la incapacidad de estos de vivir en libertad, sino por la gran tasa de enfermedades que presentan.

Durante mucho tiempo los caballos han sido los grandes abandonados en el desarrollo de soluciones técnicas dentro de los animales de compañía típicos. Esta tendencia ha empezado a cambiar gracias al creciente interés dentro del ámbito deportivo. Las cada vez más exigentes pruebas han llevado al uso de la tecnología para la prevención de lesiones y el perfeccionamiento de los caballos. Aunque siendo esta entrada todavía muy reducida[2].

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto será la creación de un sistema de instrumentación equina, basado en sensores inerciales y otros sensores. Para ello se desarrollará una demo de un software capaz de leer una señal generada por unos acelerómetros y generar un informe biomecánico útil para detectar, por parte de un profesional, posibles patologías, así como mejoras o retrocesos en la salud neuromotora de los equinos.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Capítulo 2: Introducción del contexto sobre el trabajo y la problemática. Se exponen los distintos dispositivos en activo en la actualidad.

Capítulo 3: Introducción limitada a la anatomía y la biomecánica de los equinos en sus distintos aires. Así como la biomecánica de las cojeras y su detección.

Capítulo 4: Descripción de los materiales y componentes del proyecto, así como de los sistemas de comunicación de este.

Capítulo 5: Desarrollo del prototipo.

Capítulo 6: Prueba del prototipo y análisis de resultados.

Capítulo 7: Estudio Económico y presupuestos.

Capítulo 8: Líneas futuras del proyecto.

Capítulo 9: Conclusiones.

Capítulo 2. INTRODUCCIÓN

2.1 CONTEXTO

En España se ha registrado un crecimiento considerable del sector de la equitación, llegando al representar un 0,59% del PIB español[1]. Esta tendencia también es observable en la mayoría de los países desarrollados, un ejemplo claro siendo los Estados Unidos de América. Este crecimiento económico junto con los actuales movimientos en defensa de los animales han provocado que se haya generado un creciente interés hacia los dispositivos de la instrumentación animal, aunque esta intrusión dentro del mundo equino ha sido moderada hasta el momento[2].

Volviendo a España, se puede observar un alto interés en el avance y modernización de esta industria centrada principalmente en dos grandes áreas. En una apuesta por la formación especializada, se calcula que el gasto en formación en este sector es de 53.000.000 €, así como en la integración de personas con diversidad funcional. Por otro lado en la modernización de las prácticas dentro del sector, con legislaciones favorables a un mejor control sobre el cuidado animal, generando una gran ventana de oportunidad a todas las tecnologías capaces de mejorar el bienestar animal[1].

Además, existe en el sector una precariedad tecnológica. Al ser los caballos animales de mayor envergadura que otros animales domésticos, la transformación de tecnologías médicas usadas en humanos ha sido más lenta. Y aunque esta tendencia parece estar desapareciendo con la aparición de sensores y sistemas capaces de recoger datos biométricos de forma no invasiva, su entrada está siendo lenta todavía[2].

2.2 ESTADO DEL ARTE

Polar Horse:

Polar Horse es un sensor electromiográfico basado en los populares sensores polar H10 y H9. Estos sensores de uso típico dentro del mundo deportivo han sido adaptados para su implementación en caballos[3].

Alogo Move Pro:

Alogo Move Pro es un sistema basado en la tecnología GPS y sistemas de sensorización por sistemas IMUs. Estas tecnologías permiten a este sistema un seguimiento de los equinos en un espacio tridimensional. Este sistema es capaz de medir balance lateral y longitudinal, rectitud, cadencia, velocidad y potencia del paso[2].

EquimetreTM:

EquimetreTM es un sistema basado en un sensor electrocardiográfico de una sola derivación. Este dispositivo es capaz de detectar latidos cardiacos, aunque al ser de una sola derivación, su uso no es recomendable para diagnóstico ni para momentos de trabajo a alta intensidad[2].

EquiMoves™:

EquiMoves™ es un dispositivo portátil para caballos. Diseñado específicamente para la detección de cojeras y el rendimiento de los equinos en diferentes aires. El sistema funciona captando el movimiento a través de ocho unidades IMU sincronizadas[2], [4].

Lameness Locator™:

Lameness Locator™ es un sistema basado en mediciones por acelerometría para la detección de cojeras en equinos. En esencia son tres acelerómetros y un giroscopio colocados en unos puntos preestablecidos para que el software sea capaz de detectar la cojera en una extremidad[2], [5].

NIGHTWATCH Smart Halter™:

NIGHTWATCH Smart Halter™ es un sistema de monitoreo 24h. Para ese fin utiliza sensores colocados en la cabezada de cuadra. Este sistema es capaz de generar alertas de forma automática en caso de que el equino se encuentre en una situación de estrés. Además, este dispositivo se ha utilizado ampliamente como un dispositivo de aleta en caso de parto[2].

Although Hoofstep:

Hoofstep es un dispositivo de monitoreo continuado. Usando tecnologías GPS, acelerometría, giroscopios y antenas de transmisión por radio es capaz de clasificar el comportamiento del equino. Esta clasificación se basa en cuatro categorías útiles para mostrar el comportamiento de los caballos[2].

Piavita Vet System:

Piavita Vet System es un dispositivo capaz de recoger distintos indicadores biológicos del caballo. ECG, pulso cardíaco, temperatura del torso, ritmo y regularidad respiratorias y la actividad del equino. El dispositivo se compone de una unidad de medida, una cincha y una estación de transferencia de datos, la cual envía los datos vía bluetooth[6].

2.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se puede observar que el mundo de la equitación es un sector en crecimiento. Este crecimiento plantea grandes oportunidades, así como un dilema en la gestión de recursos y en el cuidado de los equinos. Con el objetivo de ofrecer una solución tecnológica para resolver estas dificultades nace este proyecto.

Como ya se ha podido observar ya existen múltiples soluciones tecnológicas activas hoy en día. La oferta de valor de este proyecto es centrarse en uno de los principales problemas que sufre el sector que es la monitorización de las cojeras. La idea es la creación de un sistema de instrumentación de equinos capaz de mantener una monitorización de un caballo en un espacio controlado.

El sistema se basará en un sistema sensorizado con distintas partes. La detección por sensores inerciales se realizará a través de 3 dispositivos en espalda, antebrazo y caña del caballo

Por otro lado, se incorporará un software para el acceso rápido del veterinario. Este ha de ser capaz de mostrar los datos relevantes para el diagnóstico de la cojera y los otros dispositivos.

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN BIOMECANICA Y FISIOLOGICA DEL CABALLO

3.1 Introducción a los aires de los caballos

Los caballos tienen tres marchas principales en sus movimientos. Estas son el paso, trote y galope y se diferencian en la progresión del movimiento de las manos y pies del caballo. A estas marchas se las conoce como aires naturales del caballo y están formadas por diagonales mano-pie, siendo la diagonal derecha la formada por mano derecha y pie izquierdo y la diagonal izquierda la inversa.[7], [8]

Además de estos tres aires naturales existen variaciones de estos movimientos. Dependiendo del tipo de trabajo podemos ver movimientos como el piaffe y passage. Si nos centramos en la velocidad y reunión del caballo podemos encontrar ritmos medios, largos y reunidos dentro de los aires principales. Por último, dependiendo de la raza a la que pertenece el equino podemos hallar aires específicos como el paso llano en los caballos peruanos.[7]

Aunque se pueden dividir los aires según la simetría del equino lo más común es que estos se definan según el número de tiempos marcados (la cantidad de golpes que se sienten en cada zancada. Habiéndose visto los conceptos básicos podemos profundizar en los aires:

El paso es el movimiento más lento dentro de los aires naturales de los equinos. Se establece como un aire simétrico dividido en cuatro tiempos y cuya velocidad típica es de entorno a los 6 km/h. Durante el paso, los miembros suelen tocar el suelo entorno a unas 50-60 veces por minuto y son acompañados por un balaceo de la cabeza y cuello del equino para mejorar la estabilidad.[7], [8], [9]

El trote es el movimiento de intensidad media, y se define como un aire simétrico y diagonal de dos tiempos. En este movimiento si existe un periodo de suspensión, donde ninguno de los miembros toca el suelo, que no existía en el paso. La velocidad típica del trote se establece entorno a los 15 km/h aunque se pueden desarrollar hasta los 45 km/h en algunos casos o en el sitio en el caso del piaffe. Durante este movimiento los apoyos suelen encontrarse entre las 70-80 repeticiones por minuto y no debería existir balanceo del cuello.[7], [8], [9]

El galope es un movimiento de alta intensidad, este se describe como un movimiento asimétrico de diagonal discontinua, pues existe la diagonal como en el trote, pero un miembro apoya ligeramente antes que otro, de cuatro tiempos. Este es el movimiento más rápido del caballo, siendo la velocidad típica entre los 40-48 km/h aunque algunos caballos de carreras son capaces de llegar a los 66 km/h. Durante este aire los apoyos no

son lineales y dependen mucho de la raza y la velocidad. Se puede describir un movimiento de arriba debajo del cuello y cabeza del equino durante el desarrollo del aire.[7], [8], [9]

Aire	Paso	Trote	Galope
Tiempos	4 tiempos	2 tiempos (Diagonal)	4 tiempos (Diagonal asimétrico)
Simetría	Si	Si	No
Velocidad	≈6km/h	≈15km/h	≈40-48km/h
Apoyos	50-60 xmin	70-80xmin	No lineal
Balanceo Cabeza	Si	No	Si

Tabla I Descripción de los aires. Fuente "Propia"

3.2 Conceptos de la biomecánica

La biomecánica es el estudio de la aplicación de las leyes de la mecánica a la estructura y el movimiento en los seres vivos. Una forma de dividirla es a través de sus dos componentes principales.

Por un lado, encontramos las estructuras anatómicas. Músculos y tendones, encargados de generar el movimiento. Las estructuras nerviosas y vasculares, las cuales envían las señales nerviosas y hormonales respectivamente, así como en el caso de las estructuras vasculares encargadas de la alimentación de todas las estructuras involucradas. Así como otros tejidos que participan en este proceso como el óseo o el tejido conectivo.

Por otro lado, se pueden observar los conceptos físicos que actúan dentro del movimiento. Las palancas de primer, segundo y tercer orden. Las fases del movimiento, apoyos y elevaciones. Así como las distintas contracciones que generan el movimiento, ya sean excéntricas, concéntricas o isovolumétricas.

En lo que corresponde a los equinos se ha de tener en cuenta que son animales cuadrúpedos de entorno a los 800 kg. Además, también los movimientos biomecánicos del animal cambian dependiendo del uso y del entrenamiento del equino, así como de la raza y edad del animal. [9]

3.3 Anatomía de los cuartos delanteros del equino

3.3.1 Sistema musculoesquelético

El sistema musculoesquelético de los équidos es un sistema complejo que permite a estos animales alcanzar grandes velocidades a pesar de su gran tamaño y peso. Para entender completamente este complejo mecanismo hay que observar sus distintos componentes.

3.3.1.1 Estructuras óseas

Los caballos poseen aproximadamente 205 huesos, aunque es variable dependiendo de la raza y de la presencia o no de algunos huesos rudimentarios. Este número se reduce significativamente si nos fijamos solo en los cuartos delanteros de los equinos donde encontramos de 22 a 23 huesos por extremidad, dependiendo del número de huesos carpianos presentes.

Yendo de las estructuras más proximales a las más distales se encuentra.

- **Escápula u omóplato:** Un hueso plano que se conecta con el tronco de caballo y el humero. Comúnmente esta zona se conoce como la espalda del caballo.
- **Húmero:** Hueso largo que se articula con la escapula en la articulación del hombro en su parte más proximal. En su parte más distal este hueso se articula con el cubito y el radio en la articulación del codo.
- **Cubito y Radio:** Se definen como dos huesos por separado, pero en el caso de los caballos estos se encuentran en su mayoría fusionados. Se articulan en su parte más proximal se articulan con el húmero en la articulación del codo. En la parte más distal estos huesos se articulan con la primera fila de huesos carpianos en la articulación de la rodilla.
- **Huesos Carpianos:** Son un conjunto de huesos que forman la rodilla equina. En su parte más proximal se conectan con el cubito y radio existiendo cuatro huesos, el hueso radial, intermedio, ulnar y accesorio del carpo. En su parte más distal conecta con los metacarpos y se puede encontrar entre tres y cuatro huesos, siendo el I, II, III y IV hueso carpiano. En el caso del I hueso carpiano este es un hueso vestigial y puede o no aparecer.
- **Huesos Metacarpianos:** En los metacarpianos equinos encontramos uno principal, el metacarpo III o cañón, y dos secundarios o rudimentarios, los metacarpos II y IV o huesos de caña, los cuales se encuentran uno en la parte más medial del III metacarpiano y otro en su parte más lateral. En su parte más proximal estos huesos se conectan a los carpos mientras que en su parte más distal el cañón se conecta a la primera falange en el menudillo.
- **Primera Falange:** También conocida como hueso largo de menudillo esta se encuentra conectada a nivel proximal con el cañón en el menudillo y con la segunda falange en la corona.

- **Segunda Falange:** Se la conoce como falange medial o coronal y se conecta en la corona con el hueso largo del menudillo siendo esta su parte más proximal. Mientras en su parte más distal se conecta con la tercera falange a través de la articulación interfalángica distal.
- **Tercera Falange:** Es el hueso más distal de la extremidad. Se le conoce como tejuelo y se conecta en su parte más proximal a la falange medial a través de la articulación interfalángica distal.[10]

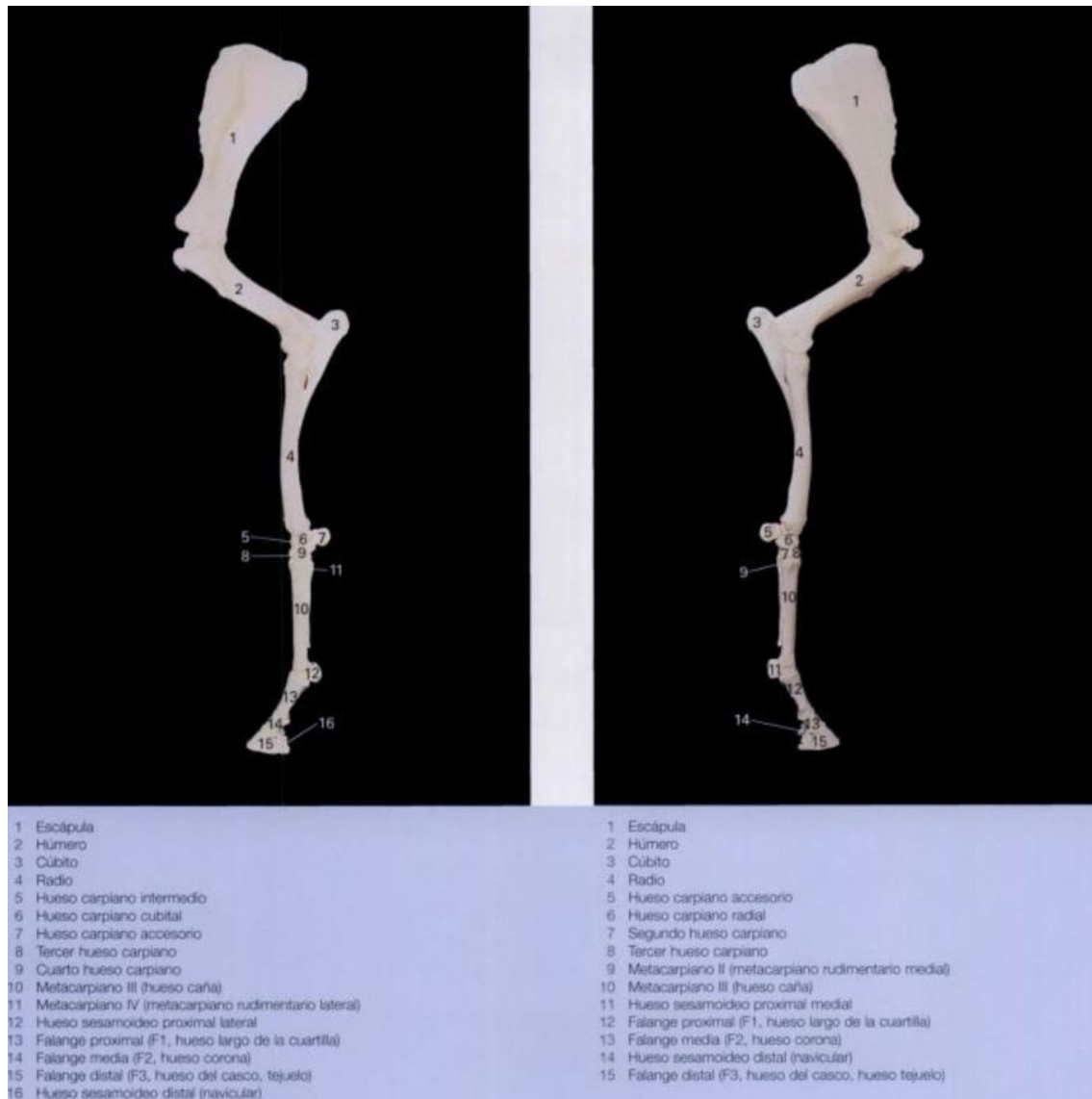


Figura 1 Esqueleto miembros anteriores. Fuente "Anatomía clínica del caballo"

3.3.1.2 *Articulaciones y sus funciones*

Las articulaciones del cuarto delantero del caballo desempeñan un papel fundamental en la locomoción, proporcionando tanto movilidad como estabilidad a las extremidades. Estas estructuras permiten la transmisión eficiente de fuerzas durante el movimiento, lo que contribuye a la capacidad atlética del equino.

Se pueden clasificar desde las regiones más proximales a las más distales de la siguiente manera:

- **Articulación del Hombro:** Formada por la escápula y el húmero, esta articulación sinovial de tipo esferoidea, permitiendo principalmente movimientos de flexión y extensión, aunque con una movilidad más restringida en comparación con otras especies debido a la musculatura circundante que proporciona estabilidad adicional.
- **Articulación del Codo:** Se define como una articulación sinovial de tipo gínglimo que posibilita la flexión y extensión del antebrazo. Se encuentra entre el húmero en su parte proximal, y el radio y cúbito en su parte distal. Debido a la fusión del cúbito con el radio, la pronación y supinación está total o prácticamente ausentes en los equinos, mejorando la estabilidad de la extremidad.
- **Articulación del Carpo o Rodilla:** Compuesta por tres articulares principales:
 1. **Articulación Radiocarpiana:** Entre el radio y la primera fila de huesos carpianos. Permite flexión y extensión con un leve grado de movilidad lateral.
 2. **Articulación Intercarpiana:** Entre la primera y segunda fila de huesos carpianos, facilitando un movimiento de tipo deslizante.
 3. **Articulación Carpometacarpiana:** Se encuentra entre la fila distal de los huesos carpianos y los metacarpos. Tiene un rango de movilidad limitado actuando como una estructura de soporte y amortiguación.
- **Articulación Metacarpofalángica o Menudillo:** Se sitúa entre el metacarpo III y la primera falange, incluyendo los huesos sesamoideos proximales. Es una articulación de tipo gínglimo que permite principalmente flexión y extensión, siendo fundamental en la absorción del impacto durante la locomoción.
- **Articulación Interfalángica Proximal o Corona:** Conecta la primera falange con la segunda falange y proporciona un movimiento de flexión y extensión moderado. Su papel es relevante en la distribución de la carga en la extremidad distal.
- **Articulación Interfalángica Distal, Coffin o Tejuelo:** Se encuentra entre la segunda y la tercera falange, junto con el hueso navicular. Su estructura sinovial facilita el movimiento necesario para la adaptación del casco al suelo y contribuye a la mecánica de amortiguación durante la marcha.[10]

3.3.1.3 *Musculatura*

Los músculos del cuarto delantero del caballo permiten la flexión, extensión y abducción de la extremidad, además de proporcionar soporte durante el movimiento. Al ser el sistema muscular del caballo un sistema muy complejo existe una gran cantidad de músculos involucrados en los distintos aires. Algunos de los más relevantes son:

- **Músculo trapecio:** Se encuentra en la parte superior de la escápula y el cuello del caballo. Su origen está en el área cervical y torácica del caballo y se inserta en la espina de la escápula, una protuberancia en la parte medial de la escapula. Su función principal es elevar la escápula y ayudar en la movilidad del hombro.
- **Músculo supraespinoso:** Ubicado sobre la espina de la escápula. Este músculo se origina en la fosa supraespinosa y se inserta en el tubérculo mayor y menor del húmero. Su función es la extensión y estabilización de la articulación del hombro.
- **Músculo infraespinoso:** Se localiza en la fosa infraespinosa de la escápula y se inserta en el tubérculo mayor del húmero. Actúa como estabilizador lateral del hombro y ayuda en la abducción de la extremidad.
- **Músculo deltoides:** Se origina en la espina de la escápula y el acromion, insertándose en la tuberosidad deltoidea del húmero. Su función es la flexión del hombro y la abducción del brazo.
- **Músculo bíceps braquial:** Se extiende desde el tubérculo supraglenoideo de la escápula hasta la tuberosidad radial y la fascia del antebrazo. Su principal función es la flexión de la articulación del codo y la estabilización del hombro.
- **Músculo tríceps braquial:** Formado por tres cabezas (larga, lateral y medial), se origina en la escápula y el húmero y se inserta en el olécranon del cúbito. Su función es la extensión del codo y la flexión del hombro.
- **Músculo extensor carpo-radial:** Su origen está en la cresta supracondílea lateral del húmero y se inserta en el extremo proximal del tercer metacarpiano. Es responsable de la extensión de la rodilla y estabilización del carpo.
- **Músculo flexor digital superficial:** Se origina en el epicóndilo medial del húmero y se inserta en la segunda falange. Su función es la flexión del menudillo y la corona.
- **Músculo flexor digital profundo:** Con origen en el húmero, el radio y el cúbito, se inserta en la tercera falange o tejuelo. Su función es la flexión de todas las articulaciones distales de la extremidad.
- **Músculo interóseo o ligamento suspensor:** Se encuentra en la parte posterior del metacarpo III y se inserta en los huesos sesamoideos proximales. Su función principal es sostener el menudillo y evitar su hiperextensión durante el movimiento.[10]

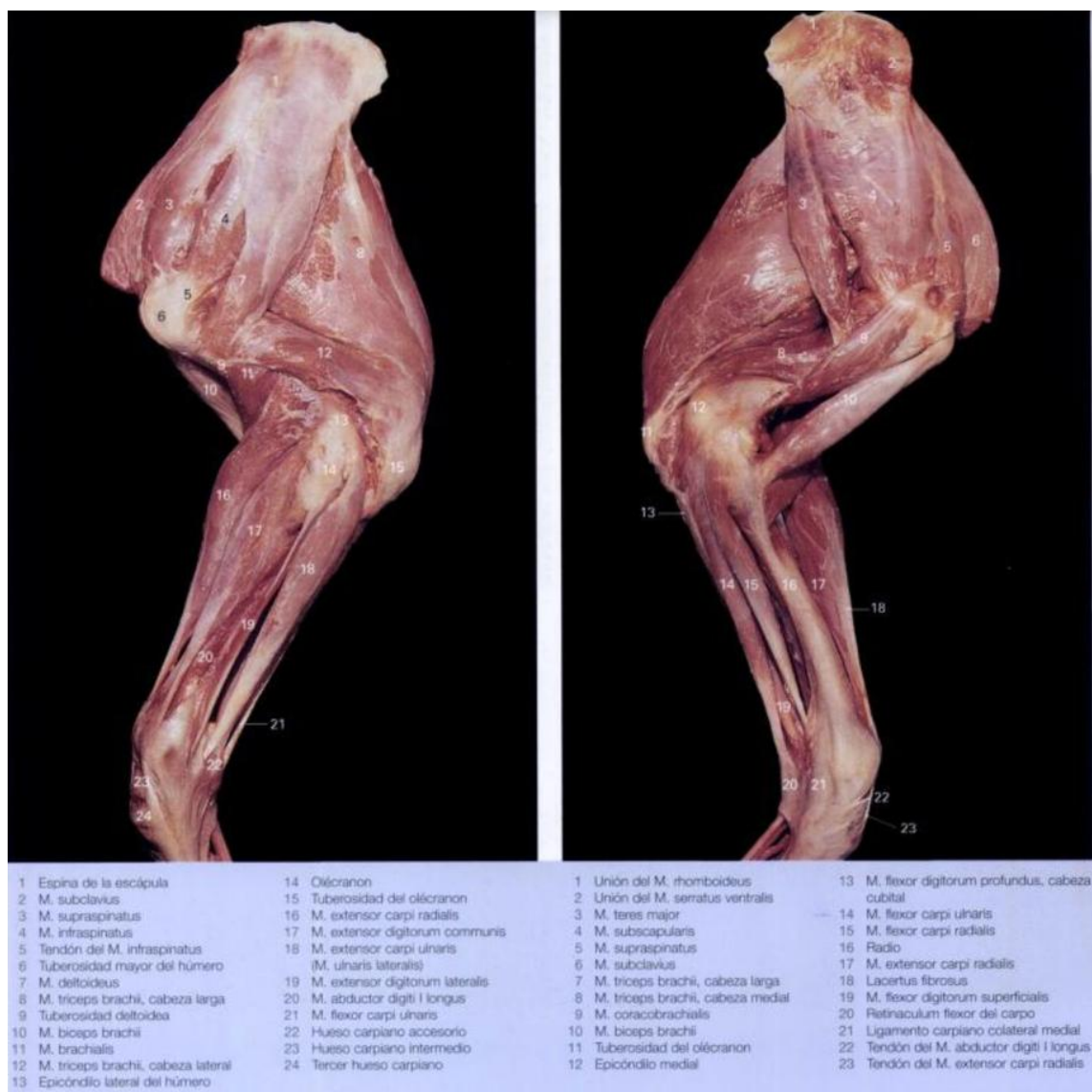


Figura II Disección superficial de la musculatura del miembro anterior. Fuente "Anatomía clínica del caballo"

3.4 Análisis de los andares del caballo

Como ya se ha visto, existen tres aires básicos en los caballos. De más lento a más rápido, paso, trote y galope, aunque se pueden describir una gran cantidad más de aires dependiendo de la raza y el trabajo realizado. Estos aires se pueden estudiar principalmente por cuatro factores principales.

El tempo, el cual describe la tasa de repetición de los pasos en un aire. Los caballos con un alza más alta tenderán a tener tempos más lentos, manteniendo la velocidad con un mayor número de repeticiones, mientras que los de menor altura a la cruz tienden a tener tempos más rápidos. El tempo se calcula a través de los pasos de un caballo en un minuto multiplicado por cuatro u observando el número de pasos con todas las extremidades del équido.[9]

La secuencia de pisada hace referencia a al orden que sigue el caballo en los movimientos de manos y pies a la hora de realizar un aire. Cada aire posee su secuencia propia existiendo en algunos tipos de aires dos secuencias, galope en “firme” o en “trocado”. [9]

El ritmo se define como el número de zancada y el intervalo de estas al andar. En el ritmo tiene en cuenta aspectos como la relación temporal de la pisada, donde se define si el aire tiene un ritmo regular o repetitivo o si por el contrario es irregular. Por ultimo dentro del ritmo también se definen los tiempos, que es el número de golpes que realiza el caballo en una zancada en un aire terminado. [9]

Por último se establece la fase de suspensión del aire, la cual es el tiempo en el cual el caballo no posee ningún contacto con el suelo en la locomoción. [9]

En el caso de caballos con lesiones graves el aire más interesante a estudiar es el paso por sus implicaciones en la movilidad inicial del equino. También es importante el estudio del trote ya que es en este aire donde mejor se detectan las cojeras. El galope queda descartado por en la detección por la asimetría del aire.

3.4.1 El paso

El paso es el andar más lento del equino, teniendo entorno a una velocidad máxima de 6-7km/h y destaca por no tener fase de suspensión, por lo que siempre hay un miembro en contacto con el suelo. Además, se puede observar que en el paso la parte trasera suele poseer una fase de elevación algo más larga que la parte delantera, aunque por lo general la fase de apoyo corresponde al 50% de la duración.

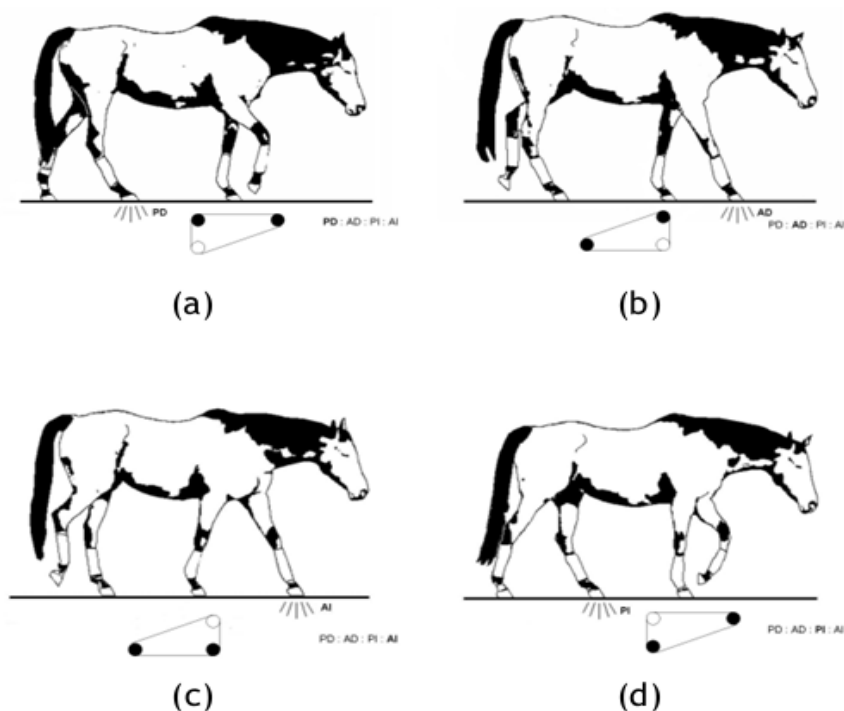


Figura III Representación de la secuencia de pisadas que constituye el paso. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"

Se trata de una marcha simétrica y posee un ritmo regular. El paso además destaca por describirse en cuatro tiempos teniendo una secuencia estable (Figura I). Esta acompañada de un ligero balaceo con la cabeza que ayuda a la estabilidad del equino. Por ello en un caballo promedio donde su tempo es 55 pasos/min se pueden establecer 220 zancada al minuto estableciendo un lapso de 0,27 segundos por pisada (Figura II).[9]



Figura IV Representación del tiempo en la secuencia de las pisadas en el paso. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"

3.4.2 El trote

El trote es un aire más complejo que el paso. En este andar existen velocidades de cómputo cero, como es en el caso de piaffe, y trotes que pueden alcanzar los 30km/h, como es en el caso de los Walker de Tennesi, teniendo cada uno sus particularidades. Por ende, el estudio se centra en el trote de trabajo que es el trote común.

El trote es un movimiento simétrico con un ritmo bien definido formado por la diagonal que forman las dos extremidades que se hayan en contacto con el suelo. La fase de suspensión del trote se encuentra justo en el cambio entre ambas diagonales (Figura III). Aunque el trote se define como un aire en dos tiempos existe una disociación corta entre el apoyo de la extremidad posterior y la anterior, a este fenómeno se le conoce como colocación avanzada de la diagonal. Este adelantamiento en el apoyo de la extremidad posterior de la diagonal es síntoma de la buena salud del animal. Aun así esta disociación es imperceptible de forma generar salvo con la ayuda de equipo especializado por lo que por eso el trote se considera de dos tiempos.[9]

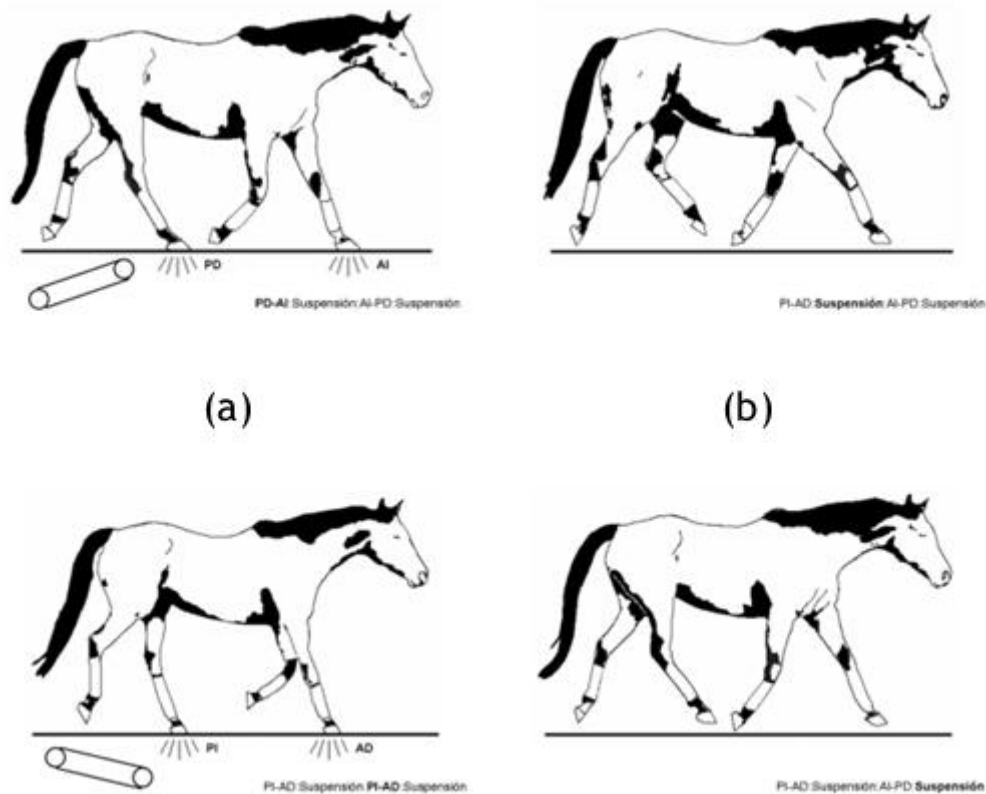


Figura V Representación de la secuencia de pisada que constituye el trote. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"

En el caso del trote el tiempo es mayor que en el paso, siendo este entorno a los 80 pasos por minuto, aunque el tiempo interfases es mayor en el caso del trote que del paso. Esto se debe a que al ser el trote un aire con solo dos fases, el cambio entre fases y el número de zancadas en estas es menor aun aumentando la velocidad del animal. Manteniéndose el tiempo del caballo el lapso entre fases sería de 0,375, habiéndose realizado 160 zancadas en un minuto (Figura IV).[9]

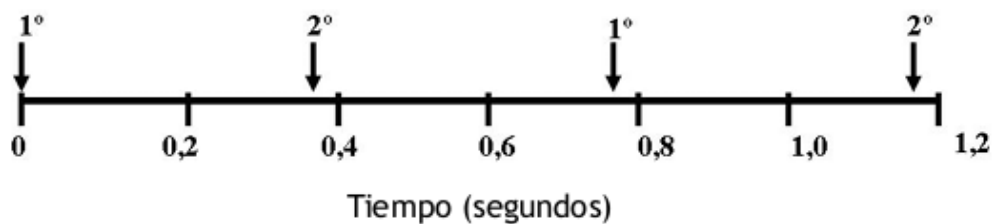


Figura VI Representación del tiempo en la secuencia de las pisadas en el trote. Fuente "Biomecánica de la locomoción del caballo"

3.5 Enfermedades típicas causantes de cojeras

La cojera en los equinos es una señal clínica que puede tener una gran cantidad de orígenes. Esta es una de las principales causas de consulta veterinaria dentro del mundo del caballo. Dicha alteración en la marcha puede estar provocada por múltiples factores, metabólicos, ambientales y físicos, que afectan a distintas estructuras, ya sean casco, tendones, ligamentos o el sistema nervioso.

Una de las causas más comunes de esta alteración en el movimiento normativo del caballo son las relacionadas con los cascos. Entre ellas destaca la infosura o laminitis, este es un grupo de problemas que desembocan en una inflamación de las láminas internas del caballo. Esta enfermedad si se deja sin tratamiento se puede volver crónica, desembocando en una multitud de problemas. Las infosuras generaran un dolor intenso y una cojera marcada que puede ser agravada por abscesos dentro del casco (ANEXO I). Otras enfermedades que afectan a la estructura normal del casco es el síndrome navicular, una condición crónica del hueso navicular y estructuras relacionadas que genera dolor. También grietas o fisuras y hematomas dentro del casco son condiciones que se dan muy comúnmente.



Figura VII Manos caballos lamiticos. Fuente "propia"

Además de los cascos, las articulaciones y huesos son causante de un gran número de cojeras. La inflamación articular o artritis es una enfermedad que genera dolor y limita la movilidad del equino. Esta puede ser de origen traumático o infeccioso, pero lo más común es que se origine a lo largo de la vida adulta del equino y tenga un factor degenerativo. Por otro lado, fisuras y fracturas en los huesos pueden ser fatales para los caballos si no se detectan a tiempo y generan un gran dolor en los equinos. También otras

patologías como osteocondritis disecante o el crecimiento anómalo en los huesos pueden generar dolor y cojera.



Figura VIII Radiografía tarso LM LAT posterior izquierdos chips óseos. Fuente "propia"

Los tendones, ligamentos y músculos también son estructuras que se pueden ver comprometidas. Caballos que realizan un gran esfuerzo físico, especialmente en disciplinas como el salto, pueden sufrir de una inflamación en los tendones o desgarros y roturas de ligamentos y músculos. Lesiones como la tendinitis suelen generar dolor y suelen estar acompañadas de calor e hinchazón en la zona. Los desgarros y roturas suelen ser muy evidentes y suelen tener un carácter incapacitante, dejando al equino sin la capacidad de continuar con sus funciones, un ejemplo de esto pueden ser las lesiones del ligamento suspensorio que afecta directamente a la estabilidad del menudillo y al patrón de apoyo.

Además de las anteriormente mencionadas existen más enfermedades que generar cojeras. Desde enfermedades en el sistema nervioso, como el síndrome de Wobbler en el cual una compresión en la medula dificulta la coordinación de equino. A enfermedades de origen infeccioso, como celulitis o arestines, que afectan a los tejidos blandos. Además, malformaciones, herrajes incorrectos, sobre entrenamiento, entre otros pueden generar cojeras momentáneas pero que si no se tratan pueden derivar en problemas graves.

3.6 Detección de las cojeras

Cuando un caballo padece de una cojera, en la actualidad, es el jinete o un instructor el que, en la mayoría de los casos, ha de darse cuenta de este síntoma. Y posteriormente un veterinario será el que tenga que desplazarse al lugar no solo para cerciorarse de que existe una cojera, sino también para el seguimiento del equino.

El análisis de la cojera se realiza a través de un método cualitativo. A este método se le conoce como andado del caballo, y requiere de a través del uso de una cuerda larga o ramal unido a una cabezada de trabajo. El proceso de detección consiste en obligar al caballo a pasar por los diferentes aires, paso, trote y galope, a ambas manos. Durante este proceso el veterinario observa el movimiento en los distintos aires, así como las transiciones y la energía que presenta el caballo al realizar el ejercicio.

En casos graves la cojera puede ser fácilmente detectable, pero en otros casos más sutiles, este método depende totalmente de la pericia y el buen entendimiento tanto de jinete como de veterinario. Además de esto al ser el proceso cualitativo e in situ, no se suelen almacenar datos más que, en el caso de haber sido realizadas, placas u otro análisis clínico que se la haya podido realizar al equino, reduciendo así la capacidad del clínico de ver leves mejoras.

En la actualidad se está empezando a dar el uso de fotogrametría y acelerometría para el análisis de patrones de movimiento. Todavía su uso es residual, pero por su complejidad y la falta de formación en los mismos.

Capítulo 4. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

4.1 Materiales

Se usará PLA para el desarrollo de la carcasa donde se introducirán los distintos elementos del prototipo. Este polímero termoplástico bioactivo es un derivado de recursos renovables como el maíz o la caña de azúcar. Su fórmula química es $(C_3H_4O_2)_n$. Este material es altamente utilizado junto con el uso de dispositivos de impresión 3D y se puede mezclar con otros materiales para reforzar sus propiedades, un ejemplo de esto es el PLA-FC el cual es similar, pero mejora la resistencia del material. [11]

Las propiedades del material, así como sus propiedades de impresión son:

- Propiedades del material
 - Densidad = $1,24 \text{ g/cm}^3$
 - Resistencia a la tracción = 3309 MPa
 - Limite elástico = 55MPa
 - Resistencia a la compresión = 66 MPa
 - Resistencia a la flexión = 80 Mpa
 - T° de deformación = 52°C
 - Conductividad térmica = $0,13 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
 - Baja resistencia a la humedad
 - Elongación de 3%
 - Resistividad eléctrica = $3 \times 10^{17} \text{ ohm} \times \text{cm}$
- Propiedades de impresión en 3D:
 - T° de Extrusión = 200°C
 - Potencia de ventilador al 100%

Gracias a estas propiedades se puede ver que el PLA es un material con una alta dureza y elasticidad que resiste a impactos de forma adecuada. Además, gracias a su fácil maleabilidad y su bajo coste, la hace perfecto para el desarrollo de un dispositivo básico viable. [12]

4.2 Componentes

4.2.1 MPU-6050

El MPU-6050 es un sensor que se utiliza para la medición de velocidad angular y la aceleración. El sensor es un IMU, compuesto por un giroscopio y un acelerómetro. Estos componentes poseen tres grados de libertad cada uno, haciendo un total de seis grados de libertad.

La velocidad angular es el desplazamiento angular con respecto al tiempo, y la calcularemos utilizando el giroscopio de tres ejes, que tiene en su interior un MEMS, encargado de medir la velocidad angular. Con este dato y el tiempo a su vez podemos calcular integrando el desplazamiento angular e incluso el ángulo o posición angular si conocemos el punto de partida de la medición.

La aceleración es la derivada de velocidad con respecto al tiempo. De su cálculo se ocupa el acelerómetro. Teniendo la posición inicial, velocidad y la integración se puede obtener también la velocidad del movimiento y el desplazamiento. En el caso de que el sujeto se quede quieto se puede obtener la aceleración gravitatoria.[13]

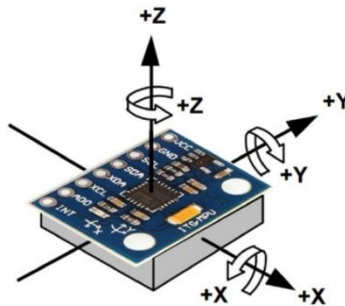


Figura IX Grados de libertad MPU-6050. Fuente" naylampmechatronics"

A continuación, se describe el funcionamiento de los pines:

- VCC: Conexión con la corriente.
- GND: Conexión tierra.
- SCL: Pin de comunicación I2C. Le corresponde el CLK.
- SDA: Entrada de datos en la comunicación I2C.
- XDA: Salida de datos en la comunicación I2C.
- El resto de los pines no son relevantes para el desarrollo del trabajo.



Figura X IMU MPU-6050. Fuente "naylampmechatronics"

4.2.2 PORTABATERÍAS

Este componente es una fuente de alimentación portable capaz de alimentar componentes a 3V y 1A o a 5V y 2,2A. Posee un puerto de carga tipo C capaz de recargar las baterías 18650 a 600mA-800mA. En el caso del modelo V8, este admite dos baterías 18650.[14]

Como características principales podemos destacar:

- Protección sobrecarga y sobredescarga
- Puerto de carga tipo C
- Puerto USB de salida



Figura XI Battery Shield V8. Fuente "eledelitio"

4.2.3 BATERIA 18650

Las baterías 18650 son baterías de iones de litio las cuales destacan por ser baterías recargables con una muy buena capacidad de almacenamiento, una larga vida útil y una mínima autodescarga. La capacidad promedio de estas baterías es de 1800mAh a 3500mAh. Por lo general estas baterías mantienen una tensión de descarga desde 3.7V a 2.5V y son capaces de ser cargadas a 4.2V.[15]



Figura XII Baterías 18650. Fuente "opencircuit"

4.2.4 ESP-32

El ESP-32 es una familia de microcontroladores de bajo coste y consumo. Su principal característica es que posee un módulo Wifi y Bluetooth integrado además de una gran multitud de interfaces periféricas. Además, posee un protocolo de comunicación P2P, el ESP-NOW.[16]

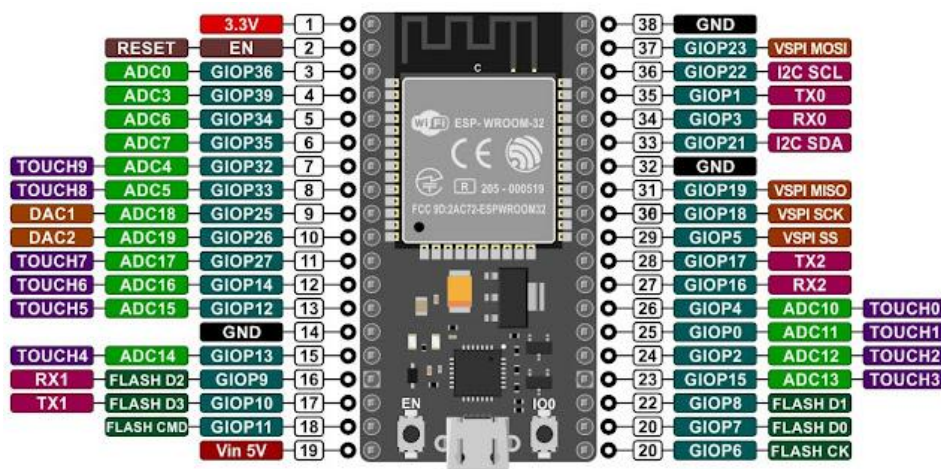


Figura XIII Esquema de Pines ESP-32. Fuente "vasanza.blogspot"

Descripción de especificaciones técnicas:

- CPU: Xtensa Dual Core IX6 de 32 bits
- Memoria ROM: 448 KB
- CLK MAX: 240MHz
- Memoria RAM: 520KB
- Memoria flash: 4MB
- Estándar inalámbrico 802.11 b/g/n
- Conexión Wifi de 2.4Ghz
- Antena Integrada

- Conector micro-USB
- Voltaje de funcionamiento: 4.5-9V
- ADC

4.3 Sistema de Comunicación

4.3.1 I2C

I2C es un protocolo de comunicación serial de dos hilos, SDA y SCL. El protocolo es capaz de admitir múltiples dispositivos objetivo en un bus de comunicación, así como múltiples controladores que envían y reciben datos. Esta comunicación se realiza en paquetes de bytes con una dirección única para cada dispositivo.[17]

Existen tres protocolos básicos de comunicación en la comunicación I2C. Estándar mode, Fast mode y Fast mode plus son tres modos de comunicación similar dentro de la estructura I2C. Estos protocolos tienen una estructura de comunicación similar, aunque existe una diferencia de velocidad y en los requerimientos a los componentes de los controladores.

Por otro lado, existen otros dos protocolos de comunicación conocidos como protocolos de alta velocidad. El High-Speed mode, el cual consigue velocidades de 3.4 Mbps aunque puede requerir de un componente activo (pullup) para dirigir las comunicaciones de alta velocidad. El Ultra-Fast mode consigue velocidades de hasta 5 Mbps aunque sacrificando ciertas funciones del protocolo I2C, convirtiéndolo en un modo únicamente de escritura.[17]

I ² C Mode	Maximum Bit Rate
Standard-mode	100kbps
Fast-mode	400kbps
Fast-mode Plus	1Mbps
High-speed mode	3.4Mbps
Ultra-Fast mode	5Mbps

Tabla II Descripción de velocidades de protocolos I2C. Fuente "A basic guide to I2C"

Una de las razones por las cuales el I2C es un protocolo típico de comunicación es por su comunicación basada en dos hilos. La línea SCL, para el usada para sincronizar el CLK en nuestro dispositivo objetivo, y la SDA, la cual es la línea de datos. Este protocolo se diferencia del SPI, protocolo de 4 cables, es que el I2C es un protocolo half-duplex, lo que permite que solo un controlador o dispositivo envíe datos a la vez. Por este motivo en el protocolo I2C existe un controlador maestro, el cual controla el envío de datos a través de un código de datos en el bus, eliminando así posibles problemas en comunicación.[17]

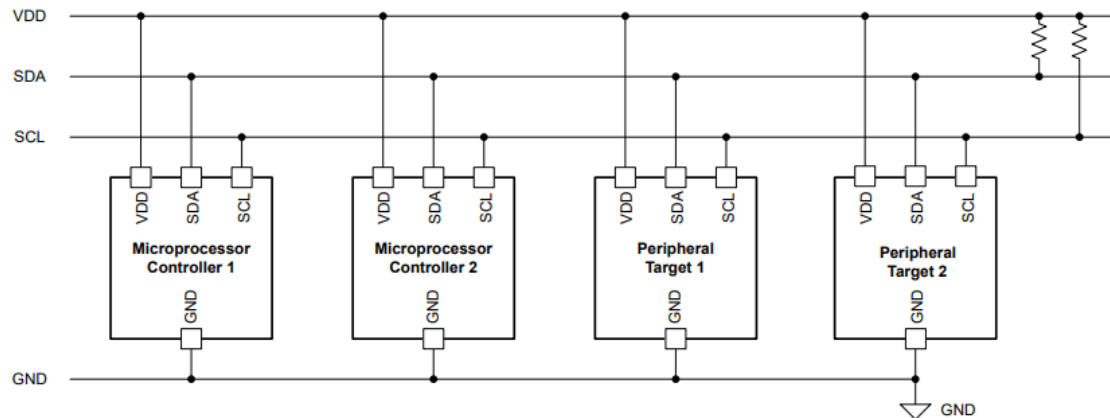


Figura XIV Implementación Típica del Protocolo I2C. Fuente "A basic guide to I2C"

El protocolo I2C está dividido en tramas de bytes. Esta comunicación comienza con una dirección específica que es enviada por el controlador maestro, la cual comienza la comunicación. Además, a la dirección se le añaden algunos frames de datos, así como uno para avisar de que el mensaje ha sido recibido correctamente.

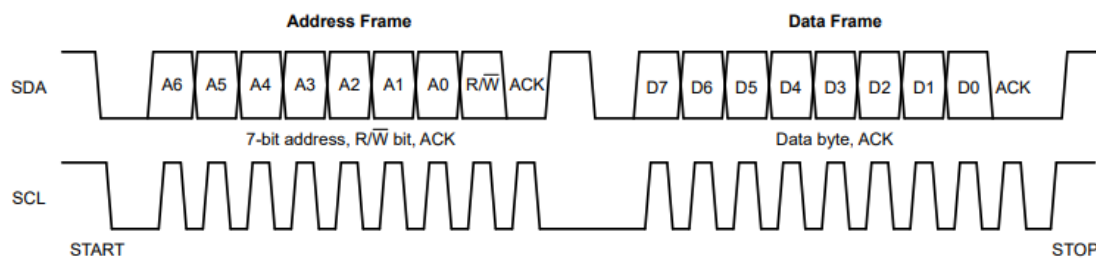


Figura XV Descripción de la comunicación por bytes en I2C. Fuente "A basic guide to I2C"

4.3.2 ESP-NOW

Para conectar los distintos dispositivos se utilizará el protocolo ESP-NOW, una tecnología de comunicación de baja potencia y alta velocidad que permite la transferencia de datos en tiempo real entre dispositivos de la familia ESP.

ESP-NOW es un protocolo de comunicación bidireccional P2P que opera en la banda de frecuencia de 2,4 GHz y utiliza FHSS. Esto ayuda a aumentar la resistencia a las interferencias que se pueden producir en la emisión de la señal en diferentes frecuencias de manera aparentemente aleatoria.

A diferencia de los protocolos Wi-Fi, ESP-NOW no requiere un punto de acceso a un punto Wi-Fi para transferir datos, lo que reduce la latencia y mejora la eficiencia. Sin embargo, en los microcontroladores ESP es necesario la activación del módulo Wi-Fi, ya que ambos protocolos comparten la misma antena de emisión y recepción.

ESP-NOW es muy eficiente en términos de consumo de energía, lo que permite que los dispositivos operen durante largos periodos de tiempo con bajos requisitos energéticos. Esto genera que el máximo número de datos enviados sea de 250 bytes de información lo que lo hace ideal para aplicaciones de bajo consumo de energía, como sensores

inalámbricos, dispositivos IoT y sistemas de control remoto sin acceso a la red eléctrica donde los requerimientos de envío de información no son demasiado grandes.

Además, ESP-NOW utiliza direcciones MAC para establecer el enlace entre dispositivos y está diseñado para ser compatible con otros protocolos inalámbricos de comunicación, como los protocolos Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita su integración con otros dispositivos y sistemas inalámbricos.[18]

Protocolo	Latencia	Consumo	Alcance	Complejidad
ESP-NOW	● Baja	● Bajo	● Medio	● Baja
Wi-Fi	● Media	● Alto	● Alto	● Alta
Bluetooth	● Media	● Medio	● Corto	● Media

Tabla III Comparación ESP-NOW y otros protocolos comunes. Fuente "Luis Llamas, protocolo esp-now"

Capítulo 5. PLANTAMIENTO DEL SISTEMA

5.1 Diagrama de dispositivos

El sistema estará compuesto por 3 ESP-32 conectado a su respectivo IMU MPU6050. Estos microcontroladores recopilarán y ordenarán los datos y los enviarán a otro ESP-32 maestra. El mensaje contenido en el paquete enviado de forma inalámbrica por el emisor a través del protocolo ESP-NOW posera un formato descrito como “ID (1,2 o 3 dependiendo del microcontrolador esclavo), ax (componente x del acelerómetro), ay (componente y del acelerómetro), az (componente z del acelerómetro).

A su vez la placa maestra recogerá los datos y a través de puerto se los trasladará al software diseñado en Matlab donde se procesará en forma de ángulos entre IMUS y se mostrarán en pantalla.

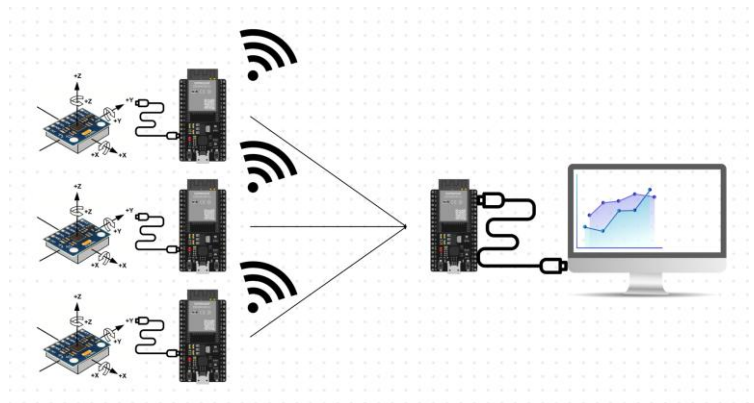


Figura XVI Diagrama de Dispositivos en el DMV. Fuente “propia”

5.2 Diagrama de flujo

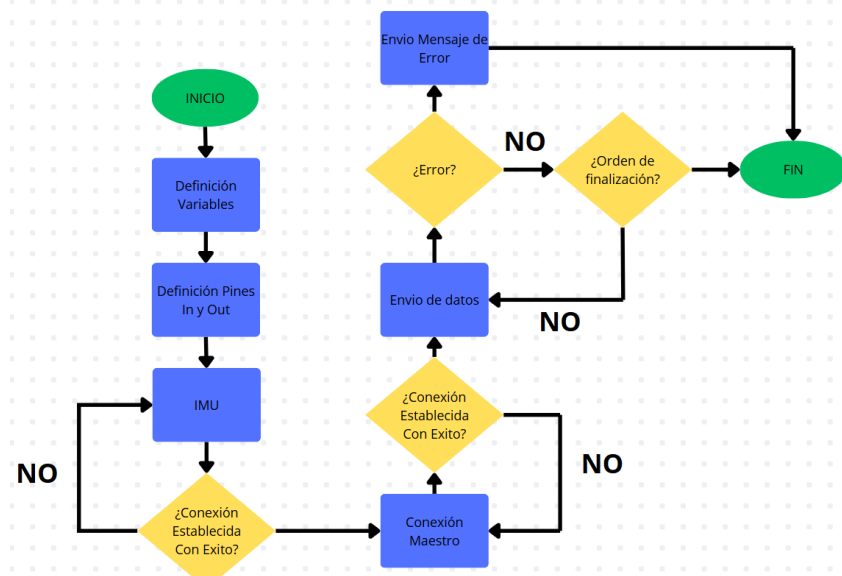


Figura XVII Diagrama de Conexión Placa Esclava. Fuente "Propia"

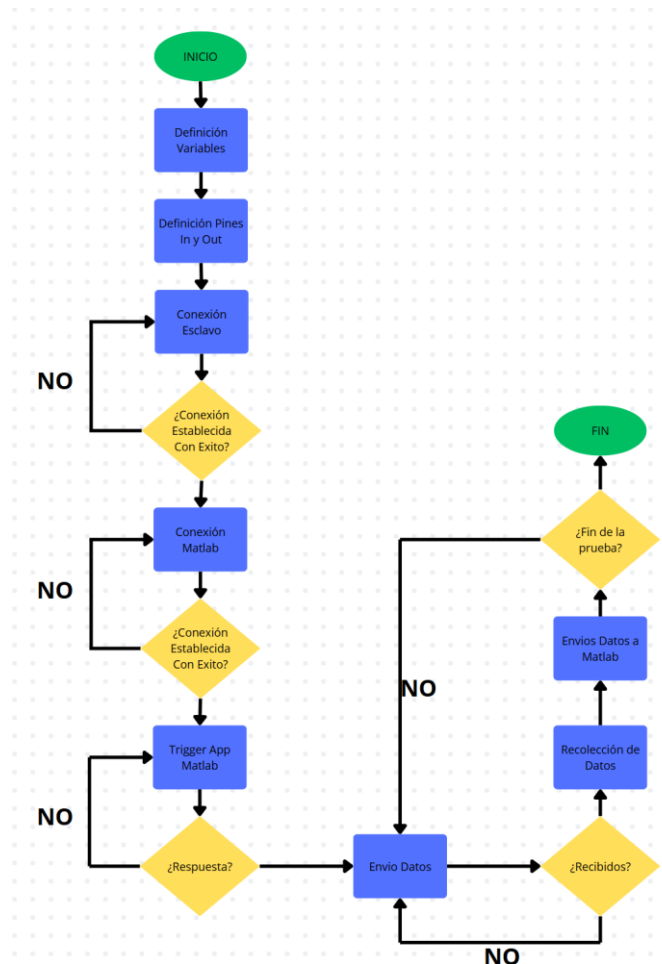


Figura XVIII Diagrama de Conexión Placa Maestra. Fuente "Propia"

5.3 Diseño de carcasas

El diseño de la carcasa ha sido realizado en el software de diseño 3D SolidWorks. Las carcasas son cuadradas de con unas medidas de 150x85x32mm. Diseñadas en PLA de color negro poseen el nombre del equipo, así como su número de ID (1,2,3) identificativo de la posición donde va colocado en el equino.

Se compone de dos piezas separadas. La primera corresponde al contenedor de los componentes. Esta primera pieza se puede divide a su vez en dos zonas conectadas por un cable. La primera zona es donde se encuentran las estructuras para el almacenamiento de el battery shield y las pilas 18650. En la segunda zona se encuentran las estructuras para la ESP-32 esclava, y el IMU.

La segunda pieza es la tapa del contenedor y será donde se encuentra el nombre del diseño (EquiCam) así como el ID del dispositivo.

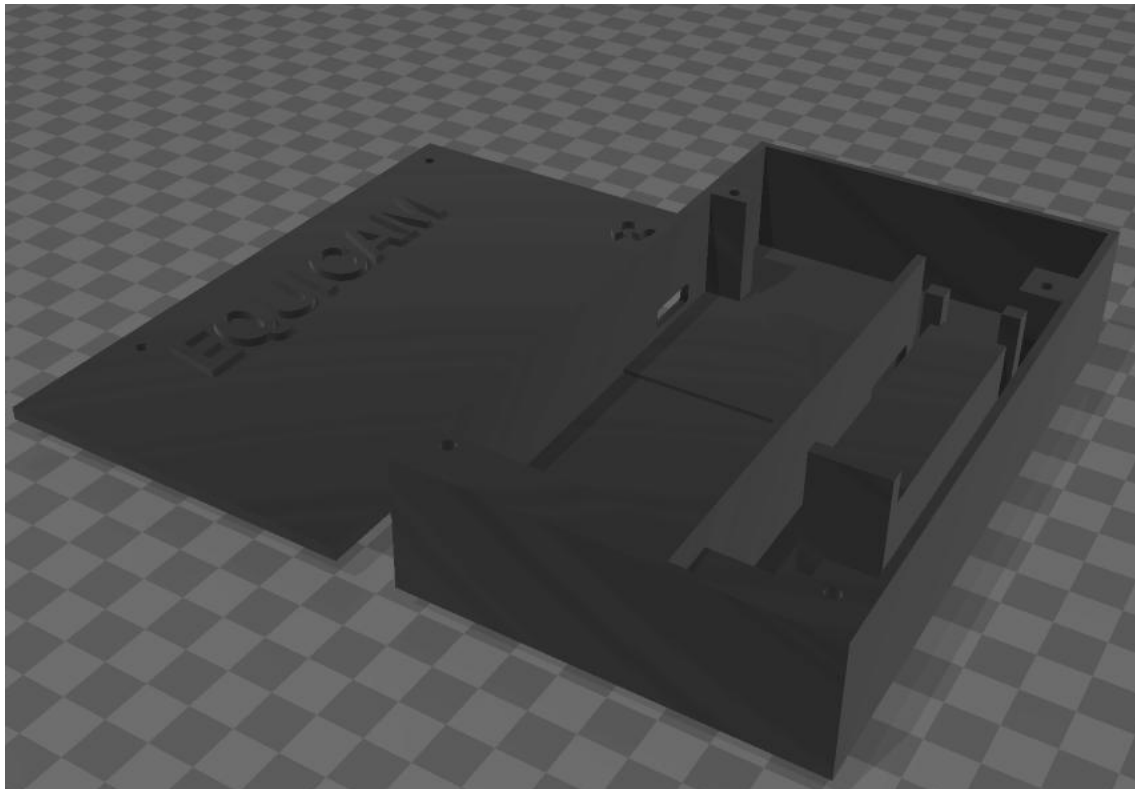


Figura XIX Carcasa de los Componentes. Fuente "propia"

5.4 Colocación de dispositivos

Los tres dispositivos se colocarán en un orden específico en el cuarto delantero del equino. Comenzando desde el punto más distal, encontramos el primer dispositivo (ID 1). Este se colocará en la mano del caballo, más concretamente en la zona de la caña. Se ubicará en una la zona lateral para evitar daños a la hora de realizar la prueba. El segundo dispositivo (ID 2) se situará por encima de la rodilla, en la zona del antebrazo. Al igual que el anterior, este dispositivo se encontrará en área lateral. Por último, el tercer (ID 3) dispositivo se encontrará en la zona del hombro del equino.

Todos los dispositivos se colocarán con la esquina con el número de identificación colocado en la esquina de arriba más cercana a los cuartos traseros del equino. Es importante que los equipos estén bien sujetos para evitar artefactos y accidentes que puedan dañar el dispositivo.

5.5 Cálculo de los ángulos

El procedimiento seguido para el cálculo de ángulos consiste en el cálculo de vector aceleración con tres valores (componente X, Y y Z) así como los valores del giroscopio. El ángulo se obtendrá de la aplicación de un filtro Madwick el cual utiliza los datos del giroscopio y ángulos de Euler para minimizar errores y calcular la diferencia de ángulo entre los distintos sensores. Los ejes X e Y se utilizaran para el movimiento de flexión, mientras el eje Z se utilizará para calcular el plano normal entre los tres ejes.

Se tendrá que observar un gran cambio entre el ID 1 y el ID 2, debido a que la articulación del codo es la que más movimiento registra en el trote. Sin embargo, este cambio ha de ser menos notable entre el ID 2 e ID 3 ya que ambos sensores se han de comportan de forma similar salvo en casos de cogerá.

Capítulo 6. PROTOTIPADO Y EVALUACIÓN

6.1 Metodología

La metodología de un proyecto sirve para reflejar la forma en la que se va a llevar la organización del proyecto. Al ser el objetivo final de este proyecto el desarrollo de una idea creativa para la solución de un problema en el ámbito veterinario se usará la metodología de Design Thinking.

El Design Thinking es una metodología basada en el concepto de Human Centric, centrándose en el ser humano y basándose en la empatía y la creatividad para abordar problemas. Este tipo de metodología para proyectos fomenta la innovación y la resolución de problemas. En lugar de buenas soluciones preconcebidas, esta metodología intenta comprender las necesidades del usuario en profundidad e intenta generar soluciones relevantes y creativas.

Algunos aspectos relevantes de esta metodología es su capacidad adaptativa. Esto se debe a que el enfoque interactivo de la misma permite la creación de un producto mínimo viable que usar como prototipo, al que ir haciendo continuas mejoras a medida que se aprende de la retroalimentación del usuario.[19]

Gracias a todo lo anteriormente mencionado, el Design Thinking es una de las metodologías más apropiadas para los proyectos centrados en la innovación como es el caso del sistema de instrumentación. Además, la retroalimentación de este proyecto se basa en la continua observación del trabajo veterinario de campo, así como de los usuarios jinetes o propietarios de equinos.

6.2 Visualización y almacenamiento de las pruebas

Se usará una aplicación simple desarrollada en Matlab visual studio para la visualización de los datos en tiempo real. En encontramos dos botones, una gráfica y un label como se puede ver en la ‘Figura XX’. La grafica permite la visualización de los datos en tiempo real a la vez que se realiza la prueba. El label es para introducir el nombre del equino al que se le está realizando la prueba (Esto luego será usado para el almacenamiento de los datos es formato CSV). Por último, encontramos dos botones, el primero, nombrado como ‘guardar en CSV’, se utilizará al finalizar la prueba y guardará los datos en un CSV fácilmente accesible desde Excel y con un formato listo para futuros estudios de marcha. El segundo botón es el de inicio de la prueba y se pulsara para el inicio de recogida de datos.

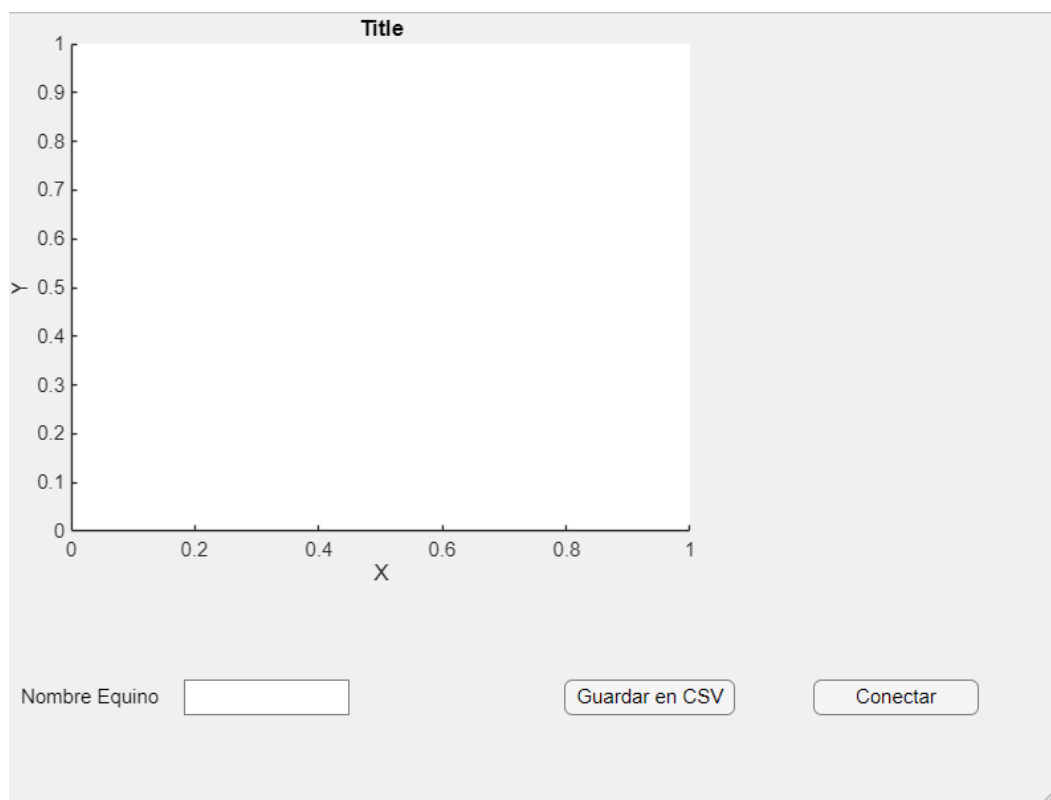


Figura XX Pantalla Visualización de Datos. Fuente "propia"

Como ya se ha comentado, el almacenamiento se realizará en formato CSV. Se guardará en el formato que se muestra en la ‘Figura XXI’. Se puede observar tres columnas definidas. La primera corresponde al tiempo de recogida de muestras, la segunda al Angulo 1-2 (Angulo de la caña-antebrazo) y la tercera al Angulo 2-3 (Angulo antebrazo-hombro). Este formato permite una graficar de forma rápida los datos en Excel y que sean así fácilmente observables.

	A	B	C
1	Tiempo_s	Angulo_1_2	Angulo_2_3
2	0,477116	-21,6378	-19,6044
3	0,554475	-21,1497	-19,6044
4	0,617457	-21,1497	-18,147
5	0,63036	-22,6552	-17,7793
6	0,710824	-24,7821	-17,7793
7	0,750964	-24,7821	-18,9364
8	0,767774	-26,8481	-21,6247
9	0,862039	-24,8265	-21,6247
10	0,908188	-24,8265	-20,4381

Figura XXI Muestra de Guardado de Datos CSV Caballo Bribón. Fuente "propia"

6.3 Proceso de Desarrollo y Montaje del Sistema

En una primera fase se procedió al diseño de múltiples prototipos e ideas a desarrollar con utilidad para el análisis e instrumentación de equinos en el ámbito veterinario. Tras deliberar con los clínicos se llegó a la conclusión de que el dispositivo con mayor utilidad era aquel capaz de detectar uno de los mayores problemas y que más caballos jubila, las cojeras. Con este fin se desarrolló se comenzó con el diseño de un sistema por acelerómetros al que se le quiso añadir detección de temperatura en puntos clave como son la muralla y la vena digital (Esto fue descartado por la falta de estudios oficiales y tras el resultado inconcluso de un estudio propio de termografía con los que avalar el sistema).

Una vez la idea estuvo clara se construyeron distintos sistemas que se fueron adaptando para hacerlos lo más simples y fáciles. Teniendo que cambiar el diseño en múltiples ocasiones por no ser viables o incómodos para el clínico, se optó por tres cajas las cuales se engancharían a distintos sistemas que serían adaptados, pero ya existentes dentro del mundo de la equitación (Protectores de manos o chalecos de protección ante rozaduras).

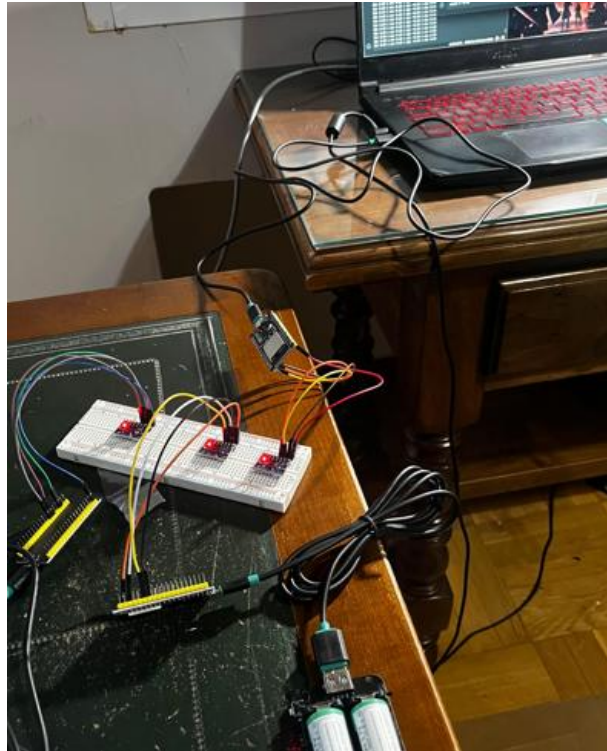


Figura XXII Sistema Montado con Protoboard. Fuente "Propia"

La siguiente fase fue el desarrollo de la idea, para ello se procedió a la compra de los distintos componentes a utilizar. Una vez estos llegaron se soldaron y se inició la programación y el proceso de prueba y error con el sistema de comunicación. En esta fase se usó un sistema tipo al que se iba a implementar en la fase final ayudado con una protoboard como se observa en la ‘Figura XXII’. Se estudio el uso del sistema BLE y el ESP-NOW, optando por el segundo por su mayor facilidad de manejo y fácil uso junto con las ESP-32. Quedando el sistema final con tres microcontroladores esclavos, conectados por cable a los acelerómetros, y otro microcontrolador maestro, receptor de los datos y emisor por cable al ordenador (Todos los códigos observables en los anexos IV,V y VI).

A la par que se desarrollaba la parte electrónica se procedió al desarrollo de las carcasas para su contenido. Estas se desarrollaron en PLA con el uso del software de SolidWorks, así como crealityPrint. La impresión se realizó en una impresora K1C de la empresa Creality usando una punta del 0.6mm. Una vez se tubo ambas fases completadas se procedió al montaje como se observa en la ‘Figura XXIII’



Figura XXIII Montaje Final del Sistema. Fuente "propia"

Por último, se desarrolló la App para la visualización de los datos. En esta se quería poder observar la llegada de los datos en tiempo real, así como la capacidad de almacenar los datos para su futuro estudio. Se optó por una graficación en tiempo real, aunque para evitar la saturación esta se actualiza cada cinco muestras (siendo equivalente a cada 0,75s o 1,3Hz) y el guardado se realizaría al finalizar la prueba en formato CSV (por lo que se tuvo que cambiar el formato de separación de Matlab al estilo europeo para evitar errores en el almacenamiento). Así mismo hubo que reducir la frecuencia de envío de datos de 20Hz a 8Hz para evitar la saturación del puerto-matlab.

6.4 Prueba de Campo y Resultados

Se realizaron las pruebas en el centro hípico 'El Cerrillo', un centro de equitación ubicado en Galapagar con aproximadamente 50 caballos en las cuadras y múltiples pistas para realizar las pruebas. Se optó por realizar las pruebas con un PRL de 17 años sano de 153cm a la cruz. Esto se hizo para poner a prueba el sistema y la viabilidad de este.

Para la prueba de campo hubo que adaptar algunos de los dispositivos ya que las partes que se iban a adaptar no llegaron en los plazos previstos. Se colocaron los sensores en la extremidad delantera izquierda (caña, antebrazo y hombro), como se puede ver en la 'Figura XXIV'. Posteriormente se procedió a trotar al caballo en círculos, dándose en un momento dado durante la prueba múltiples tropiezos por parte del caballo, seguramente por el estado del suelo y la falta de calentamiento del equino, siendo perfecto para la prueba del funcionamiento del sistema. Una vez se terminó la prueba se almacenaron los datos y se procedió al análisis.



Figura XXIV Prueba de Campo Bribón. Fuente 'propia'

En el análisis de resultado se pudieron constatar múltiples patrones (FiguraXXV). En primera instancia se puede ver el momento de los tropiezos claros del caballo en el ángulo que se forma entre el ángulo del brazo y el hombro (Angulo 2-3) donde estos se mantienen casi estable en torno a los 20°-30° salvo en estos momentos donde se tropieza (donde es sensor detecta una bajada súbita del ángulo y una recuperación rápida instantánea. También se pueden encontrar dos fases muy diferenciadas. Una primera fase donde el cambio de angulación es mínimo correspondiente al paso (Aquí podemos ver el calibrado de los sensores al inicio de esta) y una segunda de trote, donde el cambio de ángulo y las zancadas se hacen más evidentes. Se pueden ver dos artefactos de acople de señal durante el muestreo, seguramente debido a la necesidad de una mejor gestión de los datos.

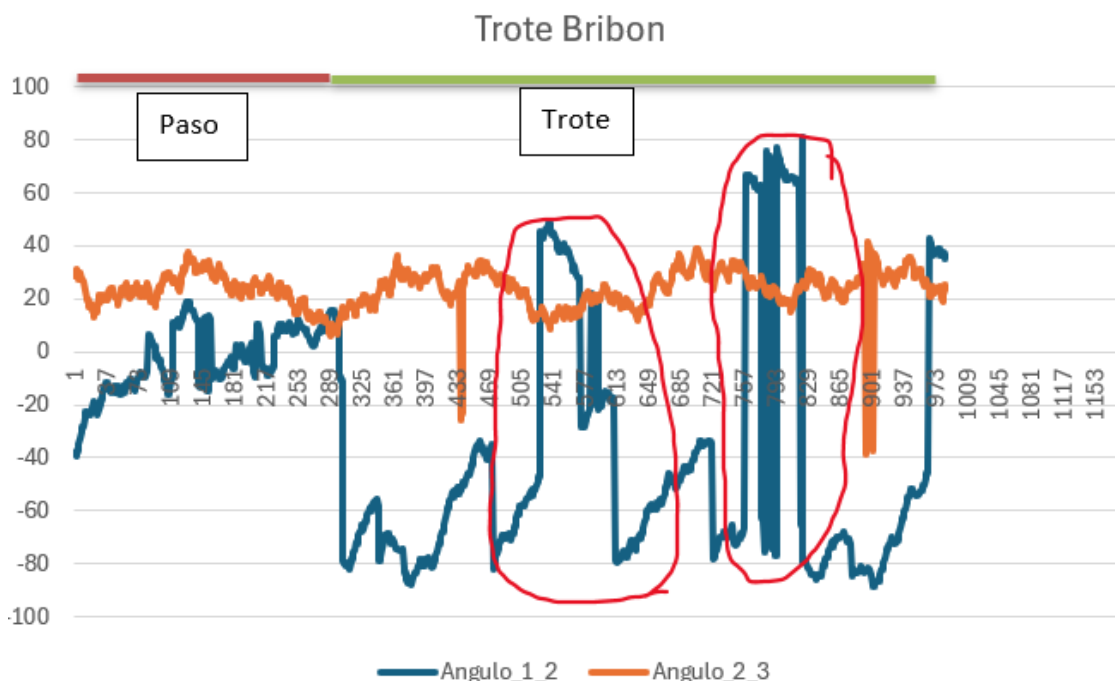


Figura XXV Datos de Prueba de Trote Bribón. Fuente "propia"

6.5 Análisis de fallos y riesgos

En este apartado se pretende identificar posibles fallos, riesgos y usos inadecuados del sistema a tener en cuenta durante el manejo del equipo. Esto con el fin de prevenir incidentes y garantizar la seguridad del animal, del usuario y del equipo.

Posibles fallos a tener en cuenta:

- Fallos eléctricos, aquí incluyendo cortocircuitos, sobrecargas o fallos en la batería. Se propone no tocar el dispositivo y enviarlo a revisar.
- Fallo de los sensores, con lecturas erróneas o la ausencia de estas. Compruebe el nivel de carga del equipo y reinícielo, si la falla continua envíelo a revisar.
- Fallo en el software. Compruebe que a introducido todos los datos y siga las indicaciones de los errores programados para saltar en caso de fallo.
- Fallo en la comunicación, por un fallo en los microcontroladores. Envié el equipo a revisar.
- Fallo de descarga. Carga el equipo conectándolo a una fuente de alimentación.

Además, se ha de tener en cuenta posibles riesgos que pueden surgir por el uso del equipo:

- Riesgo de rotura y caída. Por el uso durante las pruebas en caballos. Asegure de que los dispositivos están bien adheridos al caballo durante la ejecución de las pruebas

- Riesgo de mojado. Evite utilizar el equipo en días lluviosos o en espacios con gran cantidad de agua, el equipo no es impermeable y no está preparado para agua.
- Riesgo de electrocución. Evite usar el dispositivo para fines que no sean los estipulados (evite cosas como morder el dispositivo, intentar arreglarlo, golpearlo de forma desmedida, entre otros) todo uso que no comprueba su función principal puede dañar el dispositivo y en algunos casos causar electrocución.

Capítulo 7. ESTUDIO ECONÓMICO Y PRESUPUESTO

7.1 Resumen ejecutivo

El sector hípico en España ha experimentado un crecimiento muy significativo en los últimos años. Este sector ha conseguido alcanzar los 7000 millones de euros, según datos de 2022, suponiendo el 0,59% al PIB. Las comunidades autónomas que se han visto más favorecidas por este crecimiento son Andalucía, Madrid y Valencia[1]. Este crecimiento se debe al auge de nuevas yegadas, así como la atracción de grandes eventos internacionales como la longuines global champions tour[20] o el ya conocido evento de la Madrid horse week.

Así mismo la industria veterinaria también está en expansión, viéndose la aparición de múltiples facultades de veterinaria, así como de clínicas y hospitales veterinarios a lo largo de la geografía de España. Debido al gran aumento de estos centros estos buscan cada vez más destacar a través de la tecnificación de los tratamientos y diagnósticos.

Gracias a esto se puede suponer que España presenta grandes oportunidades en el sector veterinario y más concretamente en el sector hípico, donde existe un crecimiento constante y baja competitividad tecnológica en el ámbito de los wearables.[1]

7.2 Contexto Actual

El mundo de la hípica es una industria en alza dentro de la economía española. Para hacerse una idea, en 2014 la industria movía 361 millones de euros anuales mientras que en 2022 subió a los 7000 millones. Esto supone una subida del 1939% de crecimiento en menos de 10 años.

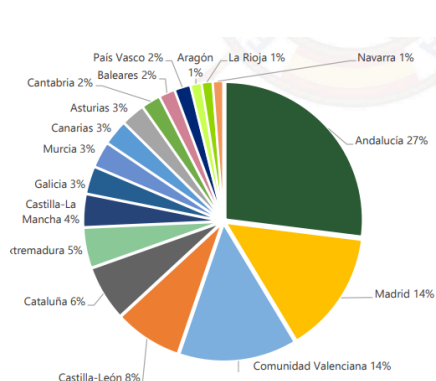


Figura XXVI Distribución del sector por CCAA. Fuente "estudio del impacto del sector ecuestre 2022"

La industria de la hípica supone hoy en día un 0,59% del PIB según un estudio elaborado por Deloitte & Greek Oak. Existen aproximadamente 70.000 federados y unos 722.158 caballos censados. Además, el gasto medio por profesional es de entorno a los 900 - 1000€ mensuales por caballo.

Dentro del mundo hípico en España destacan cuatro comunidades autónomas por orden de gasto. Andalucía, con el 27% del mercado español y 233.501 Caballos; La Comunidad de Madrid, con el 14% del mercado y 23.915 caballos; Comunidad Valenciana, con un 14% del mercado y 25.769 Caballos; y Castilla y León con un 8% del mercado y 74.884 Caballos.

7.3 Cifras Actuales

Se destaca en el estudio de 2022 el gran volumen de dinero que se mueve en los tres ámbitos principales del mismo (Cría, Transformación y Explotación) como se puede observar en el Anexo II.

Centrándonos en las principales comunidades autónomas y en los segmentos de gastos donde nos podríamos incluir, transformación y explotación, podemos observar que solo juntando Andalucía, Madrid y Valencia tenemos un volumen de gasto de 2.866.825.319€. Destacando las tres comunidades como los principales centros de explotación del país y siendo, además, Andalucía la principal en el ámbito de transformación.

Otro punto a favor es la evolución del sector de la transformación y explotación equina, siendo este segundo el que ha impulsado la gran evolución en cifras económicas del sector equino en general como se puede ver en el Anexo III.

7.4 Presupuesto

Material	Unidades	Precio Unidad	Coste Final
ESP-32	4	8,66€	34,54€
MPU 6050	3	1,6€	4,8€
BATTERY SHIELD	3	9,99€	29,97€
PILAS 18650	6	8€	48€
CABLES	1(Paquete Cables)	7,99€	7,99€
PLA	1(Bobina PLA)	26,88€	26,88€
ESTAÑO	1(Bobina Pequeña)	6,29€	6,29€
CINTA AISLANTE	1	0,95€	0,95€
CABLES USB-MICROUSB	4	7,99€	31,96€
VELCROS	1	10,99€	10,99€
CABLES TIPO C	3	7,99€	23,97€
PASTA DE SOLDAR	1	12,70€	12,70€

Tabla IV Gastos de Material. Fuente "propia"

Herramienta	Precio	Vida Útil Estimada	Tiempo de Uso	Desgaste Imputable
CREALITY K1C	574€	6 años	4 meses	31,89€
SOLDADOR DE ESTAÑO	19,66€	3 años	1 mes	0,55€
CARGADOR PILAS 18650	39,99€	2 años	1 mes	1,67€
ORDENADOR MSI GF63 8RD	1150€	5 años	8 meses	153,33

Tabla V Gastos de Dispositivos. Fuente "propia"

El desgaste se calcula a través de una amortización lineal, cuya fórmula general es:

$$\text{Amortización anual} = \frac{\text{Costo de adquisición} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil(años)}}$$

A esta fórmula luego se le aplica el tiempo de uso:

$$\text{Desgaste imputable al proyecto} = \text{Amortización anual} \times \left(\frac{\text{Meses de uso}}{12} \right)$$

Software	Precio de Licencia	Subvencionado
MATLAB	45€	100%
ARDUINO	Gratis	No
SOLIDWORKS	55€	100%

Tabla VI Gastos de Licencias. Fuente "propia"

Personal	Precio a la Hora	Tiempo Estimado	Total
PRACTICANTE INGENIERO BIOMEDICO	4,37 €/h	100h	437€

Tabla VII Gastos de personal. Fuente "propia"

COSTE DE DESARROLLO = 863,48€

Capítulo 8. LINEAS FUTURAS

A lo largo de este trabajo de fin de carrera se han identificado múltiples oportunidades de mejora, así como características añadidas que podrían darle un gran valor al proyecto y podrían abordarse en futuros trabajos. Una de estas líneas de mejora sería la mejora de la comunicación, esto debido a que los movimientos de un equino son rápidos y en el sensor que se encontraba en la caña tenía dificultades para un correcto muestreo.

Otra área de mejora sería la integración de más capacidades al sistema, en este proyecto se estudió el uso de termopares para detectar la temperatura en puntos relevantes del equino, pero la falta de estudios fiables desechó la idea. Otras herramientas que se podrían introducir son la introducción de tecnologías emergentes como el DeepLearning o algoritmos, para la automatización del estudio biomecánico reduciendo la carga de trabajo del clínico, o la mejora de la app para una mejor experiencia por parte del usuario final.

El desarrollo de un sistema completo, detectando ambos cuartos delanteros y traseros, podría ser una gran mejora al sistema ya que permitiría una mejor identificación de los problemas del equino. Además, este sistema podría ayudar a detectar si la cojera procediese de las patas o del dorso, sirviendo de gran ayuda a los veterinarios.

Por último, una mejora en el diseño y materia les de las carcassas podría permitir un dispositivo más compacto y resistente, más cómodo de manejar y fácil de poner en marcha.

Capítulo 9. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado se ha conseguido alcanzar los objetivos planteados inicialmente de forma parcial. Se ha conseguido desarrollar una solución que responde de manera eficaz a las necesidades de los clínicos a través de dispositivos inerciales y por medio de comunicación inalámbrica, aunque la generación del informe biomecánico ha quedado reducida al almacenamiento de datos vía CSV.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de la propuesta, gracias al DMV desarrollado, aun si bien se han demostrado ciertas limitaciones que podrían ser abordadas en un futuro con más tiempo y medios. Estas limitaciones, lejos de restar valor al proyecto, han dado fruto a una mayor creatividad para la solución de problemas y la capacidad de ver ámbitos de mejora para futuros desarrollos.

Además de lo mencionado, este proyecto ha puesto en relieve la capacidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera (utilizando conceptos de biomecánica, sonorización sistemas lineales y programación entre otros).

En definitiva, este TFG ha supuesto una experiencia que ha permitido consolidar conocimientos, así como la capacidad de ofrecer una contribución, aunque modesta, a la veterinaria, más concretamente a la centrada en los equinos.

```

graph TD
    A[Factores Ambientales y Lesiones] --> B[Dolor y Estrés]
    C[Problemas Endocrinos] --> D[Aumento ACTH]
    D --- E(PPID)
    B --> F[Aumento de Cortisol]
    D --> F
    F --> G[Aumento del Catabolismo de Proteínas]
    F --> H[Aumento de Lipocitos]
    H --- I(Colicos)
    G --> J[Atrofia de las Láminas]
    H --> K[Aumento Resistina y Leptina]
    K --> L[Resistencia a la Insulina]
    L --- M(EMS)
    L --> N[Falta de Glucosa en los Queratinocitos de las Láminas]
    F --> O[Vasodilatación]
    O --- P(Sobrecarga)
    O --> Q[Aumento de Endotelina-1, los Radicales Libres y el Óxido Nítrico]
    Q --> R[Aumento de MMP-28,9]
    F --> S[Hiperglucemia]
    S --> T[Glucosa/Fructosa]
    S --> U[Endotoxinas]
    U --> V[Absorción de Toxinas]
    U --> W[Producción de Citocinas]
    V --> X[Mayor Permeabilidad Intestinal]
    X --- Y(Colicos)
    X --> Z[Hiperisquemia]
    J --> AA[LAMINITIS]
    N --> AA
    Z --> AA
    W --> AA
    R --> AA
  
```

- 52

ANEXO II: TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE GASTO EN EL SECTOR ECUESTRE

Comunidad autónoma	Cría	Transformación	Explotación	Total	Proporción
Andalucía	228.133.174 €	192.962.637 €	1.114.789.146 €	1.535.884.957 €	27%
Aragón	26.980.189 €	17.097.955 €	29.648.648 €	73.726.792 €	1%
Asturias	41.462.737 €	17.097.955 €	100.805.402 €	159.366.094 €	3%
Baleares	17.267.145 €	30.124.969 €	59.297.295 €	106.689.408 €	2%
Canarias	5.346.691 €	21.983.085 €	142.313.508 €	169.643.284 €	3%
Cantabria	27.909.857 €	10.584.448 €	88.945.943 €	127.440.248 €	2%
Castilla-La Mancha	24.696.776 €	22.797.274 €	171.962.156 €	219.456.205 €	4%
Castilla-León	73.163.964 €	39.081.040 €	337.994.582 €	450.239.586 €	8%
Cataluña	39.804.977 €	96.074.224 €	231.259.451 €	367.138.651 €	6%
Extremadura	44.429.082 €	16.283.767 €	207.540.533 €	268.253.381 €	5%
Galicia	45.164.885 €	49.665.489 €	88.945.943 €	183.776.317 €	3%
Madrid	23.365.060 €	6.513.507 €	788.654.024 €	818.532.590 €	14%
Murcia	9.672.289 €	51.293.866 €	112.664.861 €	173.631.015 €	3%
Navarra	32.022.865 €	8.141.883 €	29.648.648 €	69.813.396 €	1%
País Vasco	35.581.818 €	23.611.462 €	47.437.836 €	106.631.116 €	2%
La Rioja	5.377.533 €	31.753.345 €	35.578.377 €	72.709.255 €	1%
Comunidad Valenciana	25.177.030 €	46.408.735 €	717.497.270 €	789.083.036 €	14%

Tabla VIII Tabla Distribución de gasto en los Sectores de la Equitación. Fuente "estudio del impacto del sector ecuestre 2022"

ANEXO III: TABLA DE EVOLUCIÓN DEL SECTOR ECUESTRE

Variables	I Estudio del Impacto del Sector Ecuestre (2013)	II Estudio del Impacto del Sector Ecuestre (2022)
Dimensionamiento		
Censo total de équidos	723.496	722.158
Équidos de razas puras	219.997	369.191
Explotaciones	175.429	188.286
Económicas		
Impacto económico	5.303.647.497 €	7.392.559.213 €
Peso en el PIB (%)	0,51%	0,59%
Económicas del sector		
Fase de cría	542.976.011 €	769.997.744 €
Fase de transformación	462.604.473 €	780.150.956 €
Fase de explotación	1.697.839.652 €	5.110.421.998 €
Actividades transversales	1.997.272.089 €	731.988.516 €

Tabla IX Evolución del Sector Ecuestre Desde 2013 a 2022. Fuente " estudio del impacto del sector ecuestre 2022"

ANEXO IV: CODIGO PLACA ESCLAVA

```
#include <Wire.h>

#include <WiFi.h>

#include <esp_now.h>

#include <MPU6050.h>

#include <MadgwickAHRS.h>

// Dirección MAC del receptor

uint8_t direccionReceptor[] = {0x5C, 0x01, 0x3B, 0x88, 0x69, 0x78};

// Instancias

Madgwick filter;

MPU6050 mpu;

// Estructura con ID y cuaterniones

struct SensorData {

    uint8_t id;

    float qw;

    float qx;

    float qy;

    float qz;

};

SensorData myData;

void setup() {

    Serial.begin(115200);

    Wire.begin();

    // Inicializar MPU6050

    mpu.initialize();

    if (!mpu.testConnection()) {

        Serial.println("MPU6050 no conectado");

        while (true);

    }

}
```

```
// Inicializar WiFi

WiFi.mode(WIFI_STA);

WiFi.disconnect();

if (esp_now_init() != ESP_OK) {

    Serial.println("Error al iniciar ESP-NOW");

    return;

}

// Añadir peer receptor

esp_now_peer_info_t peerInfo = {};

memcpy(peerInfo.peer_addr, direccionReceptor, 6);

peerInfo.channel = 1;

peerInfo.encrypt = false;

if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {

    Serial.println("Error al añadir peer");

    return;

}

// Configuración del filtro Madgwick

filter.begin(4.0f);

// Asignar ID del sensor

myData.id = 1;

}

void loop() {

    // Leer datos del MPU6050

    int16_t ax, ay, az;

    int16_t gx, gy, gz;

    mpu.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
```

```
// Escalar datos

float axf = ax / 16384.0f;

float ayf = ay / 16384.0f;

float azf = az / 16384.0f;

float gxf = gx / 131.0f * DEG_TO_RAD;

float gyf = gy / 131.0f * DEG_TO_RAD;

float gzf = gz / 131.0f * DEG_TO_RAD;


// Actualizar filtro Madgwick, 6 ejes de libertad

filter.updateIMU(gxf, gyf, gzf, axf, ayf, azf);

// Guardar cuaterniones

myData.qw = filter.q0;

myData.qx = filter.q1;

myData.qy = filter.q2;

myData.qz = filter.q3;

// Enviar vía ESP-NOW

esp_err_t result = esp_now_send(direccionReceptor, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));

if (result == ESP_OK) {

    Serial.printf("%d,%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n",

        myData.id, myData.qw, myData.qx, myData.qy, myData.qz);

} else {

    Serial.println("Error al enviar");

}

delay(150); //Emision cada 150ms

}
```

ANEXO V: CODIGO PLACA MAESTRA

```
#include <WiFi.h>

#include <esp_now.h>

// Estructura recibida desde los emisores

struct SensorData {

    uint8_t id;

    float qw;

    float qx;

    float qy;

    float qz;

};

// Variables para cada sensor

SensorData sensor1;

SensorData sensor2;

SensorData sensor3;

// Callback al recibir datos

void onDataReceived(const esp_now_recv_info_t *info, const uint8_t *data, int len) {

    if (len != sizeof(SensorData)) {

        Serial.println("Tamaño de datos inválido");

        return;

    }

    SensorData received;

    memcpy(&received, data, sizeof(SensorData));

    switch (received.id) {

        case 1:

            sensor1 = received;

            Serial.printf("%d,%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n",

                sensor1.id, sensor1.qw, sensor1.qx, sensor1.qy, sensor1.qz);

            break;
```

```
case 2:

    sensor2 = received;

    Serial.printf("%d,%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n",

        sensor2.id, sensor2.qw, sensor2.qx, sensor2.qy, sensor2.qz);

    break;

case 3:

    sensor3 = received;

    Serial.printf("%d,%.3f,%.3f,%.3f,%.3f\n",

        sensor3.id, sensor3.qw, sensor3.qx, sensor3.qy, sensor3.qz);

    break;

default:

    Serial.printf("ID desconocido: %d\n", received.id);

    break;

}

}

void setup() {

    Serial.begin(115200);

    // Iniciar antena WiFi

    WiFi.mode(WIFI_STA);

    WiFi.disconnect();

    // Inicializar ESP-NOW

    if (esp_now_init() != ESP_OK) {

        Serial.println("Error al iniciar ESP-NOW");

        return;

    }

    // Registrar función de recepción

    esp_now_register_rcv_cb(onDataReceived);

}
```

```
void loop() {  
    delay(150); // Tiempo para cada envío por el puerto serie  
}
```

ANEXO VI: CODIGO MATLAB

```
classdef AcelerometroApp_GraficaAngulos < matlab.apps.AppBase
```

```
% Properties that correspond to app components
```

```
properties (Access = public)
```

```
    UIFigure          matlab.ui.Figure
```

```
    NombreEquinoEditField  matlab.ui.control.EditField
```

```
    NombreEquinoEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
```

```
    GuardarenCSVButton     matlab.ui.control.Button
```

```
    ConectarButton        matlab.ui.control.Button
```

```
    UIAxes                matlab.ui.control.UIAxes
```

```
end
```

```
properties (Access = private)
```

```
    lineAng1
```

```
    lineAng2
```

```
    updateCounter = 0;
```

```
    serialObj
```

```
    quat1 = []
```

```
    quat2 = []
```

```
    quat3 = []
```

```
    tiempo = []
```

```
    angulo1 = []
```

```
    angulo2 = []
```

```
    tiempoInicio
```

```
    NombreCaballoField  matlab.ui.control.EditField
```

```
end
```

methods (Access = private)

```
function leerSerial(app, ~, ~)

    try

        linea = readline(app.serialObj);

        %disp("Linea recibida");

        %disp(linea);

        linea = strrep(linea, ' ', '');

        valores = str2double(split(strtrim(linea), ","));

        if numel(valores) == 5 && all(~isnan(valores))

            ID = valores(1);

            qw = valores(2);

            qx = valores(3);

            qy = valores(4);

            qz = valores(5);

            q = [qw, qx, qy, qz];

            switch ID

                case 1

                    app.quat1 = q;

                case 2

                    app.quat2 = q;

                case 3

                    app.quat3 = q;

            end

            if ~isempty(app.quat1) && ~isempty(app.quat2) && ~isempty(app.quat3)
```

```
v1 = app.vectorXdesdeCuaternion(app.quat1);  
v2 = app.vectorXdesdeCuaternion(app.quat2);  
v3 = app.vectorXdesdeCuaternion(app.quat3);  
  
% Normal al plano donde medir flexión (eje Z)  
normalPlano = [0; 0; 1];  
  
% Ángulos de flexión con el plano normalizado  
ang1 = app.anguloFlexion(v1, v2, normalPlano);  
ang2 = app.anguloFlexion(v2, v3, normalPlano);  
  
disp("Angulo 1-2: " + num2str(ang1));%Se muestra por consola  
disp("Angulo 2-3: " + num2str(ang2));  
  
app.tiempo(end+1) = seconds(datetime('now') - app.tiempoInicio);  
app.angulo1(end+1) = ang1;  
app.angulo2(end+1) = ang2;  
  
% Actualizar gráfico cada 5 muestras  
app.updateCounter = app.updateCounter + 1;  
if app.updateCounter >= 5  
    % Limpiar datos NaN o infinitos (por si acaso)  
    validIdx = ~(isnan(app.angulo1) | isnan(app.angulo2) | isinf(app.angulo1) |  
isinf(app.angulo2));  
    app.lineAng1.XData = app.tiempo(validIdx);  
    app.lineAng1.YData = app.angulo1(validIdx);  
    app.lineAng2.XData = app.tiempo(validIdx);  
    app.lineAng2.YData = app.angulo2(validIdx);  
    drawnow limitrate;  
    app.updateCounter = 0;
```

```
        end

    end

else

    disp("Valores inválidos: ");

    disp(valores);

end

catch ME

    disp("Error leyendo datos del puerto serial.");

    disp(getReport(ME));

end

end

function ang = anguloFlexion(~, v1, v2, normalPlano)

    v1 = v1 / norm(v1);
    v2 = v2 / norm(v2);

    cosTheta = dot(v1, v2);

    ang = acosd(min(max(cosTheta, -1), 1)); % Entre 0 y 180

    signo = sign(dot(cross(v1, v2), normalPlano));

    ang = ang * signo; % angulo con signo

end

function v = vectorXdesdeCuaternion(~, q)

    qw = q(1); qx = q(2); qy = q(3); qz = q(4);

    R = [1 - 2*qy^2 - 2*qz^2,    2*qx*qy - 2*qz*qw,    2*qx*qz + 2*qy*qw;
         2*qx*qy + 2*qz*qw, 1 - 2*qx^2 - 2*qz^2,    2*qy*qz - 2*qx*qw;
         2*qx*qz - 2*qy*qw,    2*qy*qz + 2*qx*qw, 1 - 2*qx^2 - 2*qy^2];

    v = R(:,1);
```

end

function v = vectorYdesdeCuaternion(~, q)

qw = q(1); qx = q(2); qy = q(3); qz = q(4);

R = [1 - 2*qy^2 - 2*qz^2, 2*qx*qy - 2*qz*qw, 2*qx*qz + 2*qy*qw;

2*qx*qy + 2*qz*qw, 1 - 2*qx^2 - 2*qz^2, 2*qy*qz - 2*qx*qw;

2*qx*qz - 2*qy*qw, 2*qy*qz + 2*qx*qw, 1 - 2*qx^2 - 2*qy^2];

v = R(:,2);

end

function UIFigureCloseRequest(app, ~)

if ~isempty(app.serialObj) && isvalid(app.serialObj)

configureCallback(app.serialObj, "off"); % Apaga callbacks

delete(app.serialObj); % Cierra y elimina datos

app.serialObj = []; % Limpia

end

delete(app); % Cierra la app

end

end

% Callbacks that handle component events

methods (Access = private)

% Button pushed function: ConectarButton

function ConectarButtonPushed(app, event)

% Button pushed function: ConectarButton

```
try
```

```
% Crear conexión serial
```

```
app.serialObj = serialport("COM6", 115200); % Cambia COM si es necesario
```

```
configureTerminator(app.serialObj, "LF");
```

```
flush(app.serialObj);
```

```
% Reiniciar datos
```

```
app.tiempo = [];
```

```
app.angulo1 = [];
```

```
app.angulo2 = [];
```

```
app.updateCounter = 0;
```

```
% Reiniciar tiempo de inicio
```

```
app.tiempoInicio = datetime('now');
```

```
% Reiniciar y configurar gráficos
```

```
cla(app.UIAxes); % Limpiar ejes
```

```
hold(app.UIAxes, 'on');
```

```
app.lineAng1 = plot(app.UIAxes, NaN, NaN, 'r', 'LineWidth', 2);
```

```
app.lineAng2 = plot(app.UIAxes, NaN, NaN, 'b', 'LineWidth', 2);
```

```
legend(app.UIAxes, 'Ángulo 1-2', 'Ángulo 2-3');
```

```
xlabel(app.UIAxes, 'Tiempo (s)');
```

```
ylabel(app.UIAxes, 'Ángulo (°)');
```

```
title(app.UIAxes, 'Ángulos entre sensores');
```

```
ylim(app.UIAxes, [0 180]);
```

```
hold(app.UIAxes, 'off');
```

```
% Configurar callback para lectura de datos
```

```
configureCallback(app.serialObj, "terminator", @(src, evt) app.leerSerial(src, evt));
```

```
disp("Conectado al puerto serial.");  
  
catch e  
  
    uialert(app UIFigure, "No se pudo abrir el puerto serial.", "Error");  
  
    disp(e.message);  
  
end  
  
end  
  
% Button pushed function: GuardarenCSVButton  
  
function GuardarenCSVButtonPushed(app, event)  
  
% Obtener nombre del caballo desde el campo de texto  
  
nombreCaballo = app.NombreEquinoEditField.Value;  
  
  
  
  
  
  
  
  
% Validar que no esté vacío  
  
if isempty(nombreCaballo)  
  
    uialert(app UIFigure, "Por favor introduce un nombre para el caballo.", "Falta nombre");  
  
    return;  
  
end  
  
  
  
  
  
  
  
  
% Crear carpeta destino si no existe  
  
carpetaDestino = fullfile(pwd, 'datosCSV');  
  
if ~exist(carpetaDestino, 'dir')  
  
    mkdir(carpetaDestino);  
  
end  
  
  
  
  
  
  
  
  
% Crear nombre del archivo con fecha y nombre del caballo  
  
fechaStr = char(datetime('now'), 'yyyy-mm-dd_HH-mm-ss');  
  
nombreArchivo = sprintf('%s_%s.csv', nombreCaballo, fechaStr);  
  
rutaCompleta = fullfile(carpetaDestino, nombreArchivo);  
  
  
  
  
  
  
  
  
% Convertir los datos numéricos a cadenas con coma como separador decimal  
  
tiempoStr = strrep(strrep(string(app.tiempo(:)), '.', ','), 'NaN', "");
```

```
angulo1Str = strrep(strrep(string(app.angulo1(:)), '.', ','), 'NaN', '');
angulo2Str = strrep(strrep(string(app.angulo2(:)), '.', ','), 'NaN', '');

% Crear tabla con los datos
Tstr = table(tiempoStr, angulo1Str, angulo2Str, ...
    'VariableNames', {'Tiempo_s', 'Angulo_1_2', 'Angulo_2_3'});

% Guardar
try
    writetable(Tstr, rutaCompleta, 'Delimiter', ';', 'QuoteStrings', false);
    disp(['Datos guardados en: ', rutaCompleta]);
catch e
    uialert(app.UIFigure, "Error al guardar el archivo CSV.", "Error");
    disp(getReport(e));
    return;
end

% Cerrar la app
UIFigureCloseRequest(app, []);
end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

% Create UIFigure and hide until all components are created
app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
```

```
app.UIFigure.Position = [100 100 640 480];

app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';

% Create UIAxes

app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);

title(app.UIAxes, 'Title')

xlabel(app.UIAxes, 'X')

ylabel(app.UIAxes, 'Y')

zlabel(app.UIAxes, 'Z')

app.UIAxes.Position = [2 135 417 346];

% Create ConectarButton

app.ConectarButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');

app.ConectarButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ConectarButtonPushed, true);

app.ConectarButton.Position = [488 57 100 22];

app.ConectarButton.Text = 'Conectar';

% Create GuardarenCSVButton

app.GuardarenCSVButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');

app.GuardarenCSVButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@GuardarenCSVButtonPushed, true);

app.GuardarenCSVButton.Position = [338 57 103 22];

app.GuardarenCSVButton.Text = 'Guardar en CSV';

% Create NombreEquinoEditFieldLabel

app.NombreEquinoEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);

app.NombreEquinoEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';

app.NombreEquinoEditFieldLabel.Position = [5 57 88 22];

app.NombreEquinoEditFieldLabel.Text = 'Nombre Equino';
```

```
% Create NombreEquinoEditField

app.NombreEquinoEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');

app.NombreEquinoEditField.Position = [108 57 100 22];


% Show the figure after all components are created

app.UIFigure.Visible = 'on';

end

end

% App creation and deletion
methods (Access = public)


% Construct app

function app = AcelerometroApp_GraficaAngulos


% Create UIFigure and components

createComponents(app)


% Register the app with App Designer

registerApp(app, app.UIFigure)


if nargin == 0

    clear app

end

end

% Code that executes before app deletion

function delete(app)
```

```
% Delete UIFigure when app is deleted  
delete(app.UIFigure)  
end  
end  
end
```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «II-ESTUDIO-DEL-IMPACTO-DEL-SECTOR-ECUESTRE-EN-ESPANA_2022.pdf». Accedido: 4 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://yeguadacartuja.com/wp-content/uploads/2024/11/II-ESTUDIO-DEL-IMPACTO-DEL-SECTOR-ECUESTRE-EN-ESPANA_2022.pdf
- [2] S. G. Naughton, «Wearable Devices for Improved Equine Welfare», Virginia Tech, 2023. Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10919/114124>
- [3] «Sensores de frecuencia cardíaca para caballos | Polar España». Accedido: 5 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.polar.com/es/horse-heart-rate-sensors>
- [4] S. Bosch *et al.*, «EquiMoves: A Wireless Networked Inertial Measurement System for Objective Examination of Horse Gait», *Sensors*, vol. 18, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2018, doi: 10.3390/s18030850.
- [5] «Equinosis Q with Lameness Locator® | Total Equine Veterinary Associates». Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.totalequinevets.com/equine-services/menu-services/menu-column-1/equinosis-q-lameness-locator>
- [6] «Piavita Vet System Case Study». Accedido: 2 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.protolabs.com/en-gb/resources/case-studies/piavita/>
- [7] ME, «Biomecánica equina: Los Aires del caballo». Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ampascachi.com/es/blog-de-turismo-ecuestre-y-caballos/todo-sobre-caballos/aires-del-caballo.php>
- [8] E. de E. S. Jorge, «Los aires del caballo | Escuela de Equitación San Jorge». Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://escueladeequitacionsanjorge.com/los-aires-del-caballo/>
- [9] Santiago Audisio, Pablo Vaquero, Perla Torres, Edgardo Verna, Jorge Merlassino, Laura Ocampo, *Biomecánica de la locomoción del caballo*. Santa Rosa, La Pampa: UNLPam, 2013.
- [10] Hilary M. Clayton, Peter F. Flood, Diana S. Rosentein, *Anatomía clínica del caballo*, En español., vol. 1. Elsevier España, S.A.
- [11] N. Connor, «Ácido poliláctico | Fórmula, propiedades y aplicación», Material Properties. Accedido: 13 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://material-properties.org/es/acido-polilactico/>
- [12] Admin, «Plástico PLA: Qué es, propiedades y biodegradabilidad», 3D Town. Accedido: 26 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://3dtownplus.com/blog/material-pla/>
- [13] «Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio», Naylamp Mechatronics - Perú. Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html
- [14] «Dual Battery Shield V8 - eledelito». Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://eledelito.com/producto/dual-battery-shield-v8/>
- [15] «Baterías 18650: pequeñas en tamaño, grandes en rendimiento», Opencircuit. Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://opencircuit.es/blog/18650-batterijen-klein-formaat-groot-prestatie>
- [16] «▷ Especificaciones del módulo ESP32», ▷ Especificaciones del módulo ESP32. Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vasanza.blogspot.com/2021/07/especificaciones-del-modulo-esp32.html>
- [17] J. Wu, «A Basic Guide to I2C», 2022.
- [18] L. Llamas, «Qué es ESP-NOW y cómo usarlo en un ESP32», Luis Llamas. Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/que-es-esp-now-esp32/>

-
- [19] «Los 13 ejemplos de metodologías de proyecto más populares». Accedido: 22 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.doofinder.com/es/blog/metodologia-de-un-proyecto>
- [20] E. Press, «El prestigioso Longines Global Champions Tour llega a la pista verde del Club de Campo Villa de Madrid». Accedido: 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.europapress.es/deportes/noticia-prestigioso-longines-global-champions-tour-llega-pista-verde-club-campo-villa-madrid-20250515193334.html>