

Universidad Miguel Hernández

Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte



Trabajo de fin de grado

Análisis de la eficiencia mecánica en Ciclismo

Curso académico 2021-2022

Alumno: Tobias Händler

Tutor académico: Manuel Mateo March

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1.- Contextualización:..... | 3 |
| 2.- Procedimiento de revisión: | 4 |
| 2.1.- Búsqueda en la literatura:..... | 4 |
| 2.2.- Criterios de elegibilidad: | 5 |
| 2.3.- Criterios de exclusión:..... | 5 |
| 2.4.- Selección de estudios:..... | 5 |
| 2.5.- Resultados:..... | 5 |
| 3.- Revisión bibliográfica: | 7 |
| 4.- Discusión: | 9 |
| 5.- Propuesta de intervención:..... | 11 |
| 6.- Bibliografía: | 13 |



1.- Contextualización:

El ciclismo es un deporte en continua evolución. El ciclismo es un deporte de resistencia como vemos en el estudio de (Faria et al., 2005) depende de muchos factores: fisiológicos, aerodinámicos, biomecánicos... y también factor de carácter mecánico que pueden condicionar el rendimiento final del ciclista sobre la bicicleta. Al ser tantas las variables que pueden afectar sobre el rendimiento deportivo de los ciclistas, con objeto de diferenciar y poder inferir el mayor o menor potencial de cada una de ellas es importante poder hacer un análisis global de todas ellas.

A nivel fisiológico factores como la masa del ciclista tiene una gran importancia en diferentes situaciones donde la gravedad puede jugar un factor fundamental sobre el rendimiento. La bicicleta, por normativa, no puede tener una masa superior a 6,8Kg, por lo que no hay posibilidad de mejora en esta variable.. Algunos de los parámetros de rendimiento en el ciclismo más determinantes son la potencia crítica (CP), el umbral de potencia funcional (FTP), como vemos en el estudio de (Chorley & Lamb, 2020) la potencia aeróbica máxima (Lanferdini et al., 2015) o la máxima producción de potencia en diferentes intervalos de tiempo (MMP). Estos parámetros se relacionan con el peso del ciclista para así calcular los vatios relativos, con lo que podemos determinar el nivel de rendimiento de dicho deportista.

En el estudio de (Phillips & Hopkins, 2020) se habla de la importancia de la interacción de cuatro dimensiones para el rendimiento, empezando con las características individuales del ciclista en el que nos habla de las ventajas y desventajas de la morfología del ciclista, su importancia para determinar la especialidad deportiva, es decir, velocista o fondista. Las tres otras dimensiones son los rasgos tácticos que emergen de la relación interpersonal de los ciclistas, estrategias relacionadas con el formato y entorno de la competición, y las características globales relacionados con la sociedad.

Desde otro punto de vista, los factores aerodinámicos también juegan un papel muy importante sobre el rendimiento final del ciclista, en un reciente estudio de (Malizia & Blocken, 2021) nos muestran el gran crecimiento del interés en este factor y su mejora en las últimas décadas. La aerodinámica involucra el diseño de la bicicleta, del casco, de la ropa y sobre todo la posición del ciclista, la cual analizaremos con más detalle en el factor biomecánico. Fundamentalmente, lo que se pretende, es disminuir la superficie frontal del ciclista para así avanzar de manera más eficiente, si lo analizamos más profundamente hay muchos más factores que influyen en la aerodinámica, el deslizamiento del flujo del aire a lo largo del cuerpo del ciclista y en su equipamiento (bicicleta, casco,...) creando el menor número posible de pequeñas turbulencias que perjudicarían el avance de este y además en ciertas circunstancias convertir el flujo del aire en un fuerza útil a la hora de avanzar. Dentro de la aerodinámica también nos encontramos con el drafting uno de los términos más importantes en el mundo del ciclismo ya que su beneficioso es enorme debido a que disminuye de manera radical la resistencia del aire.

La biomecánica como muestran otros autores (Turpin & Watier, 2020) pretende conseguir de manera individualizada un pedaleo más eficiente teniendo en cuenta las características anatómicas y fisiológicas del deportista. Esto se consigue midiendo los ángulos anatómicos de las articulaciones implicadas, un equilibrio lateral de las fuerzas aplicadas sobre la bici mediante sensores en los pedales, sillín y manillar, y midiendo la electromiografía (EMG) de los distintos músculos implicados, es decir, su porcentaje de activación respecto a su máximo. Llegaron a la conclusión de que es difícil decir que una técnica de pedaleo es óptima o no para un ciclista determinado debido a que influyen demasiadas variables y aún quedan muchas preguntas por responder.

Después de este breve resumen de los factores que influyen en el ciclismo destaca que todos están relacionados con la anatomía y fisiológica del ciclista en cierta medida, por lo que su influencia en el rendimiento no será de forma directa sino dependen en gran medida del deportista y debido a que cada uno tiene sus características individuales es difícil extrapolar dichos estudios a toda una población.

Esto no sucede con el último factor en el que nos vamos a centrar en esta revisión, la eficiencia mecánica, esta no depende del deportista por lo que la mejora se puede aplicar a toda la población, por lo que surge el interés de analizarla con precisión. La mecánica involucra toda una bicicleta en su conjunto, es decir, cada una de las piezas y su interacción entre ellas. La parte más relacionada con el rendimiento sería la transmisión debido a que su principal objetivo es transmitir la fuerza que ejercemos sobre los pedales hacia el eje de la rueda motriz y así convertir dicha fuerza en movimiento. Lo que sucede es que a la hora de determinar el rendimiento se utiliza la fuerza que ejerce el deportista sobre el pedal, esta es mayor a la que recibe el eje de la rueda motriz, siendo la última la que determina el éxito en una carrera.

En las bicicletas se utiliza una transmisión por cadenas, este tipo es muy común en sistemas de ingeniería por lo que se han realizado diversos estudios sobre el aplicados a motores. En el estudio de (Lodge & Burgess, 2004) nos dice que este tipo de transmisión suele tener una eficiencia mayor al 95% y las variables más influyentes en este modelo de eficiencia son; el tamaño de la cadena, el tamaño de la rueda dentada, la fuerza de torque, velocidad de rotación y el coeficiente de fricción. Se centran en el tamaño de la cadena utilizan 5 tamaños de cadenas diferentes en 4 tipos de intervenciones manipulando la velocidad rotacional y la aceleración, llegan a la conclusión de que el tamaño de la cadena es de los factores más importantes a tener en cuenta y que depende de la masa del vehículo. En la Volga Tate University of Technology (Egorov et al., 2015) se desarrolló un método para calcular la eficiencia de las cadenas mediante un sensor del torque el problema de dicho método es que se validó utilizando revoluciones por minuto altas comunes en motores (250 – 950rpm) inalcanzables en el mundo del ciclismo y además sin desplazamiento lateral de la cadena, factor que en el estudio de (Zhang & Tak, 2020) si se tuvo en cuenta, estima la pérdida de fuerza por la fricción deslizante y fuerza de amortiguamiento. La pérdida por fricción fue calcula teóricamente mediante la ley de fricción de Coulumb's y la fuerza de amortiguamiento mediante el coeficiente de amortiguamiento. Realizaron experimento utilizando un método parecido al de (Egorov et al., 2015), finalmente compararon los resultados teóricos con los prácticos y llegaron a la conclusión de que había un rango de error de 0,23% - 3,77% lo cual demuestra una buena correlación.

La problemática que nos encontramos es la gran investigación de este tipo de transmisión enfocada a sistemas de ingeniería, en los cuales las características difieren con la mecánica de la bicicleta, ya sea por el número de revoluciones por minuto lo cual deriva en una mayor fuerza de fricción en un determinado espacio de tiempo o una mayor pérdida de la energía en calor, la cantidad de fuerza que es capaz de aplicar un motor en comparación con una persona y factores específicos de dicha transmisión.

Debido a estas diferencias mecánicas en esta revisión nos centraremos en estudios específicos del ciclismo.

2.- Procedimiento de revisión:

2.1.- Búsqueda en la literatura:

Se realizó una búsqueda bibliográfica durante el primer semestre del año 2022 en las siguientes bases de datos; Pubmed, Dialnet y Google Académico. Además, se analizaron las

bibliografías de los estudios encontrados con el fin de detectar registros no mostrados en la búsqueda en la base de datos. La búsqueda se hizo mediante las palabras claves; “bicycle” and “mechanical efficiency”. Siendo estas localizadas en cualquier parte del artículo en las bases de datos Pubmed y Dialnet. Mientras que en la búsqueda en Google Académico surgieron problemas, numero demasiado alto de estudios irrelevantes con la revisión bibliográfica, se hizo una búsqueda avanzada con las palabras “bicycle” and “efficiency”, con la condición de que dichas palabras solo se podían localizar en el título del estudio.

2.2.- Criterios de elegibilidad:

Para poder ser seleccionados los estudios para la revisión tenían que cumplir los siguientes criterios: (a) redactados en inglés o castellano; (b) publicados en el intervalo de 2000 – 2022; (c) traten la mecánica de la bicicleta; (d) población sea la transmisión de cadena en bicicletas; (e) analicen la eficiencia de la transmisión.

2.3.- Criterios de exclusión:

Los artículos fueron descartados si no cumplían uno de los siguientes criterios: (a) no iban enfocados a la eficiencia; (b) no trataban la transmisión por cadenas; (c) la población no eran bicicletas; (d) las revoluciones por minuto en la intervención excedían las 200rpm; (e) relacionados con la biomecánica, aerodinámica, o fisiología.

2.4.- Selección de estudios:

El proceso de filtración y eliminar los registros duplicados se hizo de manera manual. Una vez detectados y descartados dichos registros duplicados pasamos a descartar las citas por el título o si fuera necesario leyendo el resumen aplicando los criterios de elegibilidad citados anteriormente. Los registros restantes pasaron a ser analizados a texto completo descartando los que cumplían con un mínimo de un criterio de exclusión.

Después de aplicarlos los diferentes criterios y fases de inclusión o exclusión, se recopiló la información clave de los registros incluidos en esta revisión bibliográfica.

2.5.- Resultados:

Con la búsqueda inicial en las bases de datos se obtuvo un total de 235 registros, después de filtrar las citas duplicadas (n=10) nos quedamos con 225. Después pasamos a leer los títulos y los resúmenes con lo que pudimos excluir un total de 216 registros quedándonos con un total de 9 registros para el último proceso de filtración. Precedimos a leer dichos estudios a texto completo e ir excluyendo según si cumplían los criterios de exclusión o elegibilidad, finalmente nos quedamos con un total de 4 registros para esta revisión bibliográfica.

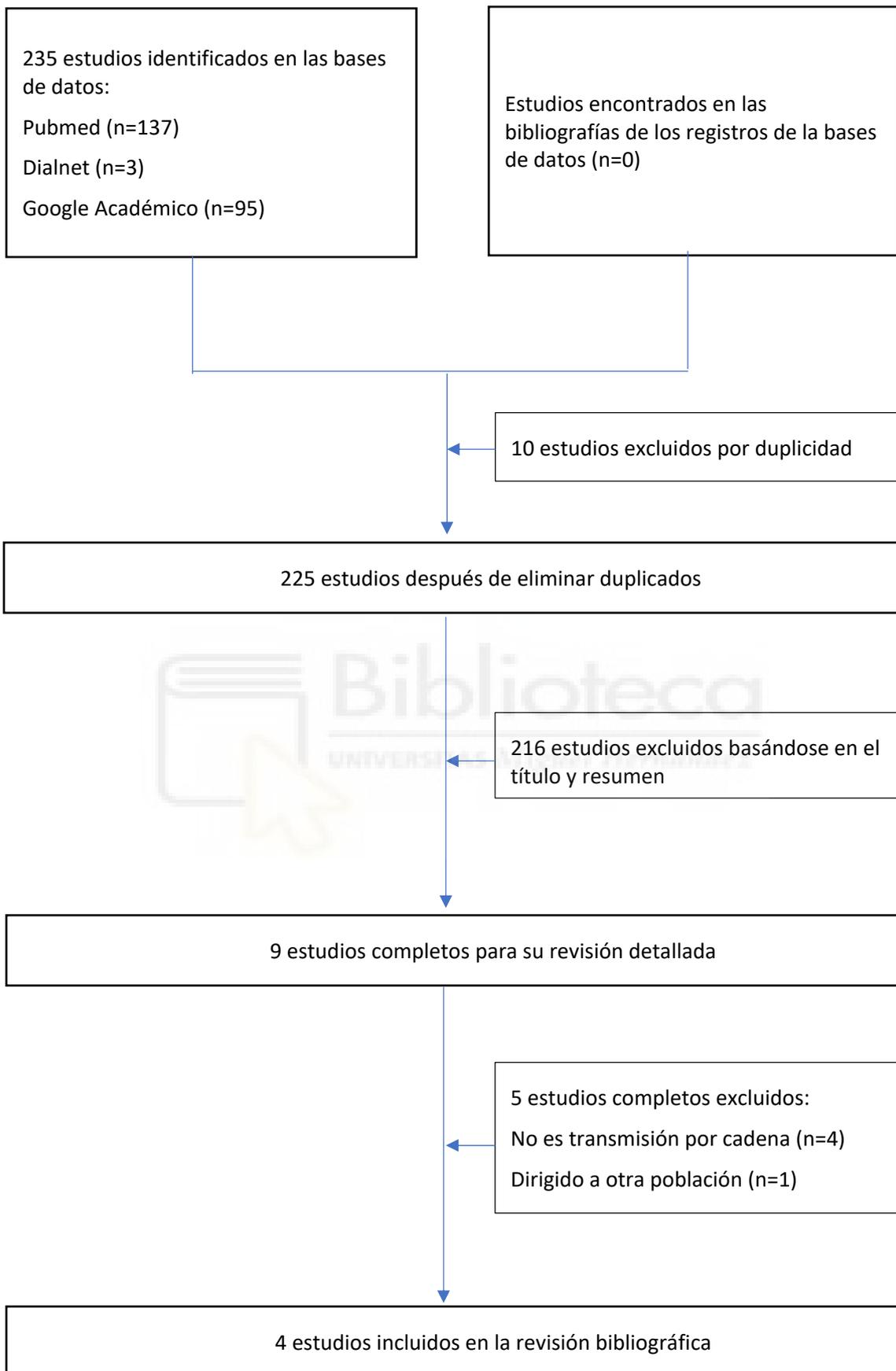


Figura 1. Diagrama de flujo de la selección de estudios incluidos en la revisión.

3.- Revisión bibliográfica:

Vamos a analizar los artículos seleccionados para esta revisión, lo haremos de forma cronológica. (Spicer et al., 2001) el objetivo de este estudio es conseguir diferentes resultados experimentales de la eficiencia, concretamente de la pérdida de energía por fricción, del sistema de transmisión de cadena de una bicicleta en diferentes condiciones y así conocer los factores más influyentes en dicha eficiencia. Primero analiza la pérdida de la fuerza de manera analítica, llegando a un modelo matemático para poder calcular la eficiencia de manera teórica, nos habla de 3 fuentes principales de pérdida; (a) buje de eslabón interno y pasador de cadena, (b) desplazamiento de línea de cadena, (c) rueda dentada, rodillo de enlace y buje de enlace interior. Para cada caso modela una fórmula específica, debido a que en el caso (b) en ángulo del desplazamiento suele ser mínimo, se puede asumir que dicha variable no tiene un efecto significativo en la eficiencia mecánica, por lo que las pérdidas generadas en el caso (a) y (b) deben ser dominantes en la mayoría de las condiciones. Asumiendo que el coeficiente de fricción de los dos casos es prácticamente igual escribieron una fórmula para calcular la total eficiencia de la transmisión. Los resultados teóricos indicaron que la fuerza de entrada y la pérdida por fricción están directamente relacionados con la tensión de la cadena.

Pasamos a la parte de intervención del estudio (Spicer et al., 2001) en ella midieron la fuerza de entrada en con la fuerza de salida, el ratio de salida-entrada fue utilizado para la cuantificación, para medir las fuerzas utilizaron un sensor para el troque y otro que medía la velocidad de rotación. Debido a que en la pérdida por fricción la energía se desprendía en calor se utilizó una cámara de infrarrojos para medir el calor. Midieron tres situaciones diferentes; (a) la relación de la transmisión, (b) potencia de entrada y la velocidad de rotación, (c) lubricación. Para las 3 intervenciones utilizaron los desarrollos 52-11, 52-15 y 52-21. En el primer caso (a) el desarrollo 52-15 no tiene desplazamiento de línea de cadena mientras que los otros dos sí, utilizaron 5 diferentes situaciones de potencia de entrada y revoluciones por minuto en este primer caso (50rpm-100w, 60rpm-100w, 70rpm-100w, 60rpm-150w, 60rpm-175w), con un tiempo de toma de datos de 30 minutos por cada desarrollo, analizando los resultados vieron que el ángulo de desplazamiento de cadena tiene un efecto insignificante en la eficiencia, lo más destacado fue la relación del tamaño del desarrollo con la eficiencia, siendo más eficiente el desarrollo más grande (52-21) independientemente de las condiciones de potencia de entrada y revoluciones por minuto. En el segundo caso (b) se hicieron dos medidas diferentes en la primera la potencia de entrada es constante (100w) cambiando las revoluciones por minuto empezando en 30rpm y aumentando en escalones de 10rpm hasta llegar a 90rpm, en la segunda intervención la cadencia es constante (60rpm) y van variando la potencia de entrada empezando con 50w aumentándola con escalones de 25w hasta llegar a los 200w, tomando los datos de manera secuencial en intervalo de 5 – 8 minutos. Los resultados vuelven a mostrar que la eficiencia es más grande en las transmisiones que utilizan piñones más grandes, la eficiencia va disminuyendo al aumentar la cadencia a una potencia de entrada constante y va creciendo mientras aumentamos la potencia de entrada en una cadencia fija. Con estos datos sacaron la conclusión de que la eficiencia tiene una relación lineal con la tensión de la cadena independientemente de la potencia de entrada y las revoluciones por minuto. En el tercer caso (c) compararon tres lubricantes diferentes en dos intervenciones diferentes una vez con la potencia de entrada fija en 100w y cadencias de 40rpm, 60rpm y 80rpm, en la segunda intervención una cadencia fija de 60rpm y potencias de entrada de 50w, 100w y 150w, los resultados indicaron nuevamente las conclusiones ya obtenidas y que el lubricante tiene un efecto pequeño en la eficiencia mecánica en condiciones de laboratorio. Destacó que en esta tercera intervención los resultados generales fueron aproximadamente 1.5 – 2% más bajos que en la segunda intervención, esto fue debido a que utilizaron la misma cadena para todo el estudio y esta se fue alargando aproximadamente 3mm.

En conclusión, dependiendo de las condiciones la eficiencia tiene un intervalo de 80.9% (76.2N) hasta 98.6% (305N), los factores que más influyen son la tensión de la cadena, teniendo una relación lineal con la eficiencia y el tamaño de los piñones (desarrollo) siendo los más grandes más eficientes y los más pequeños menos. Los efectos del ángulo de desplazamiento de la cadena y la lubricación tienen un efecto no significativo en condiciones de laboratorio. La pérdida en energía por fricción solo se pudo relacionar con un porcentaje bajo de la pérdida total, lo que tiene que haber otra fuente de pérdida mecánica que no se convierte en calor.

En el 2013 el mismo autor de (Spicer et al., 2001) publica otro estudio (Spicer, 2013) con el fin de identificar las pérdidas de energía en la eficiencia de la transmisión de cadena no relacionados con la fricción, la intención de este trabajo es representar la cadena de la bicicleta como una transmisión lineal compuesta por una serie de resortes y masas no lineales.

Para poder calcular dichas pérdidas no friccionales desarrolla a nivel teórico una expresión matemática, descompone las diferentes fuerzas que interactúan en la cadena, llegando a una fórmula final de la eficiencia de transmisión que es la siguiente:

$$\frac{\langle P_N \rangle}{\langle P_0 \rangle} \approx 1 - N^2 \mu m^{1/2} c'^{1/2} c''^{-5/2} \left(1 - \frac{(N-1)}{2} N \mu m^{1/2} c'^{1/2} c''^{-5/2} \right)$$

Fuente: (Spicer, 2013)

Esta fórmula nos indica que las cantidades influyentes en la eficiencia son el número de medios eslabones en la cadena, la masa de dichos eslabones, la rigidez del lineal-elástico contacto de pasador-buje y la no linealidad del contacto elástico. Aumentando cualquiera de estos factores, menos la rigidez del contacto lineal elástico, la eficiencia disminuirá.

Falta un modelo para calcular la respuesta elástica de la interacción de pasador y el buje, si estos dos tienen un módulo de elasticidad igual se puede utilizar la siguiente expresión:

$$c' = \{a[b - \ln(P)]\}^{-1} \quad c'' = c' \{2aP[b - \ln(P)]^2\}^{-1}$$

Fuente: (Spicer, 2013)

Comparando los resultados de una intervención hecha con una bicicleta comercial con 26 medios eslabones con el modelo, se ve una buena correlación, pero con mayores discrepancias en las cargas más altas, por lo que este modelo se puede utilizar para calcular la respuesta elástica del pasador-buje en cargas bajas. Este modelo hay que utilizarlo con precaución debido a que matemáticamente puede llegar a ser infinito o incluso negativo la rigidez del contacto en cargas altas, pero esto físicamente es imposible. Es difícil hacer conclusiones universales debidos al gran número de variables, pero combinando los dos modelos mostrados anteriormente, fijando algunas cantidades y asumiendo algunos valores típicos de cadenas de bici se pueden ver algunas variables de manera explícita. Los resultados mostraron que la eficiencia va creciendo cuando aumenta la tensión de la cadena, en valores bajos la tensión y la eficiencia varían de forma lineal, materiales con menor rigidez deberían de ser utilizados para aumentar la eficiencia, menores longitudes de contacto favorecerían una mayor eficiencia. Para validar estos modelos compararon los resultados con los resultados de la intervención del estudio anterior realizado por ellos (Spicer et al., 2001), en esta comparación se vio que en tensiones bajas de la cadena la eficiencia aumenta de forma lineal con el aumento de la tensión de la cadena, pero en los valores altos no se sigue esta tendencia.

Este modelo para calcular la pérdida de energía que no viene de la fricción tiene en cuenta unas características de la transmisión como el número de eslabones y medios eslabones, la masa de estos y la rigidez de la cadena. En conclusión, los resultados mostraron que las pérdidas en la transmisión van decreciendo a medida que va aumentando la tensión en la

cadena en valores bajos, mientras que en valores altos la eficiencia llega a un máximo impuesto por las pérdidas de fricción.

En el año 2017 se realizó el estudio de (Bolen & Archibald, 2017) para analizar la eficiencia de la transmisión Pinion P1.12, esta transmisión se caracteriza por su localización, debido a que su transmisión de 12 velocidades se encuentra en la manivela y no en la rueda motriz como suele ser habitual. La metodología que se siguió fue montar dos piñones, uno en la caja de cambios de 30 dientes y otro de 26 dientes en la rueda motriz, el protocolo fue de una potencia de entrada de 180w para las 7 primeras velocidades y unas revoluciones por minuto constantes de 120rpm para las 7 últimas velocidades, se calentó el sistema aplicando 300w entre 20 – 30 minutos esto permitió estabilizar su temperatura. Antes de cualquier toma de datos el sistema fue completamente parado con la tensión de la cadena completamente relajada, la recopilación de datos se hacía cada 5 min llegando así a durar más de una hora cada prueba, finalmente la recopilación de datos fue disminuida a 2 minutos. Los resultados mostraron un intervalo de eficiencia de 91.56 – 94.95%, las mayores pérdidas por fricción deben ocurrir en los cambios 9 hasta 12 ya que tienen la menor eficiencia. Debido a la localización de la caja de cambios, la eficiencia de este sistema de cambios sería mayor en cambios bajos y menor en cambios altos. En conclusión, esta transmisión tiene una eficiencia de 91.6 hasta 95%.

El estudio más reciente es del año 2021 de (Barnaby et al., 2021) investigan la variabilidad de la eficiencia de la cadena en condiciones esperadas y los factores más importantes de los que depende. Primero analiza una transmisión por cadena y señala las articulaciones de la cadena y elementos de rotaciones, para así determinar las diferentes fuentes de fricción. Diferencia los puntos de alta tensión, de baja tensión y los elementos de rotación, los cuales tienen un impacto no significativo sobre la eficiencia total (3%), mientras que los puntos de alta tensión presentan un 71% de la pérdida total por fricción y los de baja tensión un 26%. Investigaron la variación de la eficiencia mediante diferentes fuerzas de troque de entrada y desarrollos, los desarrollos utilizados para subir pendientes (mayor diámetro en el piñón y menor en el plato) presentan una mayor eficiencia debido a la reducción de su ángulo articular, se vio una correlación positiva entre el torque de entrada y la eficiencia, el desarrollo utilizado para esta intervención de un casete de piñones de 11 – 28 dientes y un plato de 39 dientes y otro de 53 dientes. Pasan a analizar la variación de la eficiencia mecánica dependiendo del tipo de ciclista recopilando datos de una carrera UCI se ve que la eficiencia puede cambiar dependiendo del recorrido de la carrera ya que los desarrollos de montaña son más eficientes y además aumenta el torque de entrada que tiene una correlación positiva con la eficiencia. Comparan la eficiencia de un ciclista y una ciclista profesional con un ciclista y una ciclista no entrenados, los resultados muestran que la variación de la eficiencia es menor en los profesionales debido a que manejan mejor los cambios y tu fuerza de entrada es mayor.

En conclusión, la potencia media y el desnivel pueden influenciar la eficiencia mecánica, siendo una carrera más montañosa más eficiente mecánicamente que una carrera llana, la potencia de entrada del ciclista también influenciara en la eficiencia siendo así un ciclista más fuerte a nivel de potencia (especialista de contrarreloj) más eficiente que un ciclista de resistencia.

4.- Discusión:

La presente revisión tuvo como objetivo conocer la eficiencia mecánica de un sistema de transmisión por cadena utilizado en las bicicletas de carretera, además saber cuáles son los factores que tienen mayor influencia en dicha eficiencia, para así poder calcular su potencial de mejora. Destaca la gran falta de investigación en este ámbito en relación con su importación a

la hora del rendimiento deportivo, debido a que puede ser decisivo en el resultado de una carrera.

Para ver el potencial de mejora vamos a calcular el tiempo que tardaría un ciclista en hacer una contrarreloj de 40km teniendo un peso de 70kg, utilizamos el resultado obtenido de una intervención del estudio de (Spicer et al., 2001) donde con una cadencia media de 60rpm y un valor de 200w de entrada la eficiencia es de 95.8%. Este cálculo lo haremos mediante la calculadora de Cyclistgo, manteniendo todos los valores idénticos para los dos cálculos; potencia de entrada 200w, coeficiente de resistencia aerodinámica de $0.2m^2$, coeficiente de resistencia a la rodadura de 0.005, desnivel 0%, velocidad del viento 0km/h, densidad del aire $1.045Kg/m^3$, distancia 40km, peso ciclista 70Kg, peso bicicleta 8Kg. Se mostraron los siguientes resultados: con una eficiencia de transmisión del 95.8% el ciclista tardaría 59 minutos 26 segundos 400 milisegundos, en cambio si esta eficiencia sería del 100% tardaría 58min 25 segundos 200 milisegundos. Una diferencia de 4.2% en la eficiencia equivale a una diferencia de más de un minuto en el resultado de una contrarreloj de 40km.

En los resultados de (Spicer et al., 2001) observamos que la eficiencia presenta un intervalo muy amplio (80.9 – 98.6%) dependiendo de las condiciones de la transmisión, siendo los factores más influyentes la tensión de cadena, relacionada con la fuerza de entrada y el desarrollo. Analizando las intervenciones hechas en los estudios de (Spicer et al., 2001) y (Bolen & Archibald, 2017) destaca que utilizaron un motor el cual aplicaba una fuerza de troque de entrada constante, siendo esto no específico en el ciclismo debido a que un ciclo de pedalada presenta dos picos de fuerza de entrada teniendo esto efecto sobre la cadena siendo la tensión de esta no constante. Teniendo en cuenta que dos variables que destacan (Spicer et al., 2001) el ciclista las puede modificar, es decir, un ciclista con mayor fuerza generara más torque lo cual se verá reflejado en la tensión de la cadena y a su vez en la eficiencia de la transmisión, el desarrollo utilizado también lo controla el ciclista por que en esta variable también puede influir y conseguir ser más eficiente, esto se ve en el estudio (Barnaby et al., 2021) llegan a la conclusión que un ciclista de elite comparado con uno no entrenado es más eficiente a lo largo de una carrera debido a estos factores, también nos cuentan la gran influencia del perfil de carrera ya que los desarrollos utilizados para carreras de montaña presentan una mayor eficiencia, debido a que la diferencia del número de dientes del piñón respecto al plato es menor. En el estudio de (Spicer, 2013) investiga fuentes de pérdida que son independientes a la fricción, como; el número de eslabones y medios eslabones, la masa de estos y la rigidez de la cadena. Llega a la conclusión de que la eficiencia de la cadena en cargas bajas tiene una relación lineal con la tensión de la cadena, pero una vez se va aproximando a cargas altas esta relación deja de ser lineal, debido a factores no lineales como la pérdida de rigidez de la cadena y porque se va aproximando a límites impuestos por la pérdida de fricción.

Un punto que destacar en las metodologías utilizadas para recopilar los datos de eficiencia es que el motor que genera la fuerza de entrada está directamente conectado con el eje del plato y el sensor que mide la fuerza de salida está conectado directamente con el piñón trasero, y la cadena no pasa por ningún desviador que implique rozamiento entre la cadena y roldanas como es habitual en una bicicleta de carretera. Sin duda la transmisión es la parte más importante a la hora de transportar la fuerza de un punto a otro, el problema es que este modelo de laboratorio se aleja un poco de la realidad en la que la fuerza de entrada es generada en el pedal de forma no constante pasando por la biela hasta llegar al plato donde se encuentra la cadena, es decir, ya hay un proceso previo en el que se puede perder energía y la fuerza de salida es transmitida al buje de la rueda trasera, la cual va a transmitir dicha fuerza a una superficie de contacto para poder avanzar. Analizando este mecanismo propio de una bicicleta podemos concluir que la eficiencia se debería de medir haciendo un ratio entre la fuerza de entrada generada en el pedal y la fuerza de salida transmitida de la rueda motriz hacia una superficie de contacto, ya que esta es la fuerza que realmente nos desplazara. En la intervención de (Spicer

et al., 2001) se utilizan potencias de entrada muy bajas (máximo 200w) en comparación de las que pueden generar ciclistas de elite (aproximadamente 400w) por lo que estos resultados no se pueden extrapolar a dicha población.

La eficiencia mecánica se puede descomponer varios factores, empezando por los materiales y sus características como son los analizados en (Spicer, 2013), los mecánicos como la tensión de la cadena o el tamaño del desarrollo que vemos en (Spicer et al., 2001) y por ultimo los dependientes del tipo de ciclista y características de ruta (Barnaby et al., 2021).

El principal objetivo debería ser conseguir una combinación de dichos factores lo más eficiente posible y que varíe lo menos posible a lo largo de una carrera. El problema que nos encontramos debido a que sabemos que el porcentaje de eficiencia es bastante alto en este tipo de transmisión directamente se suele pensar que hay poco margen de mejora, esto es un error, aunque a simple vista parece que hay poca capacidad de mejora la realidad es que una mínima mejora en esta eficiencia tendría un impacto enorme sobre el resultado de una carrera como hemos demostrado anteriormente.

5.- Propuesta de intervención:

La intervención propuesta en este trabajo tendrá como objetivo conocer los factores influyentes en una transmisión por cadena de una bicicleta de carretera en unas condiciones más parecidas a las que pueden darse en una carrera UCI. Para ello utilizaremos fuerzas de entradas más reales, es decir, más altas que las utilizadas en el estudio de (Spicer et al., 2001), la fuente de la fuerza de entrada en este caso no será un motor como en la mayoría de estudios de laboratorio, sino ciclistas entrenados para que así el comportamiento del torque sea más realista.

El sistema de transmisión montado en la bicicleta será electrónico, Shimano Dura-Ace Di2, siendo este muy utilizado a nivel profesional, el desarrollo montado será de un plato grande de 54 dientes y uno pequeño de 40 dientes, el casete de piñones será de 11 – 34 dientes. En esta intervención solo se medirán las combinaciones más opuestas, utilizando la combinación de 40 – 34 siendo este más del tipo escalador, y la combinación 54 – 11 siendo más beneficiario para tramos llanos y alcanzar altas velocidades, según los estudios de (Spicer et al., 2001) y (Barnaby et al., 2021) la combinación 40 – 34 debería de ser más eficiente.

La recopilación de datos se hará teniendo un potenciómetro instalado en los pedales de la bicicleta y el casete de piñones irá sujeto a un rodillo Wahoo Kickr, lo cual nos permitirá comparar los vatios de entrada recogidos en el pedal con los vatios de salida recogidos en el rodillo. Debido a que es muy difícil que el ciclista vaya a unos vatios fijos, estos se configurarán en el rodillo, la cadencia irá acorde con los vatios exigidos y el desarrollo utilizados por lo que no se fija una cadencia desde el principio, a la hora de analizar los datos se cogerá la cadencia media utilizada por los ciclistas para cada una de las condiciones.

Por otra parte la intervención se hará dos veces por ciclista, la primera con la cadena lubricada, esta se lubricará antes de que cada intervención de uno de los ciclistas para que este en las mismas condiciones para todos los ciclistas, y una segunda recogida de datos con la cadena totalmente seca, esto se hará para ver la influencia del lubricante en la eficiencia debido a que en estudios anteriores como en el de (Spicer et al., 2001) se compararon tres lubricantes diferentes sin tener un impacto significativo en la eficiencia pero no encontramos un estudio en el que nos muestre la influencia total de la lubricación.

El protocolo será de 20 minutos de calentamiento a 150 vatios para que la transmisión entre en calor, después se realizará la recopilación de datos en intervalos de 5 min, entre intervalos se descansará 2 min. Se registrarán tres intervalos de diferentes potencias de entrada siendo estas realistas en comparación con una carrera de ciclismo, el primero de 300w, segundo de 350w y el tercero 400w, siendo estos números altos de vatios hay que destacar que los ciclistas deberán de ser expertos, es decir, tener una FTP (umbral funcional de potencia) mínimo de 300 vatios. El número mínimo de sujetos sería de 4.

| Tabla recogida de datos ciclista | | | |
|----------------------------------|---|------|------|
| | Pérdida de vatios a diferentes intensidades | | |
| | 300w | 350w | 400w |
| Desarrollo 40 – 34 lubricada | | | |
| Desarrollo 54 – 11 lubricada | | | |
| Desarrollo 40 – 34 seca | | | |
| Desarrollo 54 – 11 seca | | | |
| Cadencia | | | |

Tabla 1. Recogida de datos de intervención.

Nota: la pérdida de vatios se calculará comparando los de entrada marcados por los pedales con los de salida marcados en el programa del rodillo, y se expresará en valores absolutos convertidos en porcentaje.

Los datos recopilados en la tabla 1 se compararán con los obtenidos de los diferentes ciclistas y se hará una media de todos ellos en cada una de las diferentes condiciones para así sacar unas conclusiones generales sobre la influencia de los diferentes factores; (a) el tamaño del desarrollo, (b) la lubricación, (c) la potencia de entrada, (d) la cadencia. Teniendo así una referencia de la importancia de cada variable en la eficiencia mecánica de la bicicleta.

6.- Bibliografía:

- Barnaby, G., Yon, J. & Burgess, S. (2021). Mapping whole-event drive losses: studying the impact of race profile and rider input on bicycle transmission efficiency. *Journal of Science and Cycling*, 10(2).
- Bolen, R. & Archibald, M. (2017). *EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF A MULTI-SPEED BICYCLE TRANSMISSION*. <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- Chorley, A. & Lamb, K. L. (2020). The application of critical power, the work capacity above critical power (W'), and its reconstitution: a narrative review of current evidence and implications for cycling training prescription. *Sports*, 8(9), 123.
- Egorov, A., Kozlov, K. & Belogusev, V. (2015). A method for evaluation of the chain drive efficiency. *Journal of Applied Engineering Science*, 13(4), 277–282. <https://doi.org/10.5937/jaes13-9170>
- Faria, E. W., Parker, D. L. & Faria, I. E. (2005). The science of cycling: factors affecting performance--Part 2. *Sports Medicine*, 35(4), 313–338.
- Lanferdini, F., Bini, R., Santos-Cunha, D., Lopes, A. L., de Souza Castro, F. A., Reischak-Oliveira, A. & Vaz, M. A. (2015). Relación entre variables fisiológicas y biomecánicas y la producción de potencia aeróbica en ciclismo. *PubliCE Premium*.
- Lodge, C. J. & Burgess, S. C. (2004). An investigation into the selection of optimum chain and sprocket size. *Journal of Engineering Design*, 15(6), 563–580. <https://doi.org/10.1080/09544820410001731128>
- Malizia, F. & Blocken, B. (2021). Cyclist aerodynamics through time: Better, faster, stronger. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 214, 104673.
- Phillips, K. E. & Hopkins, W. G. (2020). Determinants of cycling performance: a review of the dimensions and features regulating performance in elite cycling competitions. *Sports Medicine-Open*, 6(1), 1–18.
- Spicer, J. B. (2013). Effects of the nonlinear elastic behavior of bicycle chain on transmission efficiency. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 80(2). <https://doi.org/10.1115/1.4007431>
- Spicer, J. B., Richardson, C. J. K., Ehrlich, M. J., Bernstein, J. R., Fukuda, M. & Terada, M. (2001). Effects of frictional loss on bicycle chain drive efficiency. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 123(4), 598–605. <https://doi.org/10.1115/1.1412848>
- Turpin, N. A. & Watier, B. (2020). Cycling biomechanics and its relationship to performance. *Applied Sciences*, 10(12), 4112.
- Zhang, S. P. & Tak, T. O. (2020). Efficiency estimation of roller chain power transmission system. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(21), 1–13. <https://doi.org/10.3390/app10217729>