

Optimización biomecánica del ciclismo asistida por inteligencia artificial

Ing. Rodrigo Iván Goñi

Carrera de Especialización en Inteligencia Artificial

Director: MSc. Fernando Corteggiano

Jurados:

PhD. David Deyong
Jurado 2 (pertenencia)
Jurado 3 (pertenencia)

Resumen

En la presente memoria se describe el desarrollo de un sistema inteligente y personalizado para la optimización de parámetros biomecánicos de una bicicleta. Este trabajo pretende maximizar la eficiencia del pedaleo y minimizar el riesgo de lesiones, con el fin de democratizar el acceso a una biomecánica de precisión con un bajo costo. Para su implementación fueron esenciales los conocimientos en detección de pose por redes neuronales, análisis cinemático y algoritmos de optimización multiobjetivo.

Agradecimientos

Esta sección es para agradecimientos personales y es totalmente **OPCIONAL**.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Contexto y problemática	1
1.2. Estado del arte	2
1.2.1. El estándar cinematográfico: Captura de movimiento 3D y 4D	2
1.2.2. Cuantificación de la interfaz: Mapeo avanzado de presión	3
1.2.3. El imperativo aerodinámico y la democratización del análisis	4
1.2.4. Síntesis y limitaciones del estado del arte	4
1.3. Motivación y propósito	5
1.4. Objetivos y alcance	5
2. Introducción específica	7
2.1. Estilo y convenciones	7
2.1.1. Uso de mayúscula inicial para los títulos de secciones	7
2.1.2. Este es el título de una subsección	7
2.1.3. Figuras	8
2.1.4. Tablas	9
2.1.5. Ecuaciones	10
3. Diseño e implementación	11
3.1. Análisis del software	11
4. Ensayos y resultados	13
4.1. Pruebas funcionales del hardware	13
5. Conclusiones	15
5.1. Conclusiones generales	15
5.2. Próximos pasos	15

Índice de figuras

1.1. Ilustración de la problemática de un mal ajuste biomecánico.	1
1.2. Ejemplo de un sistema profesional de análisis biomecánico en laboratorio.	2
2.1. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo.	8
2.2. Imagen tomada de la página oficial del procesador ¹	9
2.3. ¿Por qué de pronto aparece esta figura?	9
2.4. Tres gráficos simples.	9

Índice de tablas

2.1. caption corto	10
------------------------------	----

Dedicado a... [OPCIONAL]

Capítulo 1

Introducción general

Este capítulo presenta una introducción general al trabajo. Primero, se expone el contexto y la problemática de la biomecánica en el ciclismo. A continuación, se analiza el estado del arte de las soluciones de ajuste, o *bike fitting*, y sus limitaciones actuales. Se detalla la motivación y el propósito que impulsan el desarrollo de una nueva solución. Finalmente, se definen los objetivos específicos y el alcance del prototipo propuesto.

1.1. Contexto y problemática

La biomecánica en el ciclismo es un factor fundamental para mejorar el rendimiento y prevenir lesiones. Su principio se basa en la adaptación de la bicicleta a las características físicas del ciclista. Un ajuste incorrecto no solo puede causar lesiones, sino también una disminución en la potencia de salida que puede alcanzar hasta un 20 %. En la figura 1.1 se ilustra esta problemática.

Sin embargo, el acceso a un análisis biomecánico profesional presenta barreras significativas. Las soluciones actuales suelen ser costosas, tienen baja disponibilidad y exigen visitas a laboratorios especializados.

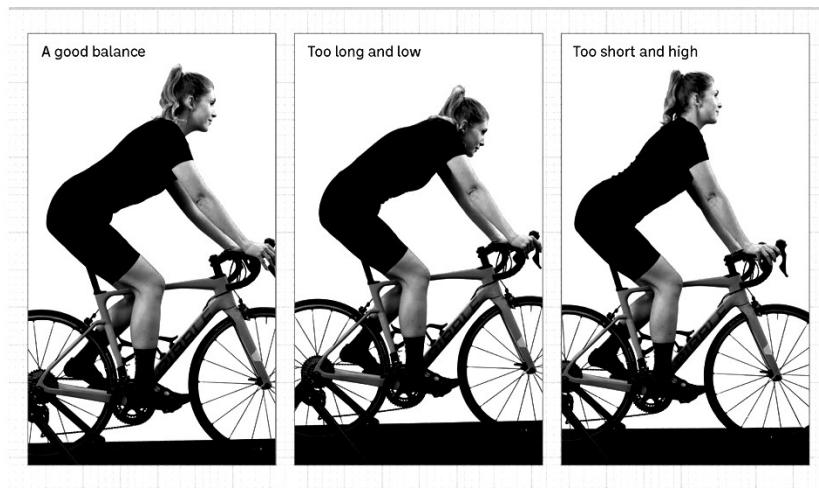


FIGURA 1.1. Ilustración de la problemática de un mal ajuste biomecánico.

1.2. Estado del arte

El *bike fitting*, o ajuste biomecánico de la bicicleta, ha transitado desde un proceso artesanal basado en la goniometría estática y la experiencia subjetiva, hacia una ciencia de datos multimodal y de alta precisión. Las soluciones convencionales, basadas en un análisis estático y puntual, dependen en gran medida de la experiencia del biomecánico. La recomendación de repetir el ajuste anualmente, sumada al alto costo y la escasa disponibilidad, provoca que la mayoría de los ciclistas no mantengan una configuración óptima.

Los sistemas profesionales de laboratorio, como el que se observa en la figura 1.2, ejemplifican este enfoque. El estado del arte actual ya no se define por una única tecnología, sino por la convergencia e integración de múltiples flujos de datos. Este análisis sintetiza el panorama de las soluciones de vanguardia, que se pueden agrupar en cuatro pilares tecnológicos principales que definen la práctica avanzada.



FIGURA 1.2. Ejemplo de un sistema profesional de análisis biomecánico en laboratorio.

1.2.1. El estándar cinemático: Captura de movimiento 3D y 4D

La evolución fundamental en el *bike fitting* ha sido el paso de las mediciones estáticas a las dinámicas [1]. Los métodos tradicionales, que emplean goniómetros manuales o análisis de vídeo en 2D con el ciclista detenido, han demostrado ser insuficientes. Estos métodos no logran capturar la biomecánica real del ciclista bajo carga; es decir, mientras pedalea activamente [2].

El ajuste dinámico tridimensional (3D) se considera el estándar que ofrece las mayores garantías. Sistemas como Retül o Vicon se han establecido como referentes y utilizan múltiples cámaras infrarrojas para rastrear marcadores en puntos anatómicos clave en tiempo real. Esto permite un análisis preciso del movimiento en los tres planos del espacio (sagital, frontal, transversal), lo que proporciona una imagen completa de la cinemática del ciclista que es imposible de obtener con métodos más simples [2].

La superioridad del 3D no es meramente cualitativa; ha sido cuantificada rigurosamente. Un estudio fundamental de Fonda, Sarabon y Li (2013) comparó directamente los métodos cinemáticos. El hallazgo clave fue que, en comparación con el estándar 3D, el análisis 2D subestima de forma estadísticamente significativa el ángulo de la articulación de la rodilla. Esta subestimación sistemática es un error inherente a la proyección de un movimiento tridimensional en un plano bidimensional. El estudio determinó la necesidad de añadir un factor de corrección específico de 2.2° al valor 2D para aproximar el valor real 3D [3]. Esto subraya la imprecisión inherente de los métodos 2D para una verdadera optimización biomecánica.

El estado del arte ha avanzado más allá de la simple dicotomía estático vs. dinámico. El análisis no solo debe ser dinámico, sino también funcional; es decir, realizado bajo cargas de trabajo (potencia) relevantes. Una revisión sistemática de 2019 sobre la biomecánica del ciclismo proporciona una visión crítica: la cinemática del ciclista se ve influenciada significativamente por la carga de trabajo. A medida que aumenta la potencia, los ciclistas exhiben cinemáticas compensatorias para mantener la producción de fuerza. Por lo tanto, un ajuste realizado a baja intensidad puede ser biomecánicamente inválido o subóptimo para las condiciones de competición del ciclista. La revisión establece rangos óptimos para el Ángulo de Flexión de Rodilla (KFA) medido dinámicamente, que se reduce de $33\text{--}43^\circ$ a baja intensidad, a un rango de $30\text{--}40^\circ$ a alta intensidad [4].

1.2.2. Cuantificación de la interfaz: Mapeo avanzado de presión

Si bien la cinemática 3D describe cómo se mueve el cuerpo del ciclista en el espacio, no puede describir cómo el ciclista interactúa con la bicicleta. El mapeo avanzado de presión es la tecnología de vanguardia diseñada para cuantificar la estabilidad y la distribución de la fuerza en los tres puntos de contacto principales: sillín, pies y manillar.

Empresas como Gebiomized lideran este dominio con alfombrillas de sensores flexibles y de alta resolución que proporcionan información previamente inaccesible. La aplicación más crítica es el análisis del sillín. Más allá de la simple comodidad subjetiva, el sistema mide la distribución de la presión (media y máxima) y las asimetrías izquierda/derecha. Sin embargo, la métrica más importante generada es el Centro de Movimiento y el Patrón de Rastreo Pélvico (*Pelvic Tracking*). El sistema mapea cómo se mueve el centro de presión del ciclista sobre el sillín mientras pedalea [5].

Esta tecnología proporciona el vínculo causal crucial entre la cinemática y la estabilidad de la interfaz. A menudo, un movimiento cinemático aberrante de la rodilla (detectado por un sistema 3D) no es un problema de la rodilla en sí. Es un síntoma. La causa raíz suele ser la inestabilidad pélvica. La tecnología de mapeo de presión es la única herramienta que puede diagnosticar y cuantificar objetivamente esta inestabilidad pélvica. De manera similar, esta tecnología se aplica a las plantillas (para analizar la transferencia de potencia y estabilizar el pie como una palanca rígida [6]) y al *cockpit* (para mitigar la fatiga y las neuropatías en las extremidades superiores) [5].

1.2.3. El imperativo aerodinámico y la democratización del análisis

Para el ciclismo de rendimiento, la biomecánica es solo la mitad de la ecuación. Existe un conflicto central: la posición más aerodinámica (típicamente más baja y estrecha) a menudo restringe la biomecánica de la producción de potencia y compromete el confort [6]. El estado del arte busca cuantificar y optimizar este equilibrio.

Históricamente, esto requería costosas pruebas en túneles de viento físicos [7]. La primera evolución fue la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) [8]. Las soluciones más recientes integran CFD con Inteligencia Artificial (IA). Plataformas emergentes como AiRO se describen como el primer sistema de *bike-fit* modelado por CFD e impulsado por IA. El sistema genera un modelo 3D del ciclista y ejecuta un análisis CFD en la nube para calcular la resistencia aerodinámica (CdA) en minutos [9]. Un enfoque alternativo o complementario son los sensores aerodinámicos portátiles en tiempo real, como el Notio Aerometer. Este dispositivo utiliza un tubo de Pitot, GPS y una conexión a un medidor de potencia para calcular el CdA de referencia del ciclista en condiciones del mundo real [10].

Paralelamente a estos sistemas de alta especialización, ha surgido una tendencia de democratización del *bikefitting* mediante aplicaciones de *smartphone*. Plataformas como MyVeloFit [11] y Bike Fast Fit [12] ofrecen análisis biomecánicos por una fracción del costo de un *fit* de laboratorio. Su innovación más significativa (particularmente MyVeloFit) es la integración de evaluaciones de movilidad funcional. El proceso comienza con el usuario que realiza una serie de evaluaciones de movilidad. La IA personaliza la ventana de ajuste objetivo basándose en los resultados de la flexibilidad individual del usuario [11].

Esto, sin embargo, presenta un conflicto académico fundamental. En esencia, estas aplicaciones siguen siendo sistemas de cinemática 2D. Esto las pone en contradicción directa con los hallazgos (como los de Fonda et al. [3]) que establecieron que el 2D subestima sistemáticamente los ángulos clave. La pregunta crítica, que sigue siendo un área clave para la investigación futura, es si los algoritmos de IA pueden compensar adecuadamente los errores inherentes de perspectiva y paralelo de una captura 2D.

1.2.4. Síntesis y limitaciones del estado del arte

El análisis del estado del arte revela una clara trayectoria: una evolución desde la medición de ángulos estáticos hacia la creación de un perfil dinámico y multimodal del sistema ciclista-bicicleta. El ajuste óptimo ya no es un conjunto estático de coordenadas, sino un equilibrio dinámico validado a través de múltiples capas de datos.

El desafío principal en este campo es encontrar el balance óptimo entre la posición que maximiza la velocidad y aquella que minimiza el esfuerzo y el riesgo de lesiones. Frecuentemente, la postura más aerodinámica no es la más sostenible a largo plazo. El papel del profesional ha pasado de ser un técnico a ser un integrador de datos, que debe sopesar métricas a menudo contradictorias.

Las limitaciones de las soluciones de vanguardia (sistemas 3D, mapeo de presión, CFD) son su alto costo y su dependencia de un entorno de laboratorio. Esto define el enfoque de las soluciones tradicionales: un análisis estático y puntual.

Esta aproximación ha impedido una verdadera optimización biomecánica continua para el ciclista, lo cual define la problemática central que motiva el presente trabajo.

1.3. Motivación y propósito

La motivación de este trabajo surge de la necesidad de superar las limitaciones del estado del arte, detalladas en la sección 1.2. El alto costo, la baja disponibilidad y el enfoque estático de las soluciones tradicionales han impedido una verdadera optimización biomecánica continua para el ciclista.

En este contexto, se reconoce que el ajuste debe ser un proceso dinámico. La necesidad de un ajuste frecuente obedece a que la práctica constante del deporte genera adaptaciones fisiológicas en el ciclista. Estas adaptaciones incluyen una mejora en la capacidad de elongación y flexibilidad muscular, lo que modifica los rangos de movimiento óptimos para el pedaleo. Por consiguiente, la configuración ideal de la bicicleta evoluciona con el progreso físico del deportista y exige una reevaluación periódica.

El valor fundamental de la solución propuesta radica en la capacidad de ofrecer al ciclista la realización de ajustes frecuentes y a un costo significativamente menor que las alternativas tradicionales. Esta aproximación permite una mejora continua del rendimiento y una gestión activa de la prevención de lesiones al considerar la evolución de las capacidades físicas del deportista.

El propósito de este trabajo es desarrollar un sistema inteligente y personalizado que enfrente el desafío de la optimización multiobjetivo. El sistema integra la detección de pose mediante redes neuronales y el análisis exhaustivo de datos provenientes de sensores de ciclismo. Se buscó optimizar de forma integral los parámetros biomecánicos de la bicicleta. En esencia, se persiguió maximizar la potencia y eficiencia del pedaleo, minimizar el riesgo de lesiones, y equilibrar estos factores con la aerodinámica para alcanzar la máxima velocidad posible.

1.4. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo fue desarrollar un prototipo de un sistema inteligente que optimice los parámetros biomecánicos de la bicicleta. Se buscó maximizar la potencia y eficiencia del pedaleo, minimizar el riesgo de lesiones y equilibrar estos factores con la aerodinámica.

El alcance del trabajo incluyó:

- El desarrollo de un sistema de optimización personalizado que proporciona recomendaciones para el ajuste biomecánico de la bicicleta.
- Un ciclo continuo de análisis y retroalimentación que incluye la captura de datos (video y sensores), el análisis de movimiento mediante estimación de pose 2D, y un modelo biomecánico.
- Un algoritmo de optimización integral para lograr el equilibrio entre ajuste biomecánico, aerodinámica y prevención de lesiones.
- La generación de un reporte con recomendaciones claras para que el usuario pueda ajustar la bicicleta.

El presente trabajo no incluyó:

- El desarrollo de hardware personalizado para la captura de datos. Se utiliza la integración con sensores comerciales existentes.
- El entrenamiento de la red neuronal de detección de pose desde cero. Se espera utilizar o adaptar redes neuronales preexistentes.
- La simulación de factores externos complejos, como condiciones climáticas extremas.

Capítulo 2

Introducción específica

Todos los capítulos deben comenzar con un breve párrafo introductorio que indique cuál es el contenido que se encontrará al leerlo. La redacción sobre el contenido de la memoria debe hacerse en presente y todo lo referido al proyecto en pasado, siempre de modo impersonal.

2.1. Estilo y convenciones

2.1.1. Uso de mayúscula inicial para los títulos de secciones

Si en el texto se hace alusión a diferentes partes del trabajo referirse a ellas como capítulo, sección o subsección según corresponda. Por ejemplo: “En el capítulo 1 se explica tal cosa”, o “En la sección 2.1 se presenta lo que sea”, o “En la subsección 2.1.2 se discute otra cosa”.

Cuando se quiere poner una lista tabulada, se hace así:

- Este es el primer elemento de la lista.
- Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

Si se desea poner una lista numerada el formato es este:

1. Este es el primer elemento de la lista.
2. Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

2.1.2. Este es el título de una subsección

Se recomienda no utilizar **texto en negritas** en ningún párrafo, ni tampoco **texto subrayado**. En cambio sí se debe utilizar *texto en itálicas* para palabras en un idioma extranjero, al menos la primera vez que aparecen en el texto. En el caso de palabras que estamos inventando se deben utilizar “comillas”, así como también para citas textuales. Por ejemplo, un *digital filter* es una especie de “selector” que permite separar ciertos componentes armónicos en particular.

La escritura debe ser impersonal. Por ejemplo, no utilizar “el diseño del firmware lo hice de acuerdo con tal principio”, sino “el firmware fue diseñado utilizando tal principio”.

El trabajo es algo que al momento de escribir la memoria se supone que ya está concluido, entonces todo lo que se refiera a hacer el trabajo se narra en tiempo pasado, porque es algo que ya ocurrió. Por ejemplo, "se diseñó el firmware empleando la técnica de test driven development".

En cambio, la memoria es algo que está vivo cada vez que el lector la lee. Por eso transcurre siempre en tiempo presente, como por ejemplo:

"En el presente capítulo se da una visión global sobre las distintas pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Se explica el modo en que fueron llevados a cabo los test unitarios y las pruebas del sistema".

Se recomienda no utilizar una sección de glosario sino colocar la descripción de las abreviaturas como parte del mismo cuerpo del texto. Por ejemplo, RTOS (*Real Time Operating System*, Sistema Operativo de Tiempo Real) o en caso de considerarlo apropiado mediante notas a pie de página.

Si se desea indicar alguna página web utilizar el siguiente formato de referencias bibliográficas, dónde las referencias se detallan en la sección de bibliografía de la memoria, utilizando el formato establecido por IEEE en [13]. Por ejemplo, "el presente trabajo se basa en la plataforma EDU-CIAA-NXP [14], la cual...".

2.1.3. Figuras

Al insertar figuras en la memoria se deben considerar determinadas pautas. Para empezar, usar siempre tipografía claramente legible. Luego, tener claro que **es incorrecto** escribir por ejemplo esto: "El diseño elegido es un cuadrado, como se ve en la siguiente figura:"



La forma correcta de utilizar una figura es con referencias cruzadas, por ejemplo: "Se eligió utilizar un cuadrado azul para el logo, como puede observarse en la figura 2.1".



FIGURA 2.1. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo.

El texto de las figuras debe estar siempre en español, excepto que se decida reproducir una figura original tomada de alguna referencia. En ese caso la referencia de la cual se tomó la figura debe ser indicada en el epígrafe de la figura e incluida como una nota al pie, como se ilustra en la figura 2.2.



FIGURA 2.2. Imagen tomada de la página oficial del procesador¹.

La figura y el epígrafe deben conformar una unidad cuyo significado principal pueda ser comprendido por el lector sin necesidad de leer el cuerpo central de la memoria. Para eso es necesario que el epígrafe sea todo lo detallado que corresponda y si en la figura se utilizan abreviaturas entonces aclarar su significado en el epígrafe o en la misma figura.



FIGURA 2.3. ¿Por qué de pronto aparece esta figura?

Nunca colocar una figura en el documento antes de hacer la primera referencia a ella, como se ilustra con la figura 2.3, porque sino el lector no comprenderá por qué de pronto aparece la figura en el documento, lo que distraerá su atención.

Otra posibilidad es utilizar el entorno *subfigure* para incluir más de una figura, como se puede ver en la figura 2.4. Notar que se pueden referenciar también las figuras internas individualmente de esta manera: 2.4a, 2.4b y 2.4c.



(A) Un caption.



(B) Otro.



(C) Y otro más.

FIGURA 2.4. Tres gráficos simples.

El código para generar las imágenes se encuentra disponible para su reutilización en el archivo Chapter2.tex.

2.1.4. Tablas

Para las tablas utilizar el mismo formato que para las figuras, sólo que el epígrafe se debe colocar arriba de la tabla, como se ilustra en la tabla 2.1. Observar que sólo algunas filas van con líneas visibles y notar el uso de las negritas para los encabezados. La referencia se logra utilizando el comando `\ref{<label>}` donde `label` debe estar definida dentro del entorno de la tabla.

¹Imagen tomada de <https://goo.gl/images/i7C70w>

```
\begin{table} [h]
\centering
\caption[caption corto]{caption largo más descriptivo}
\begin{tabular}{l c c}
\toprule
\textbf{Especie} & \textbf{Tamaño} & \textbf{Valor} \\
\midrule
Amphiprion Ocellaris & 10 cm & \$ 6.000 \\
Hepatus Blue Tang & 15 cm & \$ 7.000 \\
Zebrasoma Xanthurus & 12 cm & \$ 6.800 \\
\bottomrule
\hline
\end{tabular}
\label{tab:peces}
\end{table}
```

TABLA 2.1. caption largo más descriptivo.

Especie	Tamaño	Valor
Amphiprion Ocellaris	10 cm	\$ 6.000
Hepatus Blue Tang	15 cm	\$ 7.000
Zebrasoma Xanthurus	12 cm	\$ 6.800

En cada capítulo se debe reiniciar el número de conteo de las figuras y las tablas, por ejemplo, figura 2.1 o tabla 2.1, pero no se debe reiniciar el conteo en cada sección. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

2.1.5. Ecuaciones

Al insertar ecuaciones en la memoria dentro de un entorno *equation*, éstas se numeran en forma automática y se pueden referir al igual que como se hace con las figuras y tablas, por ejemplo ver la ecuación 2.1.

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left(\frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right) \quad (2.1)$$

Para generar la ecuación 2.1 se utilizó el siguiente código:

```
\begin{equation}
\label{eq:metric}
ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right)
\end{equation}
```

Capítulo 3

Diseño e implementación

Todos los capítulos deben comenzar con un breve párrafo introductorio que indique cuál es el contenido que se encontrará al leerlo. La redacción sobre el contenido de la memoria debe hacerse en presente y todo lo referido al proyecto en pasado, siempre de modo impersonal.

3.1. Análisis del software

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Se puede agregar código o pseudocódigo dentro de un entorno lstlisting con el siguiente código:

```
\begin{lstlisting}[caption= "un epígrafe descriptivo"]
    las líneas de código irían aquí...
\end{lstlisting}
```

A modo de ejemplo, se muestra el fragmento de código 3.1:

```

1 #define MAX_SENSOR_NUMBER 3
2 #define MAX_ALARM_NUMBER 6
3 #define MAX_ACTUATOR_NUMBER 6
4
5 uint32_t sensorValue[MAX_SENSOR_NUMBER];
6 FunctionalState alarmControl[MAX_ALARM_NUMBER]; //ENABLE or DISABLE
7 state_t alarmState[MAX_ALARM_NUMBER];           //ON or OFF
8 state_t actuatorState[MAX_ACTUATOR_NUMBER];     //ON or OFF
9
10 void vControl() {
11
12     initGlobalVariables();
13
14     period = 500 ms;
15
16     while(1) {
17
18         ticks = xTaskGetTickCount();
19
20         updateSensors();
21
22         updateAlarms();
23
24         controlActuators();
25
26         vTaskDelayUntil(&ticks, period);
27     }
}
```

²⁸ }

CÓDIGO 3.1. Pseudocódigo del lazo principal de control.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

Todos los capítulos deben comenzar con un breve párrafo introductorio que indique cuál es el contenido que se encontrará al leerlo. La redacción sobre el contenido de la memoria debe hacerse en presente y todo lo referido al proyecto en pasado, siempre de modo impersonal.

4.1. Pruebas funcionales del hardware

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.

Capítulo 5

Conclusiones

Todos los capítulos deben comenzar con un breve párrafo introductorio que indique cuál es el contenido que se encontrará al leerlo. La redacción sobre el contenido de la memoria debe hacerse en presente y todo lo referido al proyecto en pasado, siempre de modo impersonal.

5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

En esta sección no se deben incluir ni tablas ni gráficos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.

Bibliografía

- [1] Rodrigo R Bini, Patria A Hume y Justin L Croft. «Static versus dynamic kinematics in cyclists: A comparison of goniometer, inclinometer and 3D motion capture». En: *PubMed* (2018). Publicado originalmente en *J Sports Med Phys Fitness*. 2018 Sep;58(9):1314-1319. Accedido en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28749711/> (Visitado 06-11-2025).
- [2] David Herrero. *RETÜL Bike fit technology – David Herrero Biomecánica*. <https://www.davidherrero.net/sistemas/retul-bike-fit-technology>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025, según el documento fuente. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [3] Borut Fonda, Nejc Sarabon y Fuxing Li. «Validity and reliability of different kinematics methods used for bike fitting». En: *Journal of Sports Sciences* 32.8 (2014). Accedido en ResearchGate y PubMed. DOI: 10.1080/02640414.2013.861466. El documento fuente cita [121] y [122], págs. 770-777. (Visitado 06-11-2025).
- [4] Stijn Van et al. Driessche. «Cycling Biomechanics Optimization-the (R) Evolution of Bicycle Fitting». En: *PubMed (Am J Sports Med)* (2019). Publicado originalmente en *Am J Sports Med*. 2020 Feb;48(2):503-513. Accedido en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31834181/>. (Visitado 06-11-2025).
- [5] Gebiomized. *gebioMized*. <https://www.gebiomized.us/>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [6] TrainingPeaks. *Bike Fitting, Technology, Biomechanics and the Future with Dr. Andy Pruitt*. <https://www.trainingpeaks.com/coach-blog/bike-fitting-biomechanics-andy-pruitt/>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [7] POC (Global EN). *CFD simulation and testing*. <https://poc.com/en/journal/cfd-simulation-and-testing>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [8] ResearchGate. (PDF) *A COMPUTATIONAL METHODOLOGY FOR RECUMBENT BICYCLE FITTING TO OPTIMIZE AERODYNAMIC EFFICIENCY WHILE ENSURING RIDER COMFORT*. <https://www.researchgate.net/publication/382582463>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [9] Bicycle Retailer. *AiRO Launches World's First AI-Powered, CFD-Modelled Aero Bike Fit Platform*. <https://www.bicycleretailer.com/announcements/2025/08/18/airo-launches-worlds-first-ai-powered-cfd-modelled-aero-bike-fit-platform>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [10] Notio. *Notio - Free the Speed – Notio Argon18 support*. <https://notio.ai/>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [11] MyVeloFit. *Online Bike Fit - MyVeloFit*. <https://www.myvelofit.com/bike-fitting/>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).
- [12] Bike Fast Fit. *Bike Fast Fit - Video Bike Fitting iOS Apps*. <http://bikefastfit.com/>. La fecha de acceso es 6 de noviembre de 2025. 2025. (Visitado 06-11-2025).

- [13] IEEE. *IEEE Citation Reference*. 1.^a ed. IEEE Publications, 2016. URL: <http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> (visitado 26-09-2016).
- [14] Proyecto CIAA. *Computadora Industrial Abierta Argentina*. Visitado el 2016-06-25. 2014. URL: <http://proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=start>.