

Santiago, Chile, 2023.

# DESARROLLO DE PROTOCOLO PARA EL AJUSTE DE LA BIO MECÁNICA EN CICLISTAS

PROYECTO DE PASANTÍA  
DIEGO DEL CAMPO

**Profesor: Mary Fernanda Milla**

**Sponsor: Raimundo Sánchez**

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>CONTEXTO.....</b>	<b>4</b>
<b>DEFINICIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>7</b>
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	8
• ESTABLECIMIENTO DE VARIABLES DE ESTUDIO .....	8
• ESTUDIO DE FORMAS DE MEDICIÓN DEL FTP Y SELECCIÓN .....	8
• DESARROLLO PROTOCOLO .....	8
• PRUEBA Y VALIDACIÓN DE EJECUCIÓN DEL PROTOCOLO.....	8
<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>8</b>
PARÁMETROS SIGNIFICATIVOS.....	10
COMPROBACIÓN EFECTO DE AJUSTE .....	12
MODELOS DE ESTIMACIÓN .....	13
USO EN LA INDUSTRIA.....	13
• RADLABOR .....	14
• RETUL BY SPECIALIZED:.....	14
<b>DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN .....</b>	<b>14</b>
DISCUSIÓN DE LA SOLUCIÓN .....	15
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
MEDIDAS DE DESEMPEÑO (MÉTRICAS/KPI'S) Y DESARROLLO .....	16
1. ESTABLECIMIENTO DE VARIABLES DE ESTUDIO .....	16
2. ESTUDIO DE FORMAS DE MEDICIÓN DEL FTP Y SELECCIÓN .....	17
3. DESARROLLO PROTOCOLO .....	17
PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE EJECUCIÓN .....	18
<b>MATRÍZ DE RIESGOS .....</b>	<b>19</b>
MITIGACIONES .....	20
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA .....</b>	<b>20</b>
<b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>22</b>

## RESUMEN EJECUTIVO

En el ámbito del rendimiento ciclístico, ya sea en carretera, pista o montaña, existen diversas alternativas para configurar de manera óptima la bicicleta según las mediciones biométricas del ciclista. Esta práctica se denomina Bikefitting y reviste suma importancia al buscar el máximo rendimiento y prevenir lesiones en este deporte. El proyecto es una colaboración de investigación entre la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Adolfo Ibáñez y Endurance Tool (ET), una plataforma con más de 10 años de experiencia en la optimización remota del rendimiento de deportistas mediante un software de gestión de entrenamientos.

ET no dispone de las herramientas necesarias para ayudar a sus deportistas a configurar su posición biomecánica en la bicicleta, concluyendo que es un problema que afecta a más del 50% de sus deportistas. Una solución es recurrir a laboratorios de análisis biomecánicos especializados, pero estos no están disponibles en diversas ubicaciones y su servicio es costoso. Por lo tanto, se trabajó en buscar una solución que ayude al ciclista a configurarse de manera sencilla, remota y sin requerir un conocimiento profundo sobre Bikefitting.

Se definió un conjunto de parámetros biomecánicos que incluye la altura del sillín, la posición de las calas (pedales automáticos), el avance/retroceso del sillín y la posición de los mandos en el manillar para ajustar. Esto permite que cada ciclista pueda someterse a un "auto" bikefitting que no sea complejo y no requiera conocimientos mecánicos avanzados. Se redactó un protocolo de 6 días que contempla la comprobación de mejoras en estos ajustes mediante pruebas comparativas de “antes y después”, validadas por el modelado del umbral de potencia funcional (FTP) en caso de contar con potenciómetro, y del esfuerzo realizado por el ciclista, cuantificado mediante las variables de desplazamiento y velocidad en caso de no contar con potenciómetro.

La solución busca permite a los usuarios de ET configurar sus bicicletas de manera correcta según sus propias medidas y obteniendo mejoras del performance evidenciadas en las pruebas realizadas. Se obtuvieron incrementos de hasta 15 vatios de mejora para deportistas sometidos a las pruebas y, en general, todos los ciclistas evaluados en las pruebas piloto obtuvieron una ganancia de vatios en su FTP y señalaron comentarios de mayor comodidad sobre sus bicicletas.

## ABSTRACT

In the field of cycling performance, whether on the road, track, or mountain, there are various alternatives to optimally configure the bicycle based on the cyclist's biometric measurements. This practice is called Bikefitting and is of paramount importance in seeking maximum performance and preventing injuries in this sport. The project is a research collaboration between the Faculty of Engineering and Sciences at the Universidad Adolfo Ibáñez and Endurance Tool (ET), a platform with over 10 years of experience in remotely optimizing athletes' performance through training management software.

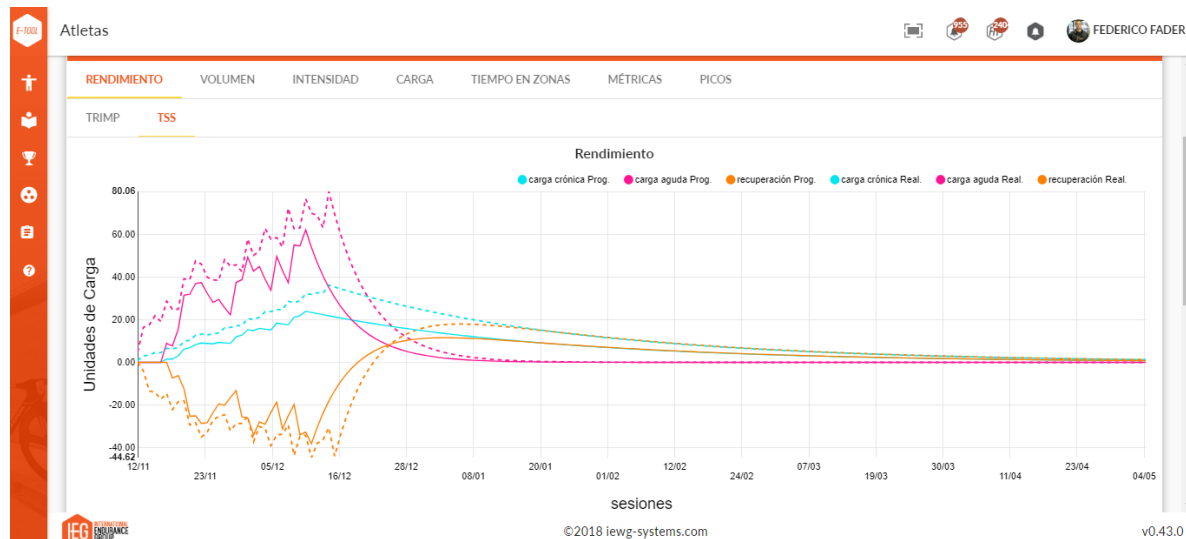
ET lacks the necessary tools to assist its athletes in configuring their biomechanical position on the bicycle, concluding that it is a problem affecting more than 50% of its athletes. One solution is to resort to specialized biomechanical analysis laboratories, but these are not available in various locations, and their services are costly. Therefore, efforts were made to find a solution that helps cyclists configure themselves easily, remotely, and without requiring in-depth knowledge of Bikefitting.

A set of biomechanical parameters was defined, including saddle height, cleat position (automatic pedals), saddle forward/backward adjustment, and handlebar position. This allows each cyclist to undergo a "self" bike fitting that is not complex and does not require advanced mechanical knowledge. A 6-day protocol was drafted, encompassing the verification of improvements in these adjustments through before-and-after comparative tests, validated by modeling the functional power threshold (FTP) in the case of having a power meter, and the effort exerted by the cyclist, quantified by displacement and speed variables in the absence of a power meter.

The solution enables ET users to correctly configure their bicycles based on their own measurements, with performance improvements evidenced in the conducted tests. Increases of up to 15 watts of improvement were obtained for athletes undergoing the tests, and overall, all cyclists evaluated in the pilot tests gained watts in their FTP and reported increased comfort with their bicycles.

## CONTEXTO

Se ha llevado a cabo un trabajo para la empresa Endurance Tool (ET) en el área de "desarrollo de nuevas oportunidades". Una investigación realizada en la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Adolfo Ibáñez. ET posee una experiencia de más de 10 años en el monitoreo y la planificación de entrenamientos para deportes de resistencia, siendo el ciclismo su principal enfoque de monitoreo. Brindan apoyo y seguimiento de manera remota a más de 43,000 usuarios distribuidos en 22 países, quienes acceden a este servicio después de adquirir una membresía. El éxito alcanzado por esta aplicación está estrechamente vinculado a su naturaleza remota, donde son capaces de dar seguimiento a sus atletas, especialmente ciclistas, independientemente de la disciplina específica de ciclismo que practiquen.



*Figura 1: Menú de monitoreo y análisis de carga Endurance Tool.*

*Se visualizan las distintas curvas de carga y de recuperación de entrenamiento de un atleta junto a su proyección futura. La carga se cuantifica en TSS, "training stress score"*

El ciclismo engloba diversas subcategorías, entre las cuales se encuentra el ciclismo de ruta, con competiciones notables como el Tour de Francia, el Giro de Italia y la Vuelta a España. También existe el ciclismo de montaña, que a su vez se divide en categorías internas como Cross Country, Downhill, Enduro y Gravel. En su conjunto, el ciclismo es un deporte de resistencia en el cual el ciclista suele contar con el respaldo de un entrenador. Este profesional se encarga de planificar y supervisar los entrenamientos, así como de gestionar los volúmenes y cargas de trabajo, con el objetivo de maximizar adaptaciones fisiológicas específicas en el cuerpo humano y lograr el mejor rendimiento deportivo posible.

Sin embargo, el entrenamiento planificado no es la única manera de mejorar el performance deportivo. Apoyado desde la eficiencia mecánica, existe también dentro del ciclismo un ajuste ciclista – bicicleta que se denomina “Bike Fitting”. Este se centra en el estudio de la interacción de los movimientos del ciclista sobre su bicicleta, buscando optimizar la postura del deportista, ayudándolo a tener un pedaleo más eficiente en relación a la potencia desarrollada y esfuerzo percibido. Mejora también su índice aerodinámico y busca prevenir posibles lesiones provocadas por la mala ejecución de fuerzas. Se realiza mediante un análisis 2D o 3D, donde el ciclista debe recurrir a un centro especializado y someterse a un estudio que implica también un alto costo. En un contexto mecánico, es un análisis a una “máquina compuesta” la cual buscamos mejorar su rendimiento, volviéndola más eficiente e intentando prevenir fallas, de manera muy similar como dentro de una empresa se gestionan, planifican y programan las mantenciones de un activo para mantener su operación ininterrumpida y extender su vida útil.

El problema en ET surge porque la empresa carece de una herramienta de Bike Fitting capaz de ayudar a sus entrenados a configurar de manera sencilla sus bicicletas con el fin de optimizar su posición, mejorar el rendimiento, aumentar la comodidad y prevenir posibles lesiones. La única opción para un ciclista que ya entrena y, por lo tanto, utiliza los servicios de ET, es recurrir a alguno de estos centros especializados como persona natural, lo que implica incurrir en un gasto adicional a su membresía. Alternativamente, algunos ciclistas no pueden someterse a este análisis debido a que estos centros suelen encontrarse únicamente en grandes ciudades.

Desde ET, comentan que al menos 5 de cada 10 usuarios no tienen una correcta optimización biomecánica, lo cual afecta directamente al deportista en su búsqueda de mejora de rendimiento. Así, al final del día, resulta un inconveniente para ET el hecho de que sus alumnos no puedan someterse a un Bike Fitting. Este problema se explica con el siguiente diagrama de Ishikawa:

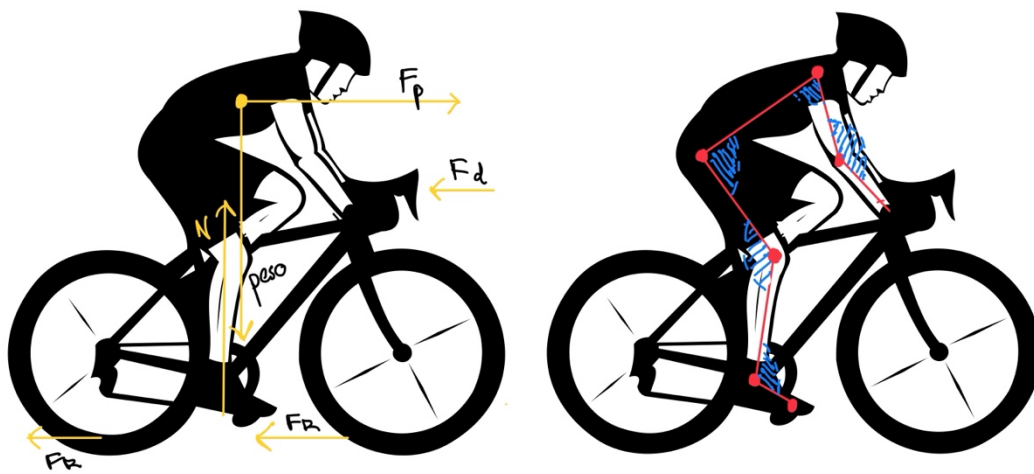


*Figura 2: Diagrama de Ishikawa/Causa – efecto del proyecto.*

*Se observan a la izquierda las causas (y su explicación más detallada) por las cuales un usuario/deportista de ET no se somete a un Bike Fit.*

## 1. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Se define el proyecto en la situación en la que el deportista no mejora su rendimiento a pesar de cumplir con los entrenamientos. En este escenario, surge la duda sobre si su posición es la correcta. Debido a la naturaleza remota de ET, la plataforma no puede "visualizar" al deportista, y este último no tiene conocimientos de principios biomecánicos. ET no puede asegurar que el deportista se encuentra dentro de ciertos parámetros seguros. Por lo tanto, la empresa busca establecer un sistema de optimización biomecánica replicable, sin necesidad de recurrir a análisis de laboratorio con gastos adicionales, y que esté validado mediante protocolos comprobados.



*Figura 3: Ilustración de ciclista desarrollada por Diego del Campo. A la izquierda, con las fuerzas que lo afectan en su desplazamiento. A su derecha, con los ángulos de interés para estudio en este proyecto.*

El enfoque consiste en estudiar esta "máquina compuesta" que ya mencionamos. Si se buscan mejores resultados en el rendimiento deportivo, es necesario realizar un análisis detenido de la postura del deportista sobre su bicicleta, las fuerzas que realiza y cómo las ejecuta. Se debe estudiar si los movimientos de las articulaciones están dentro de rangos seguros y descartar si existen molestias al pedalear. Esto busca definir una serie de pasos que permitan al ciclista ajustarse por sí mismo a su bicicleta. Se ilustran en la figura 3 las fuerzas vectorizadas realizadas por un ciclista al momento de pedalear y, a su derecha, los rangos de ángulo esperados en las articulaciones.

En suma, existe una problemática frente al ajuste biomecánico en los deportistas de ET. Se estima que aproximadamente el 50% de los alumnos de ET se ven afectados por este problema, lo que genera la inquietud a ET de buscar una alternativa de solución. Debido a esto, la empresa consulta soluciones para abordar esta problemática, definiéndose un objetivo SMART. Desarrollar un sistema low-cost de optimización biomecánica fácil de aplicar y replicable, el cual, permita al ciclista acercarse a su ajuste biomecánico óptimo sin la necesidad de recurrir a laboratorios y gastos extras.

## 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ESTABLECIMIENTO DE VARIABLES DE ESTUDIO

Selección de un grupo de variables acotadas, de fácil y precisa medición y que además cuente con su protocolo y/o documentación correspondiente, que avale que se trata de parámetros que inciden directamente en el rendimiento.

- ESTUDIO DE FORMAS DE MEDICIÓN DEL FTP Y SELECCIÓN

Levantamiento de tipos de medición sobre el “umbral de potencia funcional” la cual es la métrica transversalmente utilizada para estudiar la mejora del ciclista. Luego seleccionar el protocolo que se adapte de mejor manera a los requerimientos del proyecto.

- DESARROLLO PROTOCOLO

Planteamiento y redacción de un protocolo de autoajuste de parámetros biomecánicos que hayan sido preestablecidos en objetivo específico anterior.

- PRUEBA Y VALIDACIÓN DE EJECUCIÓN DEL PROTOCOLO

Test real del protocolo redactado, con el objetivo de evidenciar mejoras, estudiar problemáticas y posibles riesgos e idealmente validar su realización.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Para el estudio del estado del arte, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de artículos relacionados a lo que el mundo científico ha estado haciendo para ajustar la posición del ciclista. Se ha estructurado la revisión de estos artículos de manera que, en primer lugar, se revisaron las acotaciones con respecto a los parámetros significativos a tener en cuenta en un ajuste biomecánico. Luego, se levantó información sobre la comprobación del efecto de estos ajustes en el deportista. Posteriormente, se estudió sobre formas y modelos de estimación del performance deportivo, en pruebas de campo estandarizadas. Se buscó consolidar el pilar científico del proyecto desde el enfoque mecánico, en el impacto del performance deportivo, no se busca “reinventa la rueda” sino



apoyarse en estudios que anteriormente ya han sido validados. La eficiencia mecánica tiene directa implicancia en el performance deportivo de un ciclista. Donde la eficiencia, se refiere al esfuerzo físico; el consumo de energía empleado en el trabajo mecánico realizado en una bicicleta. En el ámbito de los ciclistas profesionales, es notable destacar que presentan una eficiencia mecánica cercana al 23%. (Mujica & Padilla 2001; Gómez 2021)

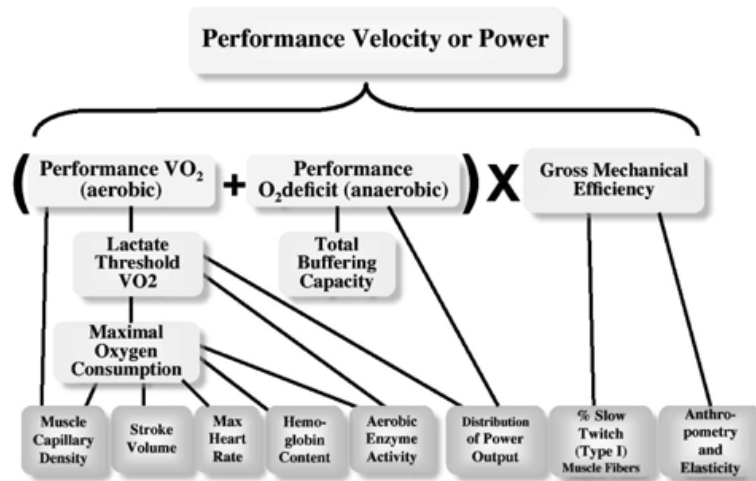


Figura 4: Determinantes del rendimiento (Gómez 2021 extraído de Joyner & Coyle 2008)  
Se aprecia que la eficiencia mecánica gruesa es un factor que incide en la potencia/velocidad.

Siendo la cadencia de pedaleo el elemento más crucial, seguido por la longitud de la biela, el ángulo del tubo del sillín, la altura del sillín y, en último lugar, la posición del pie en relación al pedal (Gutiérrez, 1995). Para un ciclista, la eficacia máxima se logra con una longitud de biela (L1) de 0.140 m, un ángulo de 75.7 grados en el tubo del sillín, y la suma de la altura del sillín (L2) y la longitud del brazo de la biela debe ser equivalente al 97% de la longitud de la pierna, medida hasta el trocánter (Gutiérrez, 1995) (véase la Figura 5 para referencias). Comenzándose a ver la discusión sobre medidas óptimas de algunos parámetros y también de formas de pedaleo que dicen ser más eficientes. Sin embargo, cabe destacar que en este proyecto no se busca "reeducar" la técnica del pedaleo, ya que esa discusión aún sigue muy abierta al día de hoy. Se retomará esta idea más abajo.

Como ya se mencionó, también se ha estudiado la forma de pedalear en conjunto a la configuración biomecánica. Se ha visto que elevar la cadencia a 110 revoluciones por minuto (RPM) tendría un impacto significativo reduciendo el costo energético demandado por el ciclista. (Gonzalez & Hull, 1989) La recomendación de la técnica de pedaleo es una discusión bastante extensa y aun sin resolver, dados los distintos perfiles morfológicos de las personas, con distinta composición de fibras musculares y por lo tanto no pudiendo definir una RPM estandarizada e ideal para todos los ciclistas. Es por lo anterior que se menciona que el proyecto, no busca estudiar las técnicas de pedaleo, sino el estudio de la configuración de medidas y posición del ciclista.

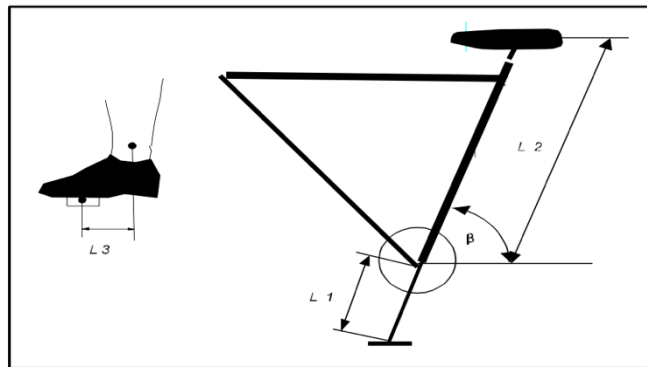


Figura 5: Ilustración de medidas  $L1$  (largo de biela),  $L2$  (altura de sillín) y  $L3$  (posicionamiento de la cala), según el ángulo  $B$  determinado por la geometría de la bicicleta.

### 3.1 PARÁMETROS SIGNIFICATIVOS

El conjunto Biela – pedal (véase Figura 6 para referencia) es el punto donde se aplica directamente la fuerza proveniente del ciclista y es traspasada a la bicicleta. La fuerza sobre la biela se divide en dos componentes: la fuerza tangencial o efectiva, y la fuerza inefectiva, que actúa en dirección radial al giro de la biela. (Coyle 1991; Leirdal & Ettema 2011)

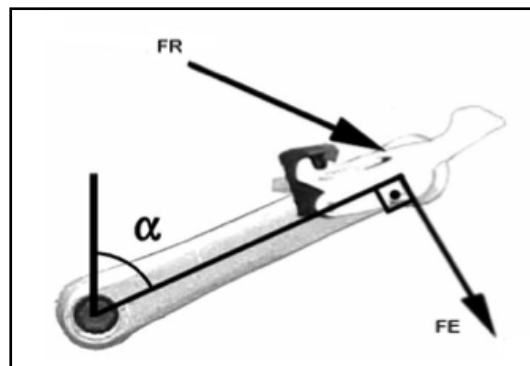


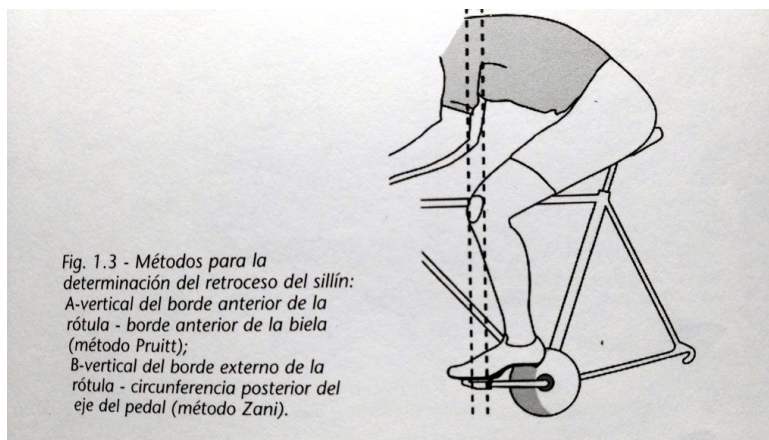
Figura 6: Conversión de Fuerza Resultante dividida en la fuerza Efectiva y la otra componente se descarta ya que no se considera para efectos de cálculos.

Se aconseja posicionar la cala (pedales automáticos, véase Figura 7) de manera que el eje del pedal esté perfectamente alineado con la cabeza del primer metatarso del ciclista. (Vey Mestdagh 1998; Silberman 2005). Se asume un contexto de uso de pedales automáticos, ya que, si bien los alumnos de ET algunos aún son amateur, ya cuentan con cierto grado de equipamiento.



Figura 7: Distintos tipos de pedales automáticos, calas y su posición.

Se sugiere que la longitud de la biela sea equivalente al 20% de la altura de la entrepierna. (J. C. Martin & Spirduso, 2001) En la literatura científica, no se ha esclarecido aún cómo pequeñas variaciones en la longitud de la biela ( $\pm 5$  mm) podrían influir en el gasto energético y la técnica de pedaleo sub-máximo. (Roca, 2019) No existe información concluyente sobre la implicancia directa del largo de biela en el rendimiento. La altura del sillín si es considerada como un ajuste significativo, dado que la eficiencia del pedaleo en la bicicleta está directamente vinculada a este. La altura del sillín se calcula como la longitud perineal multiplicada por 0.885 en centímetros. (Enrique, 2014) Finalmente, el avance/retroceso del sillín (véase Figura 8) tenemos que, cuando ambas bielas están alineadas de manera paralela al plano del suelo, se ajusta la posición del sillín moviéndolo hacia delante o hacia atrás, de modo que una línea vertical que pase por el eje del pedal delantero coincida con la parte anterior de la rótula (Castellote, 1986).



*Figura 8: Configuración avance/retroceso del sillín. Se puede apreciar cómo se traza una vertical desde el primer metatarso del ciclista hasta la punta de la rótula y luego una línea paralela un poco más retrasada, siendo las 2 opciones válidas para calibrar.*

### 3.2 COMPROBACIÓN EFECTO DE AJUSTE

El Umbral Funcional de Potencia (FTP) se ha convertido en la medida de referencia para la planificación y supervisión de la intensidad en el ciclismo. Su importancia se ha visto respaldada por observaciones anecdóticas que han señalado relaciones con el umbral de lactato (LT), considerado como el indicador fisiológico con mayor respaldo científico para establecer el umbral en deportes de resistencia (Jenaro, 2019).

Los entrenadores de ciclismo, suelen emplear la prueba de capacidad aeróbica para determinar las zonas de entrenamiento en base al Umbral de Potencia Funcional (FTP) o en base al umbral de lactato, que es otro marcador fisiológico del esfuerzo producido. Esta evaluación se define como la máxima producción de potencia que un ciclista puede mantener en un estado estable muy cercano al umbral de lactato (Sitko, 2022). Cuando hablamos de máxima producción de potencia, volvemos a la referencia de la figura 1, en donde vemos acuñado el término "Performance velocity of power". Concluyendo entonces que, si el FTP se define como la 'máxima producción de potencia mantenida en un estado estable', se espera que mejorar esa tasa de producción mejore el rendimiento. Por lo tanto, los ajustes biomecánicos trabajan 'a favor' del rendimiento del ciclista.

### 3.3 MODELOS DE ESTIMACIÓN

La determinación del FTP ha sido estudiada tanto en pruebas de laboratorio como en valoraciones de campo, con el fin de estimar este 'umbral de potencia funcional', que, como ya se mencionó, es la máxima potencia mantenida en estado estable en un rango de tiempo. Para su cálculo, es necesario el potenciómetro, un sensor de alto costo y precisa medición del trabajo realizado por el deportista, medido en vatios (watts).

Es posible determinar el FTP a partir de un modelado de la curva de potencia crítica del deportista, que, en términos matemáticos, se caracteriza como la potencia-asíntota en la relación hiperbólica entre la producción de potencia y la duración hasta llegar al agotamiento. Esto puede ser identificado como el umbral de VO<sub>2</sub> crítico o umbral de lactato (Lipková, 2022). La Figura 9 se muestra.

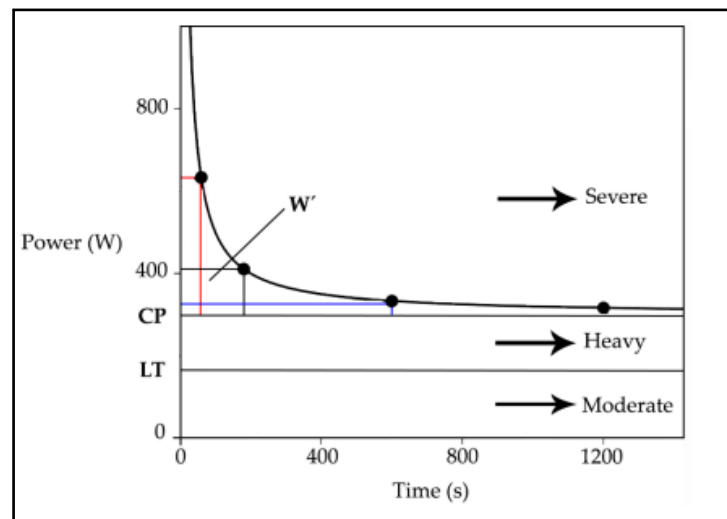


Figura 9: Curva hiperbólica de la producción de la potencia en el tiempo hasta el agotamiento. Siendo la CP la potencia en donde se encuentra la recta asíntota a la curva.

Se discutió sobre la estimación del FTP a partir de otras mediciones estandarizadas que estudian el trabajo realizado por el ciclista. El margen de precisión del cálculo disminuye en comparación con una prueba de campo en la que se utilizan sensores específicos. Sin embargo, el concepto de 'ritmo' empieza a tener un rol protagónico. En el caso de que un participante opte por un ritmo que genera una potencia, al principio o al final, superior al promedio de la sesión de ejercicio, la predicción exacta del trabajo realizado y el tiempo hasta la falla aún se mantiene. De hecho, siempre que la Potencia Crítica (CP) se mantenga constante, no hay diferencias en el trabajo total realizado por encima de la CP durante el ejercicio de alta intensidad (Burnley & Jones, 2016).

### 3.4 USO EN LA INDUSTRIA

Se encuentran empresas que abordan la misma problemática de la configuración biomecánica. Son soluciones de empresas establecidas, casos de éxito que, sin embargo, no convergen con la idea de autoanálisis, de carácter remoto y de fácil acceso, además del factor económico de por medio.

- RADLABOR

Laboratorio de estudio Biomecánico ubicado en Múnich, Alemania. Enfocado al estudio de postura y técnica de pedaleo del ciclista mediante un análisis 3D.

- RETUL BY SPECIALIZED:

Empresa que busca integrar las mediciones a la fabricación de los productos, cosa de que ya exista un 'pre ajuste' más certero al deportista, complementándolo con un análisis biomecánico personalizado para una mejor experiencia del usuario. Véase Figura 10.



*Figura 10: Ejemplo de análisis biomecánico RETUL. Podemos observar el análisis biomecánico personalizado.*

## 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

Luego de toda la etapa investigativa y la revisión del estado del arte existente, junto con lo que hoy por hoy se encuentra en la industria y, siempre en línea con el objetivo SMART de este proyecto, se presentan tres propuestas de solución. Dos de ellas, en principio, difieren en una característica en particular; sin embargo, esto impacta en todo su cálculo de resultados. Por último, se presenta una propuesta de mayor desarrollo y de implementación más compleja, la cual se descarta debido a su demanda de recursos y tiempos para poder ejecutarla.

## 1. DESARROLLO DE UN PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN BIOMECÁNICA VALIDADA MEDIANTE CUANTIFICACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO.

Directrices destinadas a la mejora biomecánica de ciclistas, con énfasis en el estudio de fuerzas y movimientos del cuerpo humano. Se utilizarían en este caso con los potenciómetros para cuantificar el trabajo generado y estudiar mejoras.

## 2. DESARROLLO DE UN PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN BIOMECÁNICA VALIDADA MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE ESTIMACIÓN DEL FTP.

Muy similar a la primera propuesta, en este caso se sustentaría mediante la utilización de un modelo matemático para estimar el FTP, basándose en una solución lo más low-cost posible.

## 3. DESARROLLO DE APP TECNOLÓGICA INTEGRADA A UNA API CON LOS DATOS DE LAS GEOMETRIAS DE LAS BICICLETAS DEL MERCADO PARA REALIZAR BIKEFIT.

Conexión a una API que buscaría tener acceso a las geometrías de las bicicletas, incluyendo datos sobre el tamaño del cuadro, la altura del tubo del asiento, la longitud de la potencia, los ángulos de la horquilla, entre otros.

### 4.1 DISCUSIÓN DE LA SOLUCIÓN

La selección más adecuada, es la solución número 2, ya que cumple de manera más completa con las directrices fijadas en el *objetivo Smart*. Propone el desarrollo de un protocolo de calibración biomecánica, al igual que en la solución número 1. La diferencia radica en que propone una comprobación de la mejora validada mediante un modelo matemático que calcula la mejora del performance. Eliminando la necesidad exclusiva del uso de potenciómetros, elemento que sigue aun siendo de alto costo y no conversa con la idea de solución *low – cost*.

## 5. METODOLOGÍA

Este informe utiliza términos de conocimiento específico en el contexto del ciclismo. Habiéndose definidos ya algunos y el resto se irán desarrollando a medida que son mencionados. Dada la propuesta número 2, se procedió a desarrollar el plan de implementación, guiándose siempre mediante el cumplimiento de las métricas definidas.

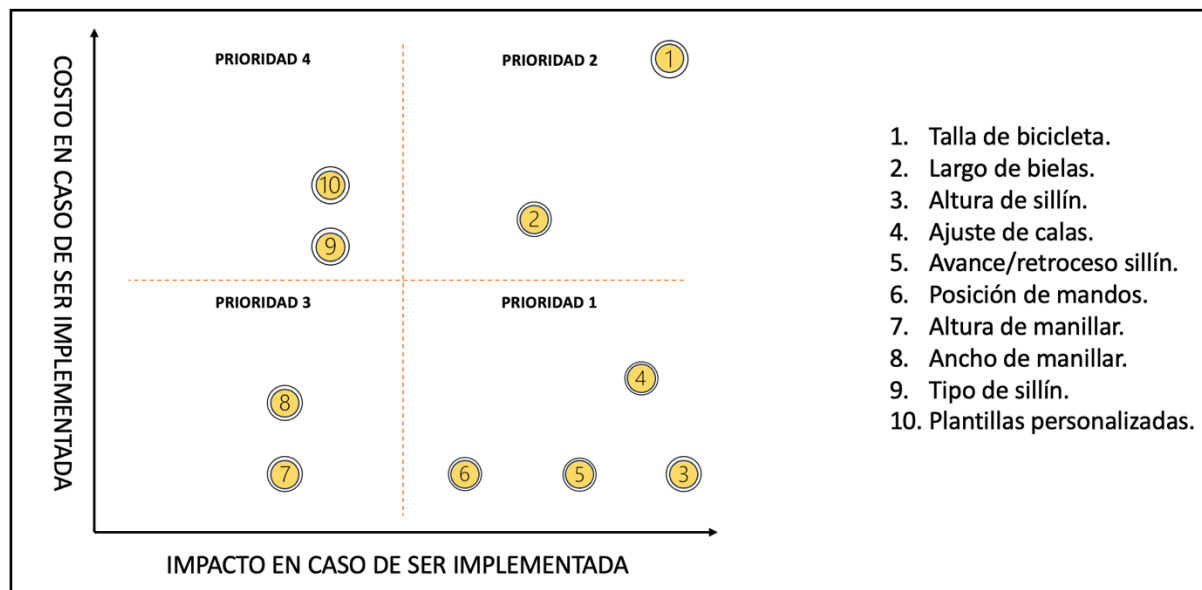
## 5.1 MEDIDAS DE DESEMPEÑO (MÉTRICAS/KPI'S) Y DESARROLLO

### 5.1.1 ESTABLECIMIENTO DE VARIABLES DE ESTUDIO

*“Establecer como mínimo 3 parámetros de medición para la creación de nuestro protocolo de optimización biomecánica, auto-bikefit”.*

Se encontraron parámetros asociados a la optimización biomecánica, que cumplen con el requisito de contar con sustento científico. Se encuentran entonces que las medidas como, el largo de la biela, la posición de las calas en los pedales automáticos, la altura del asiento y por último, el avance y/o retroceso del sillín, son parámetros de estudio clave en lo que respecta a un auto-bikefit.

De todas formas, se hizo una revisión más extensa, encontrando parámetros que se podrían someter a calibración. Otros parámetros como la posición de los mandos sobre el manillar y la altura de éste mismo (factor aerodinámico) como también el tipo de sillín y por último, la aplicación de plantillas personalizadas.



*Figura 11: Tabla comparativa de requerimientos para establecer prioridades de implementación, a la derecha se listan por número los parámetros y a su izquierda son distribuidos según su impacto/costo. Construida por Diego del Campo A.*

Como se puede observar en la figura 11, se construyó una tabla comparativa con el objetivo de contrastar el impacto en el performance del parámetro y su costo de ajuste, así poder visualizar de mejor manera cuales son los parámetros ‘ideales’ a tener en cuenta en el protocolo. Vale mencionar, que la calificación que obtiene en ‘Talla de bicicleta’ es debido a que se asume como, estándar mínimo, que el deportista cuente con una talla correcta de



bicicleta, en caso de lo contrario, tendrá que cambiarla y eso obtiene el máximo costo. Por último, se zanja la discusión en incluir en el protocolo los 4 parámetros que obtienen 'prioridad 1'.

### 5.1.2 ESTUDIO DE FORMAS DE MEDICIÓN DEL FTP Y SELECCIÓN

*“Anotar como mínimo 3 protocolos de medición/estimación de FTP y sus justificaciones. Luego definir cuál será el protocolo óptimo para utilizar en nuestro estudio”.*

Ya se mencionó que el FTP es la máxima producción de potencia, en estado estable, hasta el agotamiento, “*Functional threshold power*”. Existen variadas formas de determinar aquel número que, como ya se mencionó anteriormente, va en vatios como unidad de medida. En el caso de que el ciclista contase con un potenciómetro, encontramos los protocolos de P20 y P8 como pruebas de esfuerzos máximos de 20 y 8 minutos respectivamente. Al finalizar la prueba, se obtiene la potencia media producida por el ciclista, a la que se le aplica un factor multiplicativo de 0,95 y 0,9 respectivamente. También existen los modelamientos de la curva de potencia crítica (véase Figura 12), en donde hoy se encuentran diversos softwares que realizan el modelado de manera automática y obtienen el resultado que según el estado del arte revisado, es un valor similar al VO2 crítico, lo que vendría siendo el esfuerzo máximo sostenible por el atleta en un tiempo determinado y se asocia directamente al nivel deportivo del atleta.



Figura 12: Tabla extraída del software de modelado de potencia crítica WKO4, en donde se observa la curva de potencia crítica de los últimos 90 días de un deportista y a su derecha, los valores modelados por el software, se destaca en recuadro rojo el mFTP, como el valor estimado de interés del proyecto.

El protocolo consistirá en 2 pruebas de esfuerzo las cuales serán comparadas. Entre medio de cada una, serán realizados los ajustes biomecánicos.

Con escenarios lo más similares posibles, se dictan instrucciones. Posteriormente se indican los ajustes biomecánicos.

#### *Protocolo 6 días calibración biomecánica*

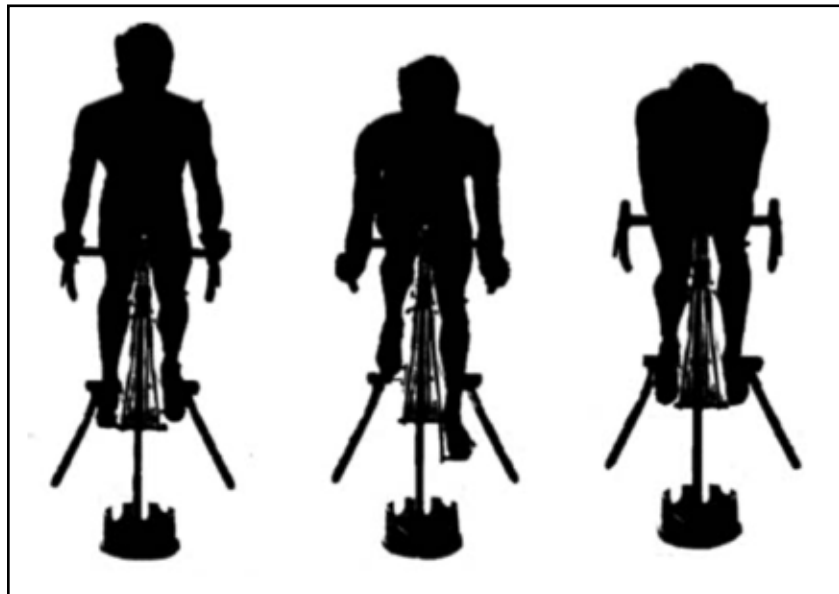
- Día 1: Descanso total por parte del ciclista, preparación del material para la prueba de esfuerzo. Se debe contar con, un ciclo computador, para registrar los datos obtenidos del potenciómetro o en su defecto medir la distancia recorrida y velocidad.
- Día 2: (Prueba 1) Esfuerzo máximo en 8 minutos en campo. Debe realizarse en calle y en subida que se asegure el desplazamiento en pendiente positiva en un transcurso de 8 minutos a esfuerzo máximo.
- Día 3: Cuantificación de medidas del deportista y según se indica se realizan ajustes en la bicicleta sobre los parámetros mencionados.
- Día 4: Descanso total por parte del ciclista y preparación del material para la prueba de esfuerzo.
- Día 5: Prueba de esfuerzo máximo de 8 minutos realizada en campo. Debe realizarse en calle y en la misma subida de la Prueba 1, que se asegure el desplazamiento en pendiente positiva en un transcurso de 8 minutos a esfuerzo máximo.
- Día 6: Recopilación de datos y cuantificación de mejoras.

## 5.2 PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE EJECUCIÓN

Se sometieron a pruebas piloto 3 ciclistas de distintos grupos etarios, 24 años para el sujeto 1, 43 años para el sujeto 2 y 55 años para el 3. Los ajustes fueron realizados en el plazo de 1 día, siguiendo la línea de un protocolo de fácil implementación y replicable. Mediante el apoyo de la literatura revisada en el estado del arte, se validan los mecanismos de ajustes de cada parámetro, definiéndose así los siguientes ajustes:

- Ajuste de altura de sillín: Implica, multiplicar la longitud perineal por 0.885, utilizando centímetros como la unidad de medida, según lo indicado por Enrique en 2014.
- Ajuste de calas: Colocar la cala, (consulte la figura 7) de tal manera que el eje del pedal esté en perfecta alineación con la cabeza del primer metatarso del ciclista, según las recomendaciones de Vey Mestdagh en 1998 y Silberman en 2005.

- Ajuste del avance/retroceso del sillín: Cuando las bielas están alineadas paralelas al suelo, se requiere ajustar la posición trazando una línea vertical que atraviese el eje del pedal delantero con la parte anterior de la rótula, según Castellote en 1986.
- Ajuste de posición de mandos en manillar: Se precisa reducir al máximo el área frontal del ciclista (véase Figura 13) sin comprometer otros parámetros y comodidad, impactando en la reducción de las fuerzas de arrastre que constituyen entre el 80% al 90% del total de las fuerzas resistivas, variando el tipo de bicicleta, señalado por García-López, Ogueta-Alday, Larrazabal, et al., en 2014.



*Figura 13: Superficie frontal proyectada en las posiciones de agarre alto para bicicleta de carretera (izquierda, 0.489 m<sup>2</sup>) y agarre bajo (centro, 0.420 m<sup>2</sup>), así como en la posición de contrarreloj (derecha, 0.327 m<sup>2</sup>)*

El protocolo de análisis de resultados y modelamiento del impacto, fue trabajado por parte de ET, quienes comentaron que trabajan hace varios años con método muy similar a los estudiados, determinando zonas de entrenamiento funcional en ciclistas, a partir de potencia, o bien, desde otras métricas, como lo son la velocidad y desplazamiento.

## 6. MATRÍZ DE RIESGOS

Se adjunta la matriz de riesgo del proyecto en anexos, más abajo se ven los riesgos y sus correspondientes mitigaciones desarrolladas según corresponde.

## 6.1 RIESGOS

1. Limitada precisión del sistema low-cost.
2. Dificultades en la replicabilidad del sistema.
3. Resistencia por parte de los ciclistas a adoptar un nuevo sistema.
4. Falta de recursos para el desarrollo del sistema por parte de ET.
5. Posibles problemas de usabilidad del sistema.
6. Desafíos en la difusión y comercialización del sistema.

## 6.2 MITIGACIONES

1. Validar y calibrar regularmente el sistema utilizando referencias precisas y proporcionando retroalimentación continua a los usuarios para mejorar la precisión.
2. Establecer un protocolo de uso detallado, que garantice la aplicación consistente, realizando pruebas piloto para evaluar la replicabilidad.
3. Proporcionar demostraciones y materiales informativos, destacando la simplicidad y beneficios del sistema.
4. Buscar financiamiento a través de subvenciones, colaboraciones o crowdfunding. Establecer un plan de desarrollo incremental para optimizar los recursos.
5. Realizar pruebas de usabilidad con 'usuarios beta' para identificar y abordar posibles problemas.
6. Desarrollar una estrategia de marketing efectiva. Colaborar con expertos en ciclismo y influenciadores para respaldar y promover el sistema.

## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se indicó que, el tiempo de implementación del protocolo al software de ET, es de un mes completo por parte de sus desarrolladores, en específico, 45 horas de trabajo semanales a un valor de \$13.700/hora por 4 semanas. Un producto que, no tendría más costo de producción que su inversión inicial y un costo de mantenimiento mínimo, agregado al trabajo de planta de los desarrolladores. Luego de un estudio de mercado, se fija un valor de \$15.000, obtenido a partir de que, el costo de un análisis de ajuste convencional, alcanza los \$90.000 y ajusta hasta 24 parámetros biomecánicos, mientras que el desarrollado en el proyecto busca ajustar 4, aproximando un costo de ajuste por parámetro de \$3.750

La evaluación económica considera una proyección de ventas de 1.125 unidades en el primer periodo y se establece una tasa de descuento del 13% con una inversión inicial de \$2.466.000. A

pesar de la inversión inicial, los ingresos proyectados resultan en un Valor Actual Neto (VAN) positivo, calculándose en aproximadamente \$12.467.628.

Estos resultados indican que el proyecto podría tener una rentabilidad significativa, sugiriendo que la inversión inicial puede recuperarse de manera sólida en el primer periodo. Se precisa que la proyección de 1.125 ventas para el primer periodo viene de la estadística dada por ET sobre un problema que afecta al menos al 50% de sus 45.000 usuarios, esperando una aceptación inicial del protocolo del 0,5% de ese valor.

## 8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se obtuvieron positivos resultados en las pruebas piloto realizadas, en donde, en general, todos los ciclistas de prueba vieron un aumento en su FTP y comentaron mejor comodidad sobre la bicicleta y mejor percepción en la forma de ejecutar la fuerza a los pedales. Validadas, todas, mediante el uso de potenciómetros en esta instancia con el objetivo de darles el mayor sustento y veracidad posible, contrastándose además con un análisis biomecánico estándar 2D para tener como referencia el margen de diferencia de resultados. Se adjuntan en anexos tablas comparativas de los resultados obtenidos, imágenes del análisis 2D realizado y por último, comentarios citados por los ciclistas evaluados.

Por último, se destaca que se habla de un proyecto con vías de desarrollo en el tiempo, a medida que la tecnología avanza, donde los sensores mejoran y la oferta de precios se amplía, creándose más acceso a variables para analizar y así obtener resultados más precisos. Mientras tanto, el 'protocolo de ajuste biomecánico para ciclistas' se muestra como una buena opción para los deportistas amateur, que no puedan acceder a laboratorios de análisis y para quienes no estén dispuestos a incurrir en gastos significativos.

Se considera para la discusión final, resaltar el hecho de que, para ET, la implementación de este protocolo no considera la comercialización de un nuevo producto, sino que aportarle a sus deportistas un nuevo valor agregado dentro de su plataforma. Por otra parte, si se evidencia la alternativa de implementación como un producto que puede convertirse en una nueva forma de ingreso a ET sin la necesidad de ser consumido por alumnos de membresía.

## 9. REFERENCIAS

- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance Exercise Performance: the Physiology of champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35-44. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.143834>
- Gutierrez, M. (1995b). *Biomecánica y ciclismo*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2278324>
- Roca, B. F. (2019). *Comparación de diferentes métodos de ajuste de la bicicleta en ciclistas entrenados: influencia de factores biomecánicos y energéticos* <https://doi.org/10.18002/10612/5926>
- Enrique, C. H. J. (2014). «*Biomecánica en el ciclismo y rendimiento deportivo en el Distrito de Ayacucho - 2014*». <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3884>
- Castellote, J. M. (1986). *Biomecánica de la extremidad inferior en el ciclista*. <http://www.femede.es>.
- Jenaro, L. H. (2019). *Correlacion entre el umbral funcional de potencia (FTP) y el umbral de lactato En los ciclistas del equipo “Boyacá es para vivirla”*. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/8638>
- De Investigación Unab, S. (2019, 1 noviembre). *Efecto de una ortesis tipo cuña en ciclistas durante una pedaleada en el ciclismo*. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/22381>
- Burnley, M., & Jones, A. M. (2016). Power–duration relationship: physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*, 18(1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>
- Lipková, L., Kumstát, M., & Struhár, I. (2022). Determination of critical power using different possible approaches among endurance athletes: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7589. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137589>

## 10. ANEXOS

### 10.1 MATRIZ DE RIESGOS

	1 Negligible	2 Minor	3 Moderate	4 Major	5 Catastrophic
5 Very likely	5	10	15	20	25
4 Probable	4	8	12	16	20
3 Possible	3	6	9	12	15
2 Not likely	2	4	6	8	10
1 Very unlikely	1	2	3	4	5

### 10.2 TABLAS DE RESULTADOS

Se anexan tablas de datos comparativos PRE AJUSTE y POST AJUSTE mostrando valores de los vatios obtenidos de potenciómetros, dando su valor neto y llevado al vatio/kilo de cada ciclista.

Sujeto 1.

Time	PRE AJUSTE		POST AJUSTE	
	w	w/kg	w	w/kg
5s	1086	16.45	1300	20.31
60s	417	6.32	680	10.46
5m	338	5.12	415	6.29
20m	293	4.44	340	5.23

Sujeto 2.

Time	PRE AJUSTE		POST AJUSTE	
	w	w/kg	w	w/kg
5s	908	12.97	1077	15.39
60s	394	5.63	488	6.97
5m	265	3.79	397	5.67
20m	236	3.37	337	4.81

Sujeto 3.

Time	PRE AJUSTE		POST AJUSTE	
	w	w/kg	w	w/kg
5s	791	9.42	791	9.42
60s	441	5.25	441	5.25
5m	286	3.53	286	3.53
20m	236	2.81	236	2.81

### 10.3 COMENTARIOS

“Percibí mejor comodidad al repetir la prueba de esfuerzo, si bien no tuve aumento de la potencia, mi percepción propia del esfuerzo fue bastante más llevadera” Ignacio del Campo Tagle.

“La verdad que, en cuanto a comodidad, mentiría si digo que me sentí más cómodo que antes, pero los números no mienten y la mejora es significativa” Marcelo Arzola.

“Los ajustes son increíblemente simples, ver mejoras en los números fue casi increíble” Manuel José Lira.

### 10.4 ANALISIS 2D

