



MASTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

TRABAJO FIN DE MÁSTER

BIOMECÁNICA Y RENDIMIENTO DEL PEDALEO SOBRE UNA BICICLETA

Autor: D. Abel Martínez Molina

Tutor: D. Manuel Ignacio González Hernández

Valladolid, Julio de 2016

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España

BIOMECÁNICA Y RENDIMIENTO DEL PEDALEO SOBRE UNA BICICLETA

El presente trabajo trata de hacer una recopilación, interpretación y exposición de cómo uno de los medios de automoción más antiguos que existe y que hoy en día se usa de forma común, la bicicleta, puede ser utilizado de una forma más eficiente o, al menos, marcar unas pautas y procedimientos tanto biomecánicos como los mecánicos más comunes los cuales son referencia de eficiencia en el proceso de transmisión de la fuerza desde las piernas del usuario hasta la rueda motriz.

BIOMECHANICS AND PERFORMANCE OF PEDALING ON A BICYCLE

Actual memory treats to gather, interpret and expose how one of the more antique automotive conveyances that still is in common use, bicycle, can be driven in a more effective way or, al least, show some facts and procedures both biomechanics and mechanics that are the reference about how the strength done by the user is transmitted until the powered wheel.

BIOMECÁNICA Y RENDIMIENTO DEL PEDALEO SOBRE UNA BICICLETA

RESUMEN EJECUTIVO

Existen multitud de factores que influyen decisivamente en el rendimiento durante el pedaleo y su resultado en lo que a la velocidad transmitida sobre la bici se refiere. Todo empieza a partir del movimiento ejercido por el ciclista a través de sus piernas, el equivalente al motor de un vehículo. La forma de ejercer este movimiento, algo antinatural dado que se trata de un movimiento de rotación de los pies, influye decisivamente en cómo se queman las calorías que aportan la energía. Este gasto energético puede realizarse con mayor o menor eficiencia por motivos:

- Técnicos (ver gráfico 3.3 y punto 3.7). Para ello se requiere de un entrenamiento específico en el cual poder realizar un pedaleo depurado junto a un acoplamiento óptimo.
- Genéticos y de complejidad corporal (ver gráfico 3.6) los cuales indican que ciertos individuos tienen mayor capacidad para aportar energía a partir de una cantidad más reducida de oxígeno utilizado.
- Tecnológicos (ver punto 3.4). Con una bicicleta con componentes de mejor calidad y menor resistencia al movimiento se aprovecha mejor la energía aportada por las piernas.

Este último punto, el tecnológico, da pie para iniciar un estudio acerca de uno de los sistemas más importantes de la bicicleta que es la transmisión: ¿Cómo se aprovecha mejor el sistema instalado? ¿Qué tipo de sistema de transmisión es más efectivo? ¿Cómo afectan las diferentes combinaciones posibles al rendimiento mecánico? ¿Existe alguna posibilidad de mejora?

El principal análisis se realiza sobre el sistema de transmisión mediante cadena el cual es el más común en la actualidad por motivos que se trata de explicar en el presente. Bajo los diferentes estudios, interpretaciones y pruebas realizadas se obtiene unos resultados de mejora que, para ese caso transmisión por cadenas clásico, dependen de factores como:

- Ineficiencia de la propia cadena
- Cruce de cadena (<1%)
- Combinación de plato/piñón (1-3%)
- Lubricación (1%)
- Limpieza
- Desviador para engranaje de velocidades (ineficiencia puntual durante el cambio y constante por paso a través de patilla de tensión)
- Elongación de la cadena y desgaste (creep)

Los valores porcentuales indicados son valores de pérdida de eficiencia relativa a una comparativa frente a un sistema de cadena de alta gama. Probablemente que para componentes de gamas medias o bajas el incremento de pérdidas se puede disparar.

Bajo esta perspectiva se ha de indicar que en realidad estas mejoras en la transmisión serán interesantes para ciclistas que aspiren a exigencias altas de su bicicleta y de su pedaleo. Para un usuario medio o bajo, el reducir un 5% o un 10% las pérdidas por fricción no es realmente interesante. No obstante, en el presente se dan indicaciones de qué sistemas son más fiables y más rentables lo cual sí puede ser interesante para este colectivo:

La eficiencia no ha de considerarse como exclusivamente energética sino también como funcional.

A partir de la fundamentación de la eficiencia del sistema de cadena se realiza una compilación de otros sistemas como la transmisión por correa o por eje de torsión en el que su rendimiento energético y

funcionalidad es analizado en comparativa referenciada a la cadena y en términos absolutos haciendo tras ello una valoración de la conveniencia de su uso en función de las impresiones y resultados.

La virtud de este TFM no reside en tanto en los estudios específicos y personalizados realizados para la comprobación de estos aspectos si no en la compilación metódica e interpretación de conceptos y cuestiones clave que los usuarios de la bicicleta se han hecho en virtud de una mejora de su potencial basando las soluciones aportadas en experimentaciones a escala real, comparativas teóricas y datos contrastados mediante el uso continuo y la experiencia.

BIOMECHANICS AND PERFORMANCE OF PEDALING ON A BICYCLE

EXECUTIVE ABSTRACT

There are so many factors that influence in performance along the pedalling and in speed transferred on a bicycle. Everything starts with the movement made by cyclist through his legs, just as the motor in a car. That movement seems to be totally unnatural because it is just a surrounding motion of the feet and is very difficult to achieve a technical that allows to burn the calories with hi-performance results. The energy waste could be reduced or, at least, changed by some ways:

- Technical (see graphic 3.3 and theme 3.7). It is required a constant and specific training for the improvement of pedalling and position in the bicycle.
- Genetic and body composition (see graphic 3.6). It illustrates that certain persons in a natural way have a better performance when they burn calories doing a work.
- Technological (see theme 3.4). In a bicycle with better materials, components and a design that allows to be less resistant to the movement will be better benefited about the energy created by the cyclist's legs.

This last spot, technological, permits to start a study about one of the most important systems that belongs to the bicycle systems: Transmission. How could be improved performance? What kind of transmission system is more effective? How do the possible combinations affect to performance? Is there any improvement possibility?

The main analysis is done over the common chain-drive transmission and why it is still working so well despite some technical advances that could be a better solution. They are based on lab tests, interpretations and some proofs made for the explanation of main performance chain-drive transmission points:

- Inefficiency of the chain
- Cross chain (<1%)
- Front and rear cog combinations (1-3%)
- Lub (1%)
- Cleaning
- Derailleur performance (punctual inefficiency when shift and constant inefficiency because of the tensor)
- Creep on chain and wastage of transmission parts.

Percentage values indicate are the friction wasted realized with a hi-performance chain-drive component. Probably these studies could find exponentially results if the comparison had be done with mid or less-performance ones.

Under this perspective it has been indicated that the improvement in transmission could interesting to pro or semi-pro cyclists seekers of their best time trials or results during a competition or so. For a middle or low profile user the results and studies that analyze how to perform transmission and biomechanics it is not really interesting, because 5 or 10% improvement doesn't mind for this kind of quite user. Nevertheless, in this memory are included indications about which systems are reliable and profitable for this kind of users:

Efficiency has not to be considered only as energy saver but functionality.

From the analyzing done by chain-driven transmission it is made a compilation of another systems as Belt-drive and Shaft-drive which have been studied and compared with chain-drive to see how their performance will be considered and if it is convenient to introduce it as part of the bike systems depending the expectations of the users.

Virtue of this TFM is not exactly the specific studies done and designed for it but in the methodical compilation and concept interpretation and main questions based on tests, comparisons and evaluated data, through experience that users have asked in search of an improvement of performance.

INDICE:

1. INTRODUCCIÓN
 - 1.1 Antecedentes y justificación del TFM
 - 1.2 Objetivos
 - 1.3 Alcance y desarrollo del TFM
2. SISTEMAS DE LA BICI Y RENDIMIENTO GLOBAL
3. BIOMECÁNICA DEL PEDALEO
 - 2.1. Ecuación Del movimiento
 - 2.2. Fuerzas reactivas durante el pedaleo
 - 2.3. Ángulos en plano sagital
 - 2.4. Desde el metabolismo hasta el trabajo útil
 - 2.5. Desde el trabajo útil a la velocidad aportada
 - 2.6. Fuerza de la pedalada
 - 2.7. Formas de mejora a nivel biomecánico
 - 2.7.1. Entrenamiento
 - 2.7.2. Aplicar fuerzas correctamente
 - 2.7.3. Cadencia apropiada
 - 2.7.4. Pedaleo redondo
 - 2.7.5. Diseños en los pedales / Platos ovalados
4. SISTEMA DE TRANSMISIÓN
 - 4.1. Eficiencia de la transmisión
 - 4.1.1. Pérdidas de energía por fricción en cojinetes y rodamientos
 - 4.1.2. Pérdidas de energía en el medio conector de plato con piñón
 - 4.1.3. Pérdidas por deformación en bielas y eje pedalier
 - 4.2. Transmisión por cadena
 - 4.2.1. Eficiencia de la cadena
 - a. El cruce de cadena
 - b. Estudio experimental de cruce de cadena y combinación entre platos y piñones
 - c. Ineficiencia por la propia cadena
 - d. Lubricación
 - e. Suciedad y uso
 - f. Elasticidad estructural / Desgaste en la transmisión
 - g. Deformación de los casquillos sobre el diente
 - 4.2.2. Eficiencia en el cambio por desviador
 - a. ineficiencia en el momento de cambio de piñón o plato
 - b. Ineficiencia por paso de la cadena a través de la patilla de tensión
 - 4.3. Transmisión por correa
 - 4.3.1. Características básicas
 - 4.3.2. Precarga en correa: Relación con su efectividad
 - 4.3.3. Eficiencia por uso de tensor dinámico
 - 4.4. Transmisión por eje de torsión
 - 4.5. Sistemas de cambio de relaciones: Desviador clásico y gearbox
5. CONCLUSIONES
 - 5.1. Conclusiones generales
 - 5.2. Principales aportaciones
 - 5.3. Sugerencias para trabajos futuros

ANEXO 1: Cinemática de la cadena

- A.1.1. Análisis cinemático
- A.1.2. Transmisión de Esfuerzos
- A.1.3. Potencia transmitida: método de dimensionado de cadena

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificación del TFM

En el presente trabajo se tratará de desarrollar una exposición de los motivos por los cuales en un medio de automoción, como la bicicleta, uno de los principales sistemas, el de transmisión puede variar su eficiencia de uso en función de la forma de ser utilizada por parte del usuario (Biomecánica) y el diseño del mismo (Mecánica). A partir de estas pautas entender las posibles mejoras a realizar en función de las expectativas y necesidades de uso que se tengan.

Analizar conceptos como la resistencia al movimiento en lo que a la parte de potencia transmitida se refiere, desde las piernas del usuario hasta el giro de la rueda motriz, sus causas y posibles mejoras es la principal motivación del presente informe, analizando tanto las causas biomecánicas propias del usuario de la bici (cadencia, pedalada, posición...) como técnicas de diseño dentro de lo que viene a ser el sistema de transmisión y sus tipos más destacados (Transmisión por cadena, correa o eje de torsión, cambios de velocidades, comparativa de sistemas...).

El global del rendimiento depende de muchos factores que no se entrarán a valorar pero sí se exponen brevemente y como apoyo para entender determinados aspectos del porqué de ciertas cuestiones del rendimiento (aerodinámica, peso, resistencia del terreno a la rodadura, etc).

1.2 Objetivos

La investigación analiza e interpreta ciertas cuestiones de alto interés para ciclistas de nivel medio-alto que quieran mejorar su rendimiento a partir de interpretaciones tanto de la forma de pedalear como de las combinaciones (pedaleo redondo, eficiencia, puntos muertos...) y metodologías posibles de la transmisión de la propia bicicleta (Cruce de cadena, combinación plato/piñón, tipos de transmisiones, funcionalidad, sistemas de cambio, lubricación...).

1.3 Alcance y desarrollo del TFM

Los conceptos aquí desarrollados y analizados son, en origen, interpretaciones e inquietudes del propio autor fruto de la experiencia cuyo resultado final ha sido o corroborado o aclarado mediante los resultados de investigaciones y test de ciertos autores y técnicos cuyas referencias están reflejadas en la parte de bibliografía y fuentes del presente trabajo.

2. Sistemas de la bici y rendimiento global

El poder de propulsión en una bicicleta viene determinado por el efecto activado por el usuario al mover el sistema de transmisión mediante las piernas. La rotación del eje a través de los pedales, afecta a la corona dentada (plato) dando como resultado un movimiento circular que se transmite comúnmente por una cadena de eslabones conectada con la rueda trasera a través de los piñones la cual al rotar sobre su centro y apoyada sobre el terreno crea un movimiento lineal aprovechado para el desplazamiento de la propia bici y del usuario que ejerce dicha fuerza.

Las partes básicas que forman una bicicleta tipo serían las indicadas en la imagen 1.1:



Imagen 2.1: partes básicas de la bicicleta

Cada una de estas partes ilustradas van a pertenecer a uno o varios sistemas de trabajo.

Los principales que componen una bicicleta son:

- Sistema estructural. Cuadro o estructura principal sobre la que todos los componentes van anclados. El manillar, el sillín y la horquilla podrían considerarse como partes estructurales también.
- Sistema de dirección: Compuesto por la horquilla y el manillar permite mantener el equilibrio y direccionalidad.
- Sistema de desplazamiento. Serían las ruedas sobre las que se produce el efecto de giro que transforma su rotación en movimiento lineal.
- Sistema de transmisión. A través de este sistema el movimiento circular ejercido por las piernas se transmite desmultiplicado a la rueda trasera.
- Sistema de frenos. Sistema por el cual se puede ejercer un rozamiento voluntario para detener el movimiento ejercido.

Como sistemas secundarios se podrían incluir:

- Iluminación. Para ver y sobre todo que la bicicleta sea vista por los demás.
- Cambios. Subsistema perteneciente al sistema de transmisión que permite endurecer o suavizar el par a ejercer sobre los pedales para superar la resistencia al movimiento. Tiene un efecto directo sobre la cadencia de pedaleo.
- Sistema de suspensión. Principalmente para mejorar la adherencia al terreno y estabilidad aunque también, bajo ciertas premisas, puede ser considerado como sistema de confort.
- Ayuda al movimiento. Sistemas principalmente eléctricos con los que se aporta una ayuda mecánica externa al usuario para superar la resistencia al movimiento.



Imagen 2.2: Sistemas de la bicicleta

3. BIOMECÁNICA SOBRE LA BICI

El rendimiento que un usuario puede sacar de su propio trabajo para la impulsión influye muy decisivamente en el rendimiento global del sistema de autopropulsión. La posición, el entrenamiento y la forma de pedalear son tres pilares básicos a la hora de hacer cualquier valoración en este sentido.

3.1 Ecuación del movimiento

La ecuación que describe la relación entre el trabajo aportado por el ciclista y la velocidad aportada sobre la bici puede ser desarrollada teniendo en cuenta 5 variables principales:

1. Rendimiento mecánico de la transmisión del movimiento hasta la rueda y el suelo.
2. Fuerzas inerciales asociadas con la aceleración de la bicicleta.
3. Fuerzas gravitacionales en terrenos no llanos (Resistencia estática y dinámica).
4. Resistencia a la rodadura.
5. Arrastre aerodinámico.

La suma de estos factores aportará el valor instantáneo de la potencia producida por el ciclista:

$$P_{cyc} = P_{dt} + mVA_{cyc} + WV\sin(\arctan G) + WVCrr_1\cos(\arctan G) + NCrr_2V^2 + 1/2 C_dA_p D(V + V_w)^2$$

where:

P_{cyc} = net instantaneous mechanical power produced by the rider

P_{dt} = power to overcome drive train friction

m = mass of the rider and bicycle

V = bicycle velocity

A_{cyc} = instantaneous acceleration or deceleration of the bicycle-rider system

W = weight of the bicycle and rider

G = the grade

Crr_1 = coefficient of static rolling resistance

N = number of wheels (in case a tricycle is analysed)

Crr_2 = coefficient of dynamic rolling resistance

C_d = coefficient of aerodynamic drag

A_p = frontal surface area of the rider and bicycle

D = air density

V_w = velocity of the head or tail wind (positive for head wind).

Examinando esta ecuación, varios elementos destacan sobre otros y se convierten en fundamentales para alcanzar una mejora de rendimiento satisfactoria. El primero, el peso conjunto de la bici y el ciclista (m & W), figura en una relación lineal en la segunda, tercera y

cuarta sub-ecuación por lo que un aumento del 10% en el peso combinado supone un incremento de potencia para acelerar la bici, superar las dificultades de la escalada y la resistencia estática a la rodadura de un 10%. La velocidad de la bicicleta también es importante para la variación de la resistencia dinámica a la rodadura tal y como indica el quinto término o sub-ecuación cuyo valor afecta de forma cuadrática. Finalmente en la fuerza para superar el lastre aerodinámico se incluye una relación cuadrática de la velocidad de la bici siendo que aumentar la velocidad de la bici o del viento de cara supone aumentar exponencialmente el lastre aerodinámico factor que se va convirtiendo en decisivo por tanto cuanto mayor sea la velocidad.

El primero de los términos al que se hace referencia es el que se va a tratar de analizar en el presente trabajo: El rendimiento neto que el usuario es capaz de aportar al buje de la rueda motriz. En este sentido hay dos factores a tener en cuenta:

- La capacidad de pedaleo del usuario.
- El rendimiento mecánico del sistema de transmisión de la fuerza ejercida hasta la rueda.

3.2 Fuerzas reactivas durante el pedaleo

Cuando el pie aplica la fuerza perpendicular sobre el pedal éste se encuentra con una reacción opuesta en dirección. Lógicamente esa reactiva es menor si se logra mover el pedal y menor si no es así. Esta es la llamada "Fuerza de reacción del pedal". Las componentes de esa fuerza son además de perpendicular al pedal (F_z) como cargas cortantes u horizontales laterales (F_x) perpendiculares al desplazamiento y anterior/posterior (F_y) en dirección al desplazamiento de la bici.

Los resultados de diversos estudios bidimensionales conducen a un similar resultado. Según dichos estudios la carga perpendicular que un usuario de cierto nivel aporta al pedaleo suele rondar el 60% del peso, alrededor de 350N siempre que se analice manteniendo una velocidad y condiciones constantes. Eso se puede conseguir manteniéndose sentado en el sillín. No obstante, lógicamente este valor puede verse incrementado cuando el ciclista se pone de pie para afrontar una subida o realizar un sprint. Raramente esta fuerza aportada supera el propio peso del usuario sin embargo puede ser así durante cortos periodos de tiempo.

La técnica de pedaleo redondo, haciendo fuerza hacia arriba al tirar del pedal enganchado en la cala, aun siendo una sensación que gran parte de los ciclistas tienen como positiva, no es habitual para mantener constancia en terrenos llanos. Tirar del pedal hacia arriba no es un efecto esencial para mejorar el rendimiento en pedaleo de manera habitual y la mayoría de los ciclistas prefieren reservar esta técnica para realizar escaladas y sprints.

Los siguientes gráficos indican las características de reparto de la fuerza aplicada sobre el pedal en función del ángulo de pedaleo empezando desde 0° hasta los 360° pasando por 90° , 180° y 270° :

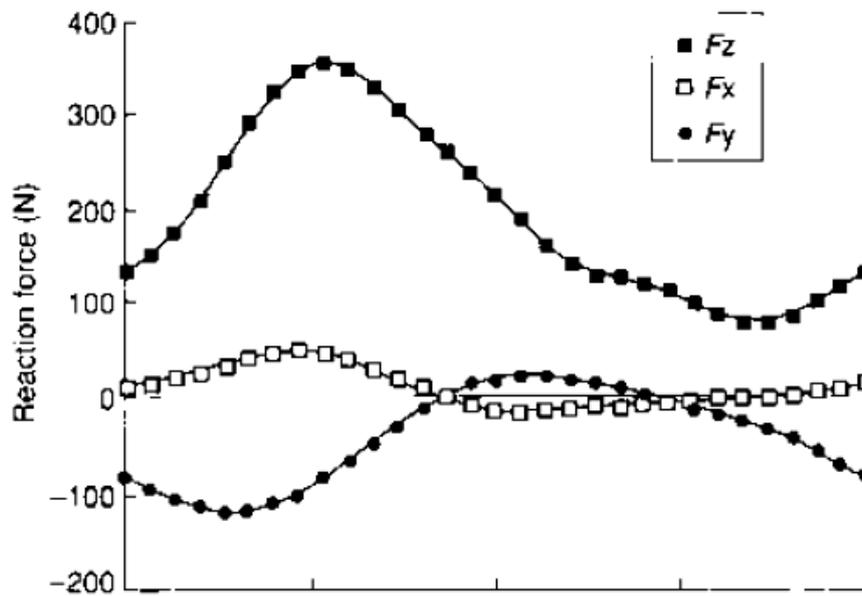


Gráfico 3.1: Fuerza ejercida sobre el pedal a lo largo del eje de coordenadas x,y,z

Este gráfico detalla la posición de la fuerza perpendicular al esfuerzo pedaleo (F_z) que como se puede ver alcanza su máximo a los 90° del posicionado del pedal respecto a su punto muerto superior. Los valores de fuerza a lo largo de la superficie del pedal en dirección al movimiento (F_y) y la fuerza lateral ejercida (F_x).

El gráfico identifica la zona del pedaleo con mayor carga reactiva durante el paso de los 0 a los 180° de giro, como es lógico. La presión va incrementándose desde 0 hasta 90° y pasa a decrecer desde los 90 a los 180° , mientras que a partir de este momento las fluctuaciones son varias y dependen del estilo de pedaleo adoptado para este momento: caso de tirar hacia arriba del pedal a partir de los 180° , tirar hacia delante u hacia atrás durante el paso por el punto muerto superior o inferior respectivamente, salvar las inercias ejercidas por la pierna en tramo descendente que pasa a ascendente a partir de los 180° de pedaleo, etc. Las gráficas dadas serían aplicables a técnicas de pedaleo comunes, sin embargo, como se verá más adelante, existen técnicas de pedaleo que permiten sacar un rendimiento positivo constante a cada fase aunque requieren de una depuración y práctica previa para su automatización, activación y correcta ejecución para evitar lesiones.

Interesante interpretar el detalle de cómo a partir de los 180° la carga F_z sigue teniendo valor positivo. Esto es significativo de que a partir de ese punto la carga positiva F_z se convierte en un lastre al aplicar al contrario del giro la carga. Esto significa que a pesar de trabajar el pedaleo redondo, es decir, tratando de sumar en cada ángulo del giro, las inercias de las piernas tienden a ser más fuertes incluso que el propio ciclista en condiciones normales. Donde un ciclista sí tiende a "tirar hacia arriba" de los pedales es en escalada y en sprints, sin embargo la eficiencia de pedaleo no parece consistir en hacerlo durante condiciones de más relax para ahorrar energía.

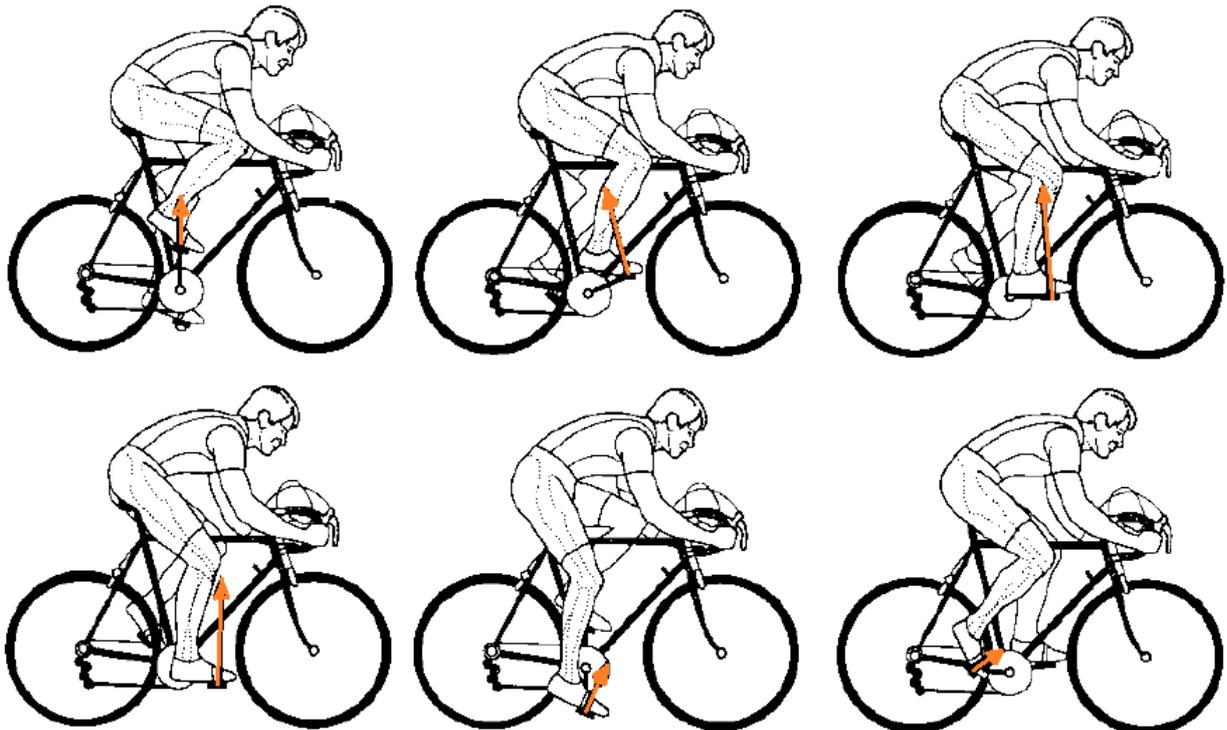


Imagen 3.2: Vector de fuerza reactiva sobre el pedal a lo largo de seis posiciones de la biela.

La interpretación de la *gráfica 3.1* respecto esta *imagen 3.2* se ha de hacer viendo que el vector de reacción está valorado a partir de un eje de coordenadas móvil solidario al ángulo de giro del propio pedal. Por lo tanto en esta gráfica no se define qué cargas realiza el usuario para poder ejercer el pedaleo si no el efecto directo sobre la superficie del pedal, el cual gira en función de la posición de la biela.

Para poder definir qué zonas del giro son productivas se ha analizar el *gráfico 3.3* en el que se puede apreciar qué partes a lo largo del giro de la biela son positivas para el movimiento y cuáles lastran en cierta medida a éste:

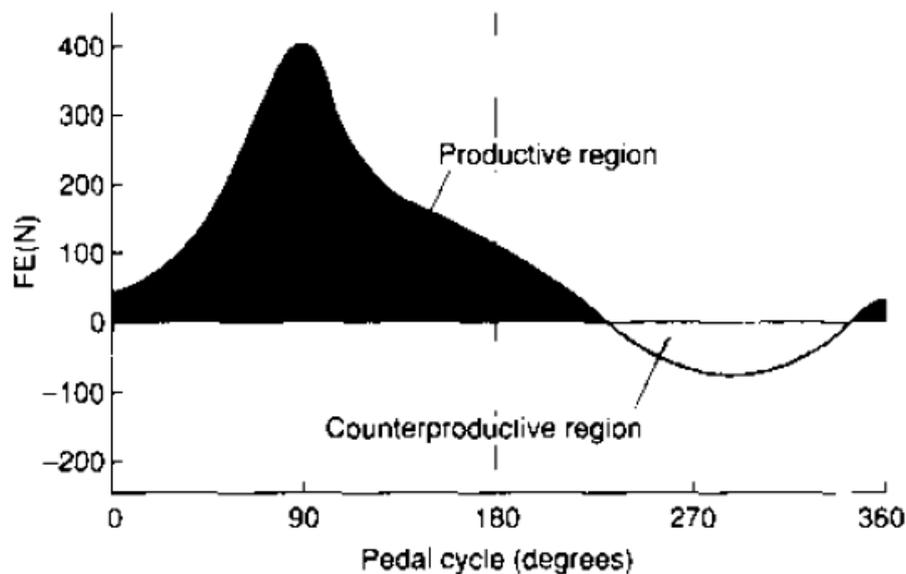


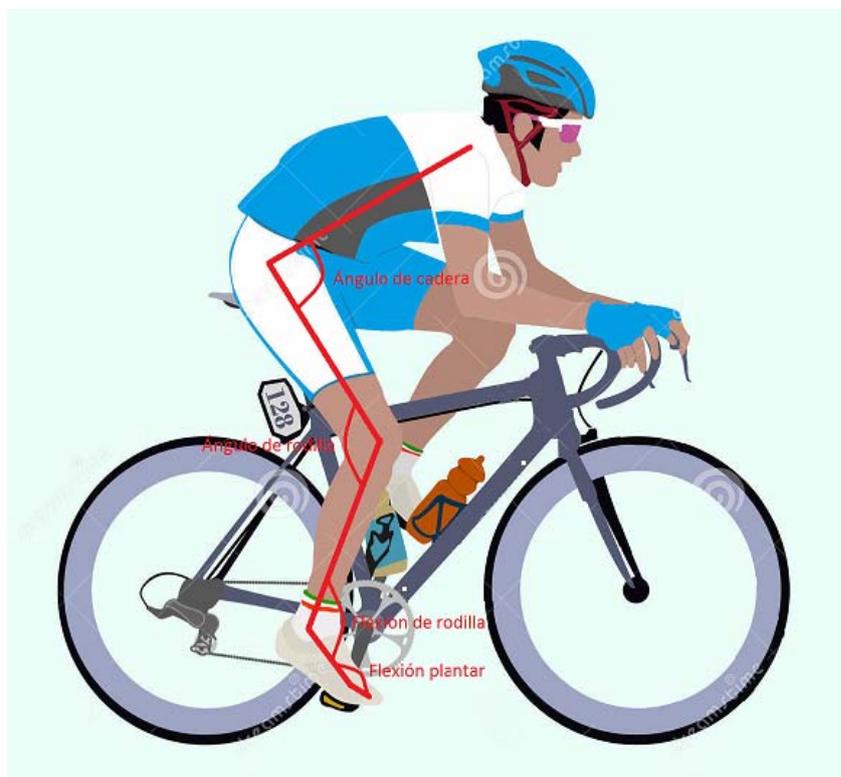
Gráfico 3.3: Zonas de pedaleo efectivas y no efectivas a lo largo de una vuelta de biela.

Los ciclistas de élite tienen una amplia zona efectiva (productive region) que en principio parece no verse modificada aunque la posición corporal no sea constante, es decir, estos corredores no ven afectado su rendimiento de pedalada aun asumiendo una posición más o menos aerodinámica que varíe ligeramente su acoplamiento durante la pedalada aunque esto sí afecta al rendimiento global final al tener una mayor resistencia por el efecto viento. Se podría decir que en una bici estática, sin efecto viento, el rendimiento de pedalada es prácticamente el mismo aun cambiando la posición del cuerpo, sin embargo esta afirmación, tras lo indicado, no puede ser validada en trayectos en ruta. También se puede considerar que el ciclista en posición de estar en pie el pico de efectividad máxima se desplaza desde los 90° indicados para el caso común hasta los 130° ó 135°.

3.3 Ángulos en plano sagital

La principal variabilidad en el valor de rendimiento durante el pedaleo, obviando la aerodinamicidad que adquiere mayor importancia a mayor velocidad, que un usuario puede acusar está condicionado por la posición del mismo sobre la bici y concretamente a la variación de rangos entre los que oscilan el ángulo formado por las articulaciones en el plano sagital:

- Ángulo de cadera
- Ángulo y extensión de rodilla
- Flexión del tobillo
- Flexión plantar



Las velocidades de desplazamiento y aceleraciones del muslo, la tibia y el pié se ven crucialmente afectados tanto por la cadencia de pedaleo como por las geometrías adoptadas

como altura del sillín, longitud de la biela, posición del pie sobre el pedal, distancia al manillar, etc.

Esta configuración es particular de cada usuario y depende de las necesidades que cada uno de ellos quieran cubrir mientras montan en bici. En un uso normal la altura del sillín hasta el suelo es determinante y suele rondar entre el 90% y 115% de la longitud desde el pubis hasta la planta del pie. A partir de este dato se extrae la conclusión de que la parte más afectada por esta variable es la rodilla cuyo rango de apertura se reduce en función de una altura más baja del sillín. Los gráficos del ángulo de cadera (Hip angle) y de rodilla (Knee angle) contiguos así lo indican:

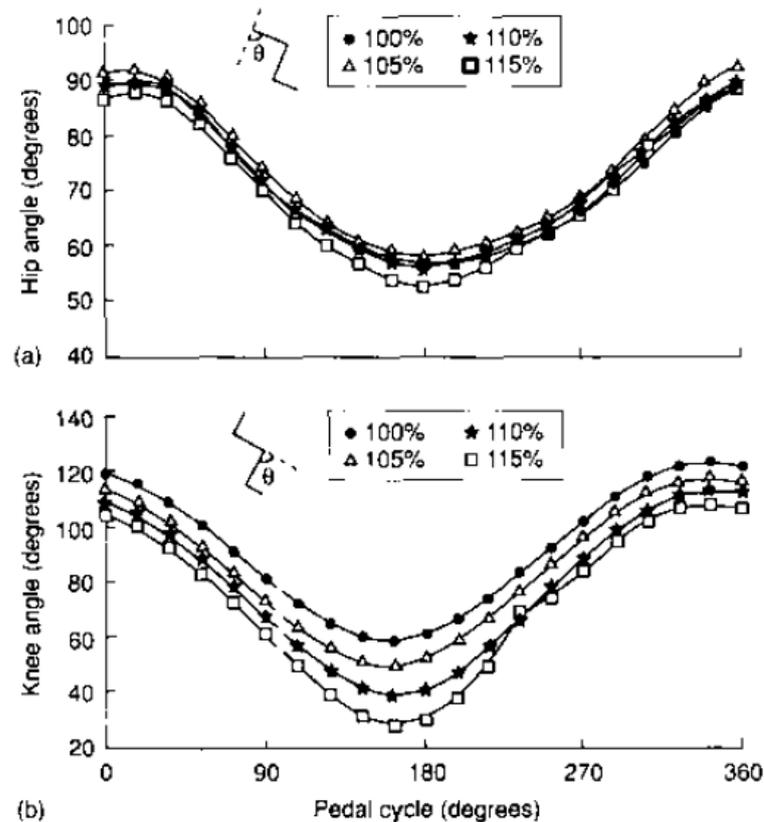


Gráfico 3.4 (a) (b): Ángulos de cadera y rodilla durante el pedaleo en función de la altura del sillín hasta el suelo respecto a la longitud pubis-suelo.

El plano sagital comprende tanto el plano transversal como el frontal. En este frontal uno de los estudios más habituales es el del estudio del movimiento que tiene la rodilla alejándose y acercándose a la bicicleta durante el pedaleo. El gráfico contiguo describe este movimiento hacia dentro y hacia afuera indicando la variabilidad en función de la altura del sillín (94, 100 y 106%). Al contrario que pasara en el plano transversal el rango de movimiento de la rodilla es mayor cuanto más bajo esté posicionado el sillín:

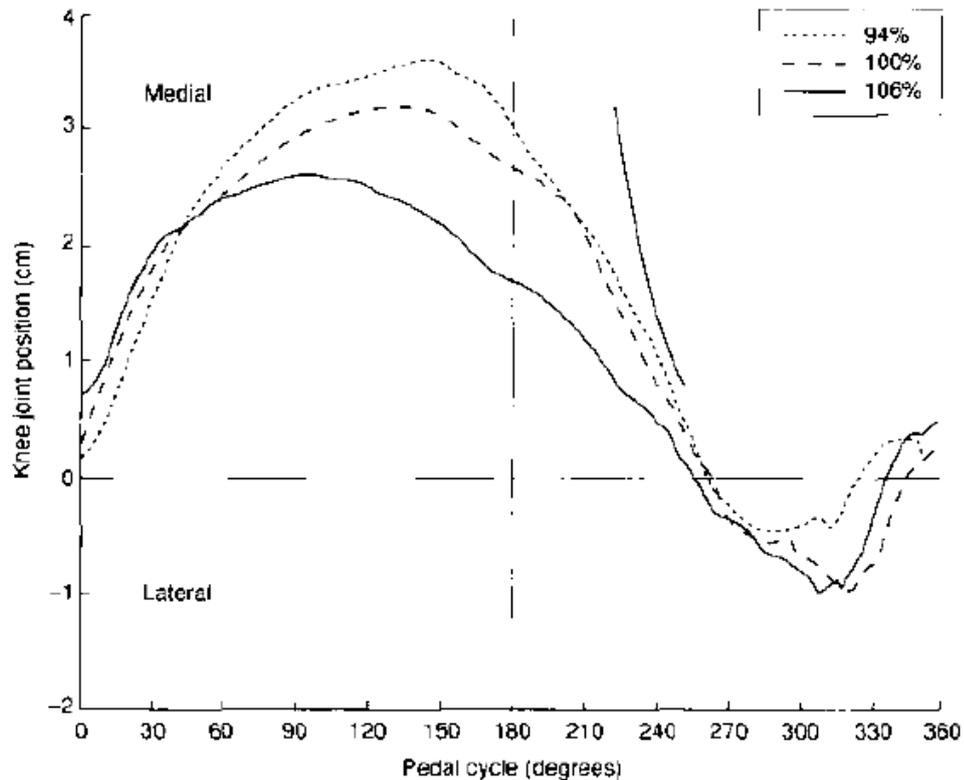


Gráfico 3.5: Distancia lateral de la rodilla a eje del cuadro en función de la altura del sillín hasta el suelo respecto a la longitud pubis-suelo.

La rodilla parte de una posición neutra en una zona previa al punto muerto superior (0°) acercándose al propio cuadro de la bici y llegando a su punto más próximo a los 90° del giro de pedaleo o, lo que es lo mismo, en su máximo esfuerzo teórico. A partir de ahí se empieza a distanciar llegando a la máxima separación incluso más hacia afuera del punto considerado como neutro en la zona de unos 300° de giro, es decir, aproximándose al punto muerto superior. Este efecto se magnifica a medida que el esfuerzo por pedalada es mayor siendo que se podría establecer una relación directa entre la fuerza a ejercer durante el pedaleo junto con la capacidad de mejora del rendimiento que el usuario pueda tener al acercar su rodilla al cuerpo de la bicicleta.

¿Podría ser esto causa de posibles lesiones o deformaciones en las piernas? Varios estudios hablan de que los ciclistas con menores problemas de rodilla tienen un menor movimiento lateral de rodilla. El llegar a altos esfuerzos de pedaleo e incrementar el acercamiento de la rodilla a la zona interna podría, efectivamente, traer problemas de desgaste en ciertas partes principalmente de la pierna (tobillos, caderas y sobre todo rodillas) aunque podría afectar de manera indirecta a otras zonas del cuerpo. Para evitar esto se estudia, a ciertos niveles, la biomecánica de cada usuario para tratar de diseñar una ergonomía en la bicicleta que modifique estas "manías": altura de sillín, pedales ortopédicos, geometrías de cuadro, etc. El debate se centraría en ¿hasta cuántos centímetros serían convenientes para no influir negativamente el rendimiento del ciclista en favor de evitar lesiones? Dada esta situación lo interesante es valorar los resultados científicos y/o estadísticos y aplicárselo a cada usuario en función de su propia configuración y sensaciones.

3.3 Desde el metabolismo hasta el trabajo útil

De alguna manera los músculos del cuerpo son capaces de quemar la energía acumulada en su interior junto con el Oxígeno respirado transformando este efecto en movimiento efectivo controlado a petición del cerebro.

En ciclismo, la eficiencia de la transposición de la actividad metabólica en ejercicio efectivo presenta varias diferencias individuales. Las variaciones en esta transformación a trabajo efectivo dependen de las características biomecánicas de cada individuo. Así podemos ver en el gráfico 3.6 cómo dos ciclistas diferentes tienen distintos rendimientos en función del volumen de Oxígeno aspirado:

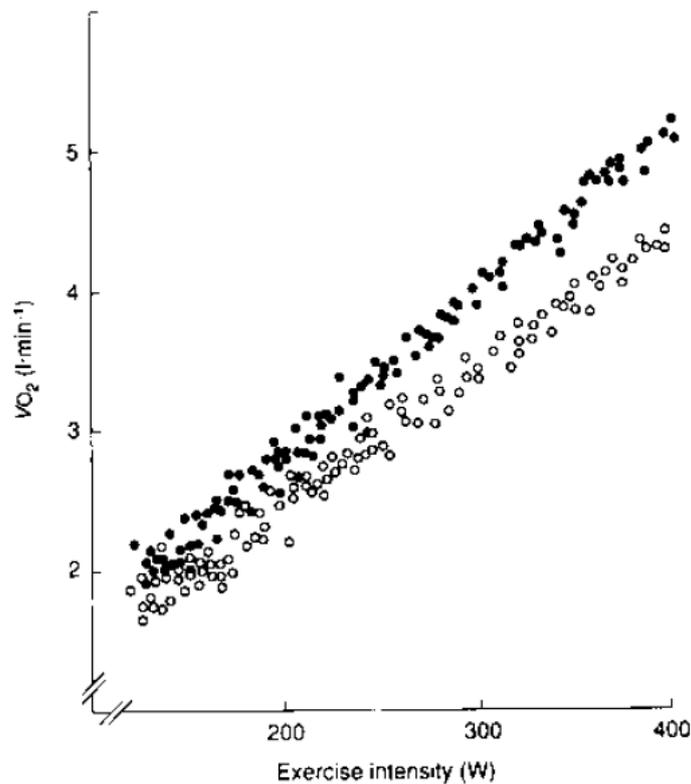


Gráfico 3.6: Potencia aportada por dos ciclistas y cantidad de O₂ aspirado por cada uno de ellos.

Los puntos negros se refieren a un individuo y los blancos a otro, ambos en un túnel de viento y con características físicas similares. La relación entre la potencia generada (EI) y el oxígeno consumido difiere entre ellos habiendo realizado el mismo ejercicio. Como se ve ilustrado a un mismo consumo por minuto de Oxígeno la cantidad de Watios suministrados son diferentes dando a entender que el metabolismo para crear la energía entre ambos indica que uno tiene más eficiencia que el otro.

3.4 Desde el trabajo útil a la velocidad aportada

Un ejemplo muy ilustrativo de cómo afecta la optimización de los recursos una vez que la energía exhortada por los músculos producen el giro de los pedales es la comparativa de

medios entre los pertenecientes a Eddie Merckx por los años 70 y Chris Boardman en los años 90.

En 1972 Eddie Merckx, en un velódromo de México D.F., trató de realizar marca en la prueba de la hora estableciendo un record de 49,43 kms durante esa hora. La bicicleta que utilizó no tenía ningún componente de mejora aerodinámica. Tres años después, el propio Eddie en un laboratorio de Colonia midió con un watímetro la potencia aportada durante un ejercicio de una hora llegándose a la conclusión de que logró una media de 455 W (Peronnet et al., 1991) dando una idea a los científicos y técnicos del esfuerzo que requiere el marcar un record de esas características. Veinticuatro años después, en 1996, Chris Boardman, equipado con una bici de diseño aerodinámico y en la denominada posición de superman con los brazos totalmente extendidos hacia delante, logró una distancia de 56,37 kms en una hora. En concordancia con lo indicado por su entrenador, quien constantemente pudo medir la potencia de Chris sobre la bici, la media aportada para lograr este record fue de 440 W, 15 W menos que Eddie Merckx pero más de 5 kms logrados por encima de éste.



Imagen 3.7: Eddie Merckx en el record de la hora de 1972



Imagen 3.8: Chris Boardman en el record de la hora de 1996.

La diferencia entre ambos records de la hora no tiene tanto que ver con la capacidad física para desarrollar potencia en las piernas si no con la capacidad de afinar la aerodinámica, el diseño de las características de la bici y el correcto acoplamiento del ciclista con la bicicleta.

3.6 Fuerza en la pedalada

Como se acaba de analizar en los anteriores puntos, el pedaleo consta comúnmente de varias zonas a lo largo de los 360° de giro en las cuales el rendimiento varía sustancialmente. Sin embargo el trabajo a lo largo de los kilómetros y la depuración de esta técnica puede llegar a hacer que el pedaleo no disponga de tanta varianza en su efectividad. “La musculatura de las piernas ha evolucionado para andar o correr. El gesto de pedalear, un movimiento circular en el aire en el que cada pierna hace lo contrario que la otra y sin impactos con el suelo, es absolutamente nuevo para un primate. Parece fácil, pero realizarlo con maestría necesita un aprendizaje muy largo.” (2)

Cuando las fibras musculares de nuestras piernas se contraen realizan un trabajo útil que supone alrededor del 20% de la energía que el cuerpo está gastando para desplazar la bicicleta, el resto de la energía que se produce se pierde en las funciones vitales, en forma de calor y/o superando la deformación de la transmisión de energía hasta la rueda o, más bien, hasta el neumático. Esta eficiencia puede mejorarse disminuyendo el despilfarro energético de diferentes maneras o en combinación.

Hay que considerar y evaluar la necesidad o no de esta mejora energética. Por ejemplo, si se consigue mejorar dicha eficiencia media de un 20% a un 22% se aumentará el rendimiento del recorrido realizado en nada menos que un 10%. En términos absolutos, si se trata de un ciclista medio capaz de aportar 200W de media en un recorrido de 60 minutos, aumentando 2 puntos su rendimiento, es decir un 10%, está pasando a poder realizar el mismo recorrido con una potencia media de 220W, o lo que es igual, realizar el mismo recorrido en 54 minutos. Este mismo ejemplo trasladado a la élite ciclista supondría arañar unos segundos en una etapa contrarreloj tras una mínima mejora en su rendimiento general.

3.7 Formas de mejora a nivel biomecánico

3.7.1. Entrenamiento: el gesto del pedaleo se automatiza en el aparato locomotor por la repetición diaria de forma que se va depurando hasta alcanzar casi la perfección con más o menos rapidez siempre y cuando se sea consciente de intentar realizar una mejora continua. A base de horas el organismo optimiza el movimiento.

3.7.2. Aplicar las fuerzas a los pedales correctamente: Esto es parte de lo anterior pero merece un comentario específico, pues es mucho más complejo y requiere toda una vida de aprendizaje. Se puede hacer mucho kilometraje pero si no se aprende a aplicar bien las fuerzas se desperdicia energía, se pierde eficiencia. No es nada fácil hacerlo bien puesto que en cada momento la fuerza debe aplicarse en direcciones distintas (pues el movimiento del pedalier es circular, no recto) y ser contrario para cada pierna (pues cada una realiza el movimiento opuesto de la otra). Las bielas deben moverse todo el tiempo con un movimiento exactamente perpendicular a su extremo para lograr una eficacia de la fuerza transmitida por la pierna del 100%. Como no son elásticas, la parte de la energía que por una desviación angular respecto a esos 90° se dirige a estirarlas o comprimirlas la perdemos. Aquí hay un importante margen de mejora para cada ciclista desde que aprende a aplastar los pedales en la infancia hasta que con pedales automáticos pueda conseguir un pedaleo tan redondo que pueda acercarse al 100% de eficacia.

En el cuadro contiguo puede verse la fuerza teórica desperdiciada cuando aplicamos la fuerza en direcciones ligeramente erróneas (durante toda la pedalada, lo cual es algo irreal y completamente teórico):

Error	Eficiencia	Tiempo perdido x Hora
5°	99,6%	24 segundos
10°	98,5%	90 segundos
15°	96%	2'24"
20°	94%	3'36"
25°	91%	5'24"
35°	82%	10'48"
40°	77%	13'48"
45°	71%	17'24"

3.7.3. Usar la cadencia apropiada. No existe un número de vueltas por minuto al pedaleo que sea el correcto o el más efectivo. La cadencia depende de muchos factores, sin embargo se pueden sacar ciertas conclusiones a base de experimentación y estudios biomecánicos.

Las cadencias adecuadas suelen estar acotadas dentro de un espectro de valores siendo considerado como:

70 – 80 rpm cadencias bajas

80 – 90 rpm cadencias medias

90 – 100 rpm cadencias altas

Bajo esta ubicación en lo que a los tipos de cadencias se refiere se puede hacer un análisis de qué cadencia llevar en función del tipo de características del recorrido, capacidad del ciclista y efectos en el aparato locomotor. No existe una metodología común que pueda garantizar una correcta frecuencia de pedaleo sin embargo sí pueden extraerse conclusiones evidentes y generales de los efectos que la cadencia puede tener a nivel biomecánico.

Cadencia alta: Los ciclistas profesionales pueden rodar constantemente a una frecuencia alta entre 90 y 100 rpm o más. Sin embargo para poder mantener este tipo de frecuencia hay que estar muy entrenado. En un ciclista de perfil medio lo habitual en estas condiciones es fatigarse, ir incómodo y disminuir consecuentemente el rendimiento. Por el contrario, bajo la condición de un entrenamiento específico el emplear una cadencia alta puede tener unas mejoras en el rendimiento porque reduce la fatiga neuromuscular (propiedades contráctiles musculares, excitabilidad muscular y el impulso nervioso), mantiene activa la actividad bioeléctrica (actividad eléctrica generada en nervios y músculos) y la fuerza muscular. También potencia el flujo circulatorio y ayuda a eliminar la concentración de lactato. Cabe decir que esta evidencia no es tan clara si dicha cadencia no se relaciona con una potencia alta. Si pedaleamos a 90 rpm y desarrollamos poca potencia el efecto puede ser contrario debido a la acumulación de lactato.

Cadencias muy altas por encima de las 100 rpm pueden reducir la potencia a medio y largo plazo, por lo que se deduce que cuanto mayor sea la distancia a recorrer menor debe ser dicha cadencia en caso de que se quieran mantener unas altas intensidades.

El mantener una cadencia de pedaleo alta permite mejorar en cierta medida la técnica del pedaleo redondo dado que la resistencia de la pedalada es menor que con cadencias más bajas, lo que permite que durante los puntos críticos de pedalada (PMS y PMI) y durante la zona de ascensión la ayuda que se proporciona de empuje horizontal y vertical respectivamente aporta mayor equilibrio y sumatorio total de carga al global de la pedalada además de dar una mayor estabilidad durante el recorrido dado que las inercias producidas en las piernas están más compensadas.

Cadencia baja: La economía de pedaleo, entendida como la relación entre el máximo rendimiento y el mínimo consumo energético, será generalmente mayor cuanto más baja sea la cadencia. Dada una potencia, el consumo de oxígeno y el incremento de la frecuencia cardiaca son menores a cadencias comprendidas entre 60 y 70 rpm que entre 80 y 90 rpm. Por consiguiente se puede presuponer que al tener cadencias bajas se ahorra energía sin embargo hay estudios que deducen que una baja cadencia implica derrochar energía por fibras musculares en estado anaeróbico las cuales no oxidan bien el combustible muscular. Consecuentemente el agotamiento se presentaría antes si el ritmo de pedaleo es el clásico "atracamiento" al que los ciclistas hacen referencia.

Además, las bajas cadencias, como se analizará más adelante, pueden producir una reducción del rendimiento mecánico además de un deterioro de la propia bicicleta al estar abusando de tensiones demasiado altas en la transmisión. También puede, o por este mismo motivo, tener consecuencias negativas a nivel óseo y muscular.

Cadencia media: Tras lo expuesto en los dos anteriores puntos es de esperar que se concluya con que la mejor opción para un mayor rendimiento sobre la bicicleta es la de utilizar una cadencia de pedaleo media, es decir, entre 80 y 90 rpm. Sin embargo tras analizar varias conclusiones de diversos estudios tal y como se ha expuesto, no hay una respuesta clara a esta cuestión.

Se pueden extraer una serie de conclusiones con las que analizar y crear una metodología personalizada para saber el rendimiento que cada usuario puede llegar a utilizar optimizando así su pedaleo:

- La cadencia de pedaleo es algo personal dependiendo de muchas variables como las físicas, fisiológicas o genéticas. Por ejemplo, una de las conclusiones que se pueden obtener a nivel fisiológico es que para ciclistas con unas piernas largas puede ser conveniente, por estabilidad de pedaleo y reducción de gasto energético al mover más masa por pedalada y por lo tanto más inercia que otro usuario de tamaño medio o bajo, el utilizar preferentemente cadencias más bajas.

- Lo lógico y recomendable es que un ciclista mantenga su cadencia óptima de pedaleo a lo largo de un recorrido independientemente de las condiciones externas. Una vez se empieza a dar pedales, tras el entreno, el estudio y las sensaciones del día, parece lo más óptimo que, manejando los sistemas de cambio adheridos a la bicicleta, el usuario haga uso de ellos para mantener una cadencia constante dentro de unos intervalos límite marcados, es decir, si un usuario se siente cómodo a 92 rpm lo mejor es que trate, a partir de las marchas de desmultiplicación del sistema de transmisión, mantener esas 92 rpm durante toda la marcha, contando con el efecto del cambio de viento, subidas, bajadas, llano, adherencia del terreno, etc. Los sistemas más comunes de cambios no permiten mantener

esas 92 rpm de forma continua pero sí permiten mantenerse en un rango que permita no bajar ni subir bruscamente ese valor. Cuanto más tupido sea el sistema, es decir, cuantos más pasos intermedios de cambio o desmultiplicación tenga, menos se alejará el usuario durante el recorrido de su cadencia óptima.

- La experiencia en el ciclismo está directamente relacionada con la cadencia de pedaleo. A mayor grado de entrenamiento y práctica ciclista más elevada puede ser la cadencia.

- Las cadencias altas son las más óptimas para reducir la fatiga muscular siempre y cuando el usuario tenga un nivel de entrenamiento apto para mantenerlas durante un periodo de tiempo relativamente largo.

- Por el contrario, si el objetivo es maximizar la potencia la cadencia debe ser menor.

- La distancia recorrida está inversamente relacionada con la cadencia. Si la prueba objetivo es de corta duración lo más conveniente pueden ser cadencias igual o superiores a las 100 rpm. Si la prueba es de larga distancia la cadencia más óptima ronda las 80 rpm. Y por último, en el caso de la ultra-resistencia parece que la más conveniente está asociada a las 60-70 rpm

3.7.4. Pedaleo redondo. Hay que aprovechar la mayoría de los puntos del recorrido de la biela para aplicar fuerza. Procurar que la velocidad de rotación del pedalier sea uniforme, no a pistón. El pedaleo redondo no implica aplicar la misma fuerza en todos los puntos, eso es imposible fisiológicamente pero hay que intentarlo: cuando se aplica más fuerza en unos puntos que en otros (en una fuerte rampa por ejemplo) la rueda varía de velocidad y hay que acelerarla a cada paso, un pequeño derroche de energía. ¿Puede un ciclista aplicar la misma fuerza durante los 360 grados del pedaleo? Sin duda, no. Puede mejorarse el pedaleo, pero tiene un límite fisiológico, ya que el alto poder de los músculos implicados cuando las bielas indicarían las 9h 15' en un reloj (es decir, horizontales) no tiene comparación con la incomodidad de usar los músculos que actúan a las 6h (con las bielas verticales). En comparación, los nadadores no pretenden impulsarse igual durante todo el ciclo de la brazada. En lugar de ello, modifican la posición de un brazo respecto del otro para adaptarse a las posibilidades de su musculatura. Pero el ciclista lo tiene más difícil que el nadador. Fijado a las bielas tiene menos margen de maniobra, aunque existen determinadas aplicaciones sobre los sistemas de transmisión que tratan de mejorar o, más bien, equiparar en la medida de lo posible la carga que las piernas ejercen sobre los pedales durante todos los puntos del ciclo.

3.7.5. Diseños en los pedales / Platos ovalados. La perfección en el gesto del pedaleo es tan sutil que aunque los profesionales se atreven a cambiar tijas, cuadros, sillines o manillares, raramente tocan lo que afecta a lo más importante: el gesto del pedaleo.

Esta es una de las razones que dificultaron el uso profesional de los platos ovalados, el rotor o las bielas de otras longitudes y/o formas. Cierto es que aplicar este tipo de sistema de mejora del reparto en la pedalada implica un cambio de hábitos a la hora de pedalear, además no siempre en todos los terrenos puede que sea beneficioso dado que, por ejemplo, puede ser que en terrenos llanos y de relativa larga duración el efecto de pedaleo redondo se reduzca debido a la fatiga, física y mental, y al intento de ahorro de energía consciente o inconsciente.

El variar la longitud del eje pedalier, es decir la distancia entre pedales, o la longitud de las bielas puede tener un beneficio o detrimento durante el pedaleo en función de las características biomecánicas del ciclista y de las necesidades puntuales que busque. Así el reparto de la tensión sobre la cadena se realizaría de forma diferente y que las inercias de movimiento de las piernas influyan decisivamente en ello.

Desde el origen de la bicicleta se buscaron formas de mejorar la efectividad del pedaleo haciendo modificaciones y variantes singulares tal y como bielas no directas al pedalier y/o combinaciones con platos ovalados...



Estos sistemas de bielas “desdobladas”, comercializadas desde finales del siglo XIX, llegaron a ponerse en práctica incluso en circuitos profesionales en los años 70 aunque finalmente, y hasta el momento, se ha desechado su uso por falta de aporte.

Interesante el sistema sacado por Campagnolo de pedales amortiguados para aportar sobre la cadena una continuidad en el tense. Una idea interesante dado que, como se indica en el *anexo 1*, la eficiencia de la cadena depende positivamente de la baja alteración de su

tensión durante el ciclo de uso. Con esos amortiguadores los picos de carga se transmiten al plato de forma progresiva. En este caso el exceso de peso y las pérdidas por elasticidad no llegan a compensar la mejora de efectividad en la cadena por lo que su uso terminó pronto.

Merece la pena hacer un inciso en los sistemas de plato ovalado, los cuales son capaces de variar el par de salida hacia la cadena en función del ángulo de giro del plato al acortar o alargar el momento aportado modificando el radio, o distancia, desde el eje pedalier al diente actuante durante el ángulo de giro de los platos.



Imagen 3.9: Plato ovalado

El concepto fundamental de este tipo de platos es el de repartir en la cadena lo más equitativamente posible las diferentes cargas aportadas durante la pedalada por el usuario en función del ángulo de giro del eje pedalier tal y como se indica las gráficas 3.10 y 3.11. A lo largo de estos 360° de ángulo, tal y como se ha descrito, la fuerza varía dado que hay zonas más propicias para ejercer un mayor par.

De lo que se trata con el sistema de plato ovalado es de mantener en lo posible una tensión en la cadena lo más constante posible. Viendo la tabla 3.10 se denota una parte de carga efectiva durante la pedalada y otra parte resistente debido a la inercia, difícil de evitar, al subir el pedal (y la pierna) hacia el PMS. De esta manera la tensión conducida hasta la cadena también dispondrá de picos de carga.

Sabiendo entonces que el par aportado por el usuario contiene esta variabilidad constante y habiendo ubicado donde se encuentran estos picos de fuerza se actúa sobre el plato para aumentar la tensión sobre la cadena cuando la carga aportada es menor y disminuyéndola cuando la carga es mayor. De esta manera se consigue una potencia transmitida sobre la rueda más constante, con menos picos. Esta teoría puede analizarse gráficamente tal cual continúa:

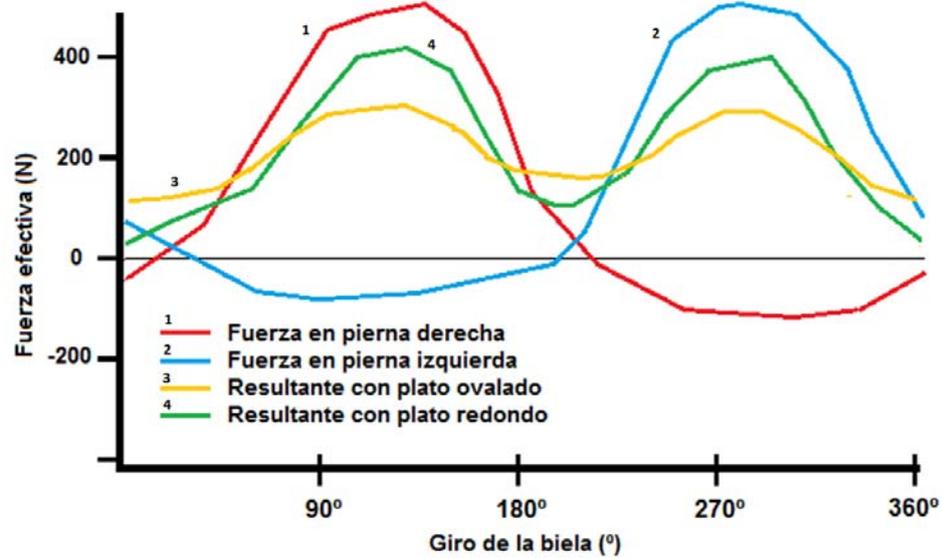


Gráfico 3.10: Comparativa de la fuerza efectiva resultante de pedaleo con plato redondo y fuerza efectiva resultante de pedaleo con plato ovalado.

En este gráfico 3.10 se ve como, de forma teórica, la potencia final resultante de ejercer pedaleo con un plato redondo tiene más picos de fuerza, tanto crestas como valles, que la resultante de ejercer el pedaleo con platos ovalados. Las líneas de fuerza de cada una de las dos piernas se refieren a la fuerza ejercida sobre la biela, mientras que las líneas resultantes indicarían la fuerza resultante de la suma de ambas piernas a lo largo de los 360° de giro de la biela con efecto sobre la cadena.

El efecto del plato ovalado se entiende gráficamente a través del siguiente esquema:

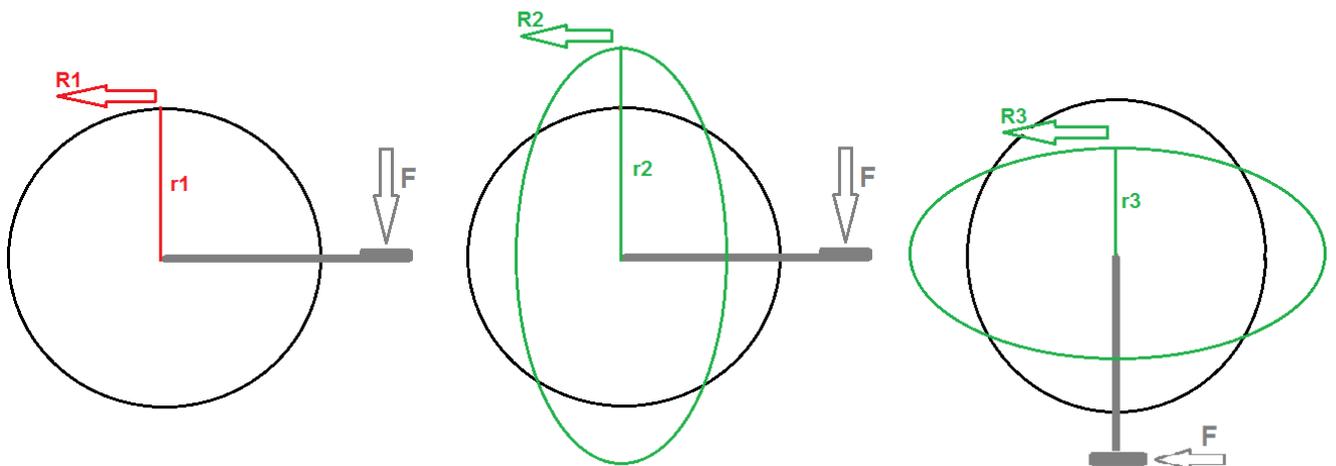


Gráfico 3.11: Comparativa de cargas resultantes sobre la cadena (R) de un plato redondo (izquierda, biela 90°) frente a un plato ovalado en sus dos posiciones extremas (centro, biela 90° y derecha, biela a 180°).

Donde r_1 y R_1 son el radio y la fuerza resultante respectivamente sobre la cadena para un plato redondo y r_2 y r_3 el radio máximo y radio mínimo para un plato tipo óvalo perfecto con R_2 y R_3 como sus respectivas resultantes tras aplicar una carga F sobre el pedal.

Si se entiende que $r_2 > r_1 > r_3$ y suponiendo que F es igual en los tres casos, igualando momentos en cada caso se puede afirmar que $R_3 > R_1 > R_2$. Si esta suposición fuera real, según el *gráfico 3.10* la línea de resultante con plato ovalado tendría una forma invertida a la indicada, es decir, los valles serían picos y los picos valles o en otras palabras se aplicaría más fuerza sobre la cadena y consecuentemente sobre la rueda con la biela a 180° que con ella a 90° . Pero como esta suposición no es correcta dado que la máxima carga aportada por el usuario se da alrededor de los 90° de la biela se entiende cómo el *gráfico 3.10* está dando unos valores de reparto de la carga con un equilibrio lógico dada la potencia teórica del usuario.

Se logra con todo este despliegue dos consecuencias claras teóricamente positivas:

- **Mejora en el rendimiento de la cadena:** como se puede ver en el *anexo 1* del presente para la selección del tipo de cadena y su rendimiento, existe un factor de rendimiento de la cadena relativamente importante. En el presente trabajo se denomina K_3 y es el factor de servicio el cual depende de la constancia con la que trabaja la cadena. Cuanta mayor constancia es decir, menos picos de tensión se den, el rendimiento será mayor, siempre y cuando se hable de un total de carga aportada equivalente. Por otro lado, y como también se verá más adelante en el presente, el rendimiento de la cadena varía en función de la variabilidad de su tensión de trabajo entre otros. Si se logran reducir los picos de carga la tensión a través de los platos ovalados el rendimiento se va a ver mejorado.
- **Mejor adherencia del neumático:** El repartir la tensión en la cadena es equivalente a repartir el par de giro en el neumático. Esto es muy positivo a la hora de hacer una ascensión por terreno poco adherente porque se evitaría, siempre mediante un pedaleo redondo y equilibrado, que durante la pedalada o, más bien, la parte de la pedalada con mayor carga ($+90^\circ$), el neumático supere el límite de adherencia y derrape con las consecuencias negativas que esto supone. Por otro lado este mismo efecto hace que el neumático tenga menos deformaciones por lo picos de carga lo cual supone de igual manera una mejora en el rendimiento.

En cualquiera de los casos, y como ejemplo, de 9 estudios experimentales, más o menos fiables unos que otros, 4 indican una ligera mejora en el rendimiento global del pedaleo y 5 indican que no existe diferencia alguna entre el sistema de transmisión con plato redondo frente al de plato ovalado (o similar forma perimetral). A tener en cuenta que ninguno de ellos indica que el rendimiento se empeore lo cual es bastante significativo.

Otro ejemplo interesante de indicar es que apenas un 2% del pelotón UCI pro-tour, es decir, los ciclistas de ruta profesionales, llevan implantado el sistema de platos ovalados. Sin embargo dos de los referentes mundiales *Bradley Wiggins* y *Chris Froome* llevan el sistema de platos ovoides tipo "*O-symetric*" instalado. El primero de ellos, tras ganar el Tour de Francia volvió a utilizar los platos redondos y llegó a convertirse en campeón del mundo contra el crono. Elocuente y significativo dato.



Imagen 3.12: sistema de platos tipo "O-Symetric" usado por C. Froome

Este sistema de platos ovalados o más bien ovoides de la *imagen 3.12*, usado por *C. Froome* y comercialmente denominado "*O-Symetric*" trata de afinar más el rendimiento teórico de los platos tipo óvalo. El perímetro de la corona es irregular, no tiene el perfil de polígono regular definido, si no más bien una serie de radios concatenados cuyo perfil busca afinar a lo largo de cada ángulo de giro de la biela su distancia al eje pedalier óptimo y progresivo que permita obtener una descarga de tensión a la cadena lo más optimizada posible para este reparto de cargas dado a lo largo del pedaleo.

Lo que queda patente tras este análisis es que los platos ovalados adquieren sentido cuando el usuario va a realizar una pedalada redonda, marcando bien las pautas para que la biela obtenga una carga constante, mayor o menor, a lo largo del giro del plato. De otra forma, si el reparto no es muy bueno el resultado con este sistema va a ser negativo. De forma gráfica y como ejemplo, un plato ovalado de 32 dientes actúa como un plato de 34 con la biela a 90° y como un plato de 30 dientes con la biela a 180° . Si el usuario no ejerciera bien el pedaleo redondo sobre este plato es como si actuara de una forma más o menos constante con un plato de 34 dientes siendo que el instalado es de 32. Esto es la ineficiencia ejemplificada.

También se escuchan corrientes que indican una posición del pedalier diferente a la indicada e incluso puede darse el caso de quien utiliza los ovalados con la biela desplazada 90° respecto a lo indicado basando su teoría en que la propia inercia del movimiento ya adquirido ayuda a mover la transmisión durante el PMS o PMI.

4. SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Como ya ha sido descrito previamente, el sistema de transmisión es aquel que convierte el movimiento circular de las piernas del ciclista en movimiento de rotación sobre el sistema de desplazamiento o sobre las ruedas.

El sistema más común y generalizado y del que básicamente se parte para su análisis en el presente Trabajo Fin de Máster es el que combina pedales conectados a través de las bielas a los platos dentados y que a su vez mueven una cadena metálica compuesta por eslabones interconectados por pernos sobre los cuales sus eslabones (malla interior y malla exterior) pivotan. No es el único sistema de conexión si no que además se estilan conectores como la correa o el eje torsor los cuales son analizados y comparados con el sistema de transmisión por cadena.

En conexiones por medio de cadena y correa la tensión se transmite por el tramo o vano superior llegando a los piñones en los que crea un momento de fuerza que hace a su vez girar el eje de la rueda trasera.

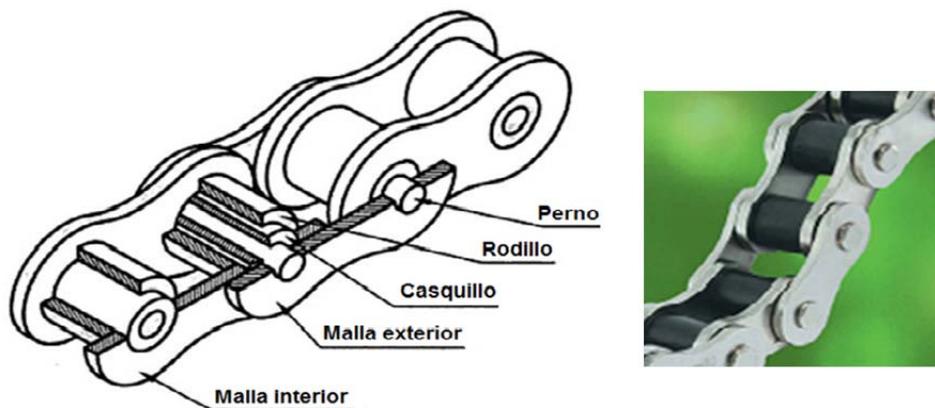


Imagen 4.1: Detalle de la composición de la cadena.



Imagen 4.2: Detalle de correa.



Imagen 4.3: detalle de transmisión por eje de torsión

El sistema de transmisión más común en la actualidad es el que lleva cadena metálica tal y como se aprecia en la imagen contigua:



Figura 4.4: Sistema de transmisión común a través de cadena.

Este tipo de transmisión no solo puede ser el canal a través del que la fuerza de las piernas llega hasta la rueda si no que también puede contribuir dinámicamente a mantener la continuidad en la cadencia de pedaleo en función de las necesidades del ciclista gracias a su sistema de desmultiplicación. En función de la potencia que se necesite aplicar a la rueda motriz el número de pedaladas por vuelta completa de rueda puede desmultiplicarse en un

número mayor o menor de giros en el pedalier. Esto es posible gracias a un subsistema que forma parte del propio sistema de transmisión denominado “cambio” o, más comúnmente y traducido del inglés o francés de forma literal, “velocidades”.

4.1 Eficiencia de la transmisión

Volviendo sobre la ecuación del movimiento expuesta en el *punto 3.1* un sistema de transmisión siempre va a tener una ineficiencia acumulada antes de llegar hasta la rueda motriz.

La ineficiencia en la transmisión se transmite fundamentalmente a través de tres eslabones: rozamiento en cojinetes o rodamientos, pérdidas a través de cadena o conector de plato con piñón y deformación en bielas y eje pedalier.

4.1.1 Pérdidas de energía por fricción en los cojinetes o rodamientos

Existen varias posibilidades para apoyar el eje de rotación de cualquier elemento divididos básicamente en dos grupos: Cojinetes y rodamientos.

En una bicicleta los cojinetes de fricción autolubricados no se estilan al tener varios inconvenientes que por definición les alejan de su montaje en este tipo de usos: Son sensibles a los golpes y a los aumentos de carga bruscos, son relativamente ruidosos, se deterioran excesivamente con la suciedad y requieren de un montaje y mantenimiento muy precisos.

Dentro de los rodamientos se pueden distinguir dos tipos, abiertos o sellados. Para el giro de las ruedas existe una controversia en la que ciertas marcas como *Shimano* y *Campagnolo* todavía siguen usando los clásicos rodamientos abiertos para formar sus “*Cup and cone bearings*” mientras que lo más común entre la mayoría de las restantes marcas es utilizar rodamientos sellados de carga centrada por su bajo coste, resistencia y bajo mantenimiento (4).



Figura 4.5: rodamientos de bicicleta

La mayoría de los rodamientos sellados utilizan sellos de goma que encajan a lo largo de las muescas de perimetrales realizadas tanto en el anillo exterior como en el interior, impidiendo con ello que la suciedad y el agua penetre en su interior deteriorando a los propios rodamientos lubricados que son los que van a permitir el movimiento relativo entre ambos anillos.

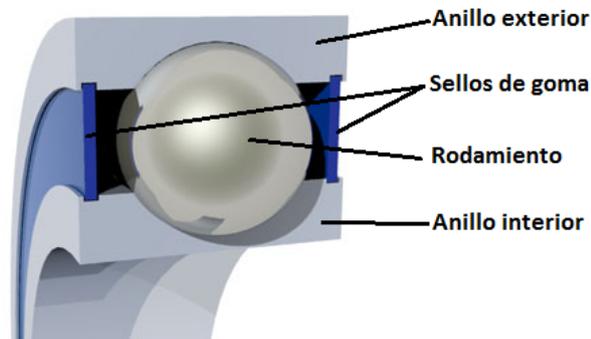


Figura 4.6: Rodamiento sellado / Sección

Los rodamientos sellados tienen varias ventajas frente a los abiertos. Son más ligeros (debido a que las bolas y los recorridos son más pequeños), son menos costosos y tienen un alto nivel de calidad debido al alto número que se hacen de ellos.

Se realizan rodamientos generalmente metálicos de alta resistencia, sin embargo los cerámicos se están haciendo cada vez más populares debido al aumento de su rendimiento. Es prácticamente imposible mejorar el rendimiento de los rodamientos basándose en la mejora de las bolas o en la reducción del recorrido ya que a día de hoy son muy eficientes de por sí. Lo que los rodamientos cerámicos aportan es un menor contacto de los sellos (incluso se pueden eliminar) y permiten utilizar lubricantes más ligeros lo que finalmente resulta en un menor rozamiento y resistencia al movimiento.

Generalmente hay dos tipos de rodamientos usados en bicicletas – de contacto radial o contacto angular. Los angulares tienen recorridos que hacen contactar ambos anillos con las bolas con un ángulo no perpendicular al suelo teórico en posición vertical. Los radiales por el contrario contactan de forma perpendicular.

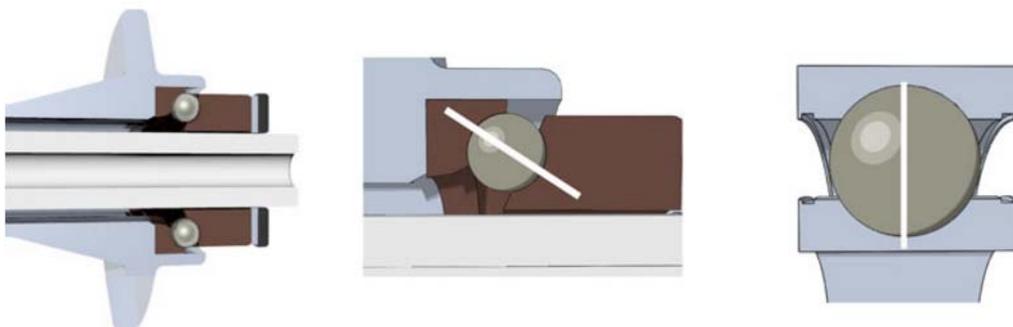


Figura 4.7: Conjunto de rodamiento abierto (cup and cone) / Sección de rodamiento abierto indicando el contacto angular / Sección de rodamiento cerrado con contacto radial

Una ventaja indicada por ejemplo por Shimano justificando el uso por su parte de rodamientos abiertos con carga angular es que el reparto de las cargas durante un momento de inclinación de la bici es más repartido en este tipo de rodamientos que en los industriales o sellados. La imagen inferior hace referencia a este comentario:

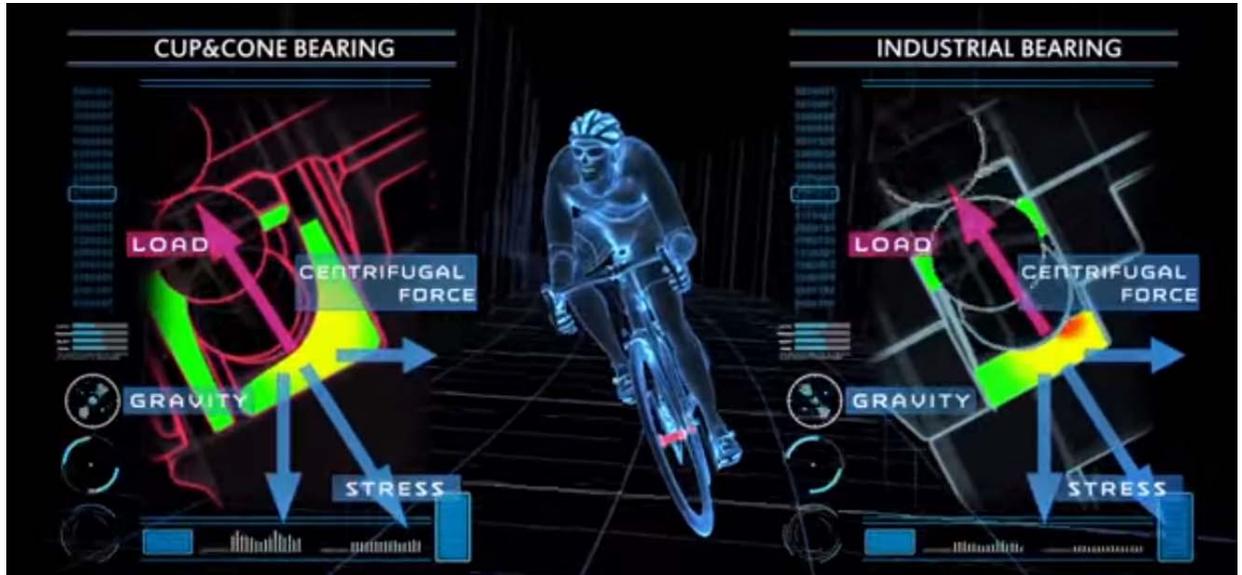


Imagen 4.8: Reparto de cargas en rodamientos abiertos angulares y sellados radiales.

Según la gráfica se da a entender que en el lado de los rodamientos industriales, al estar preparado para cargas radiales y por tanto simétricas, una asimetría en el reparto de cargas debido a inclinación por curva y los consecuentes redistribuciones y la fuerza centrífuga generada, supondría una sobrecarga en la zona lateral, al contrario que lo que sucedería con los rodamientos de carga angular que parece no se verían afectados negativamente por esta situación.

Los rodamientos angulares pueden ser ajustados lo cual tiene sus ventajas y desventajas. Bien, por supuesto porque el usuario los ajusta correctamente a su criterio. Malo porque cuando tensas el buje de la rueda (eje) el control sobre el ajuste final queda en cierta medida supeditado al azar a menos que se tenga una gran experiencia.

Dadas estas opciones casi todos los usuarios al final sobrecargan los rodamientos en un intento de ajustar el juego lateral en el eje. Se supone que el juego ha de ser suprimido en el eje de las ruedas (como en todos los ejes) sin embargo, para rodamientos abiertos, un pequeño juego es bueno dado que con ello permitimos que los rodamientos trabajen y rueden en buenas condiciones y consecuentemente se mejore su rendimiento. Ciertamente es que este juego para casi todos los usuarios, efectivamente es sinónimo de mal ajuste y de penetración de agua y suciedad con lo cual poseerían menor durabilidad.

Según los tests realizados por *Danh et al. (1991)* y *Kyle (1988)*, y sin tener en cuenta el efecto indicado de fuerzas centrífugas o los pros y contras previamente indicados, los mejores rodamientos en lo que a menor rozamiento son los sellados y lubricados con aceite de baja densidad (1).

4.1.2 Pérdidas de energía en el medio conector de plato con piñón.

La conexión entre el plato unido a los pedales y los piñones que unen la rueda trasera puede ser fundamentalmente por medio de tres tipos de sistemas: Cadena de eslabones de una línea, correa o eje torsor.

El rendimiento obtenido de cada uno de estos depende de varios factores, es decir, aunque las pérdidas existen siempre, la cantidad de Watios desperdiciados para superar la ineficiencia de los tres sistemas puede ser mayor o menor en función de unos modelos u otros, un mantenimiento correcto o incorrecto e incluso del uso aportado por el ciclista.

Para poder valorar estadísticamente como varía este rendimiento, a parte de las sensaciones del usuario, se realizan tests en laboratorios cuyos resultados están acotados a unas circunstancias determinadas. Los tests servirán como base para formular valoraciones de cada situación y llegar a un compendio del total de ellas para, en teoría, adoptar la mejor opción en cuanto a rendimiento y tipo de uso del ciclista, sin embargo da la sensación de que el conjunto de todas las características acontecidas durante el pedaleo normal es imposible de reflejar a pesar de todos los estudios.

No se ha de interpretar estos comentarios como que los tests realizados en laboratorios son inútiles. Todo lo contrario. Lo que se pretende con estos tests es tener una idea clara de cómo dar uso correcto del pedaleo y sobre todo comparar y justificar el uso de unos componentes u otros poniendo en evidencia datos totalmente objetivos con los que valorar cada uno de ellos. Sin embargo hay muchos factores trascendentes en el pedaleo que en estos no son valorados por lo que el resultado quedará siempre sesgado en mayor o menor medida. Ahí es donde entra en juego la capacidad de valoración del usuario o del ingeniero. Por poner un ejemplo en referencia a esto y adelantando lo que se tratará en los siguientes puntos:

El rendimiento de una transmisión por correa, en los tests realizados bajo ciertas circunstancias, es menor que en una cadena (ambos casos en condiciones equiparables de uso), es decir, se pierde menos energía por el sistema de cadena que por el de correa a la hora de pedalear. Sin embargo, el peso del sistema de correa puede rondar la mitad de la transmisión por cadena. Si esto es así ¿Cuál de los dos es más rentable a la hora del uso real?

4.1.3. Pérdidas por deformación en bielas y eje pedalier

En puntos previos sobre la biomecánica del pedaleo se ha tratado el problema de la ineficiencia del usuario a la hora de pedalear dado que es común e inevitable el cargar la biela con componente compresiva o de tracción. Y es que parece ser prácticamente imposible que las piernas transmitan constantemente la carga de pedaleo completamente perpendicular a la biela lo cual sería, mecánicamente, la máxima eficiencia aportada.

Aun así la perfección de los materiales es limitada y como es previsible el efecto de carga de pedaleo, por muy perpendicular que sea, tiene un efecto de flexión y consecuente deformación tanto sobre la propia biela como en el eje pedalier (aportado por la pierna

izquierda) y en el plato dentado a través también de sus radios de conexión. Además el eje pedalier llevará asociado un rozamiento aportado por los rodamientos.

De estos tres efectos se consideran de forma común despreciables dos de ellos (deformación en bielas y plato dentado) mientras que el efecto de torsión del eje pedalier se puede tener más en cuenta a la hora de representar la eficiencia de la transmisión:

- Deformación de las bielas y plato dentado: El efecto de flexión de estos componentes es irremediable, siempre va a existir. Sin embargo la pérdida de energía en deformar estas piezas se puede reducir hasta ser despreciable diseñando una perfilaría con alta inercia y alto límite resistente del material utilizado. Esto podría afectar al peso final de la bicicleta lo cual será analizado en capítulos posteriores.
- El eje pedalier ha de transmitir la fuerza aplicada por la pierna opuesta al plato dentado. Este es un efecto de torsión que implica cierta deformación en el mismo con lo cual la carga que va a llegar finalmente hasta la cadena siempre será menor que la que llega desde la pierna con la biela directamente conectada a la corona o al plato dentado.

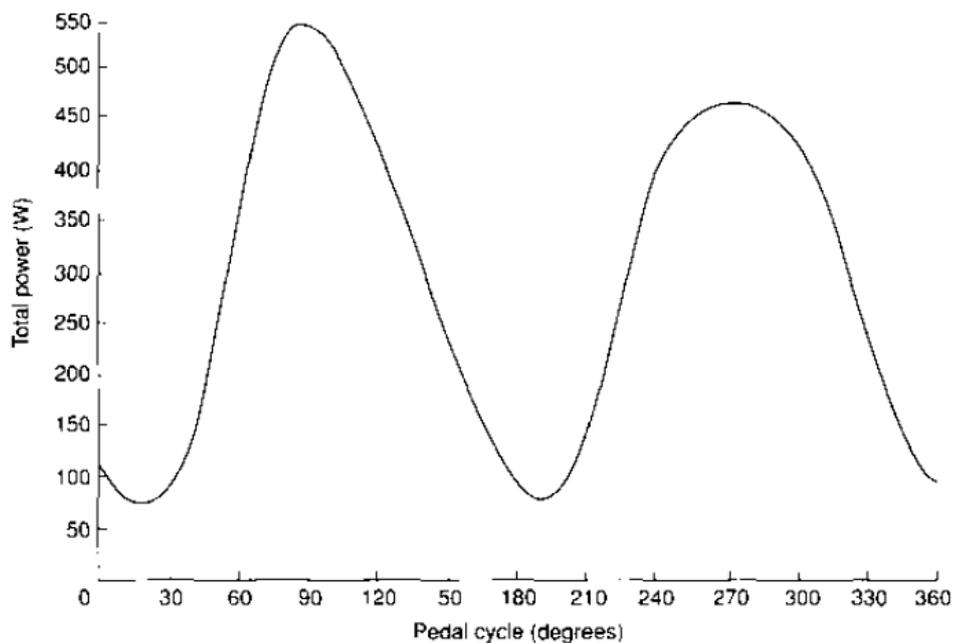


Gráfico 4.9: Potencia transmitida a la cadena por pierna derecha (pico a 90°) y por pierna izquierda (pico a 270°)

La gráfica indica la potencia que se transmite a la cadena durante una pedalada completa (300W de media y a 100 rpm) a través de ambas piernas. Los primeros 180° corresponden al efecto causado durante el descenso de la pierna derecha (desde 0° a 180°) mientras que los restantes grados (desde 180° a 360°) corresponden al descenso de la izquierda. Se ve claramente como el pico de fuerza transmitida es inferior en la pierna izquierda debido fundamentalmente a paso de la carga a través del eje pedalier. Las pérdidas están en torno a un 10% de una pierna a la otra.

Este efecto puede reducirse procurando un diseño de eje pedalier lo más corto posible y un eje lo más rígido posible a la torsión (materiales y/o perfil). Esto último podría afectar en un aumento de peso con las contraprestaciones que esto conlleva. El efecto que los rodamientos tienen es el mismo para ambas piernas y también podría considerarse prácticamente despreciable si están en buenas condiciones.

4.2 Transmisión por cadena

4.2.1 Eficiencia de la cadena

El sistema de cadena por eslabones metálicos es el más extendido de los tres nombrados. Su eficiencia depende de factores diversos. A finales de la década de los '90 investigadores de la *Universidad Johns Hopkins* realizaron estudios acerca de la eficiencia de las transmisiones utilizadas en bicicletas.

El equipo dirigido por el profesor *James Spicer* (5) utilizó un mecanismo basado en un freno electromagnético simulando la carga del piñón y un motor eléctrico para simular el pedaleo del ciclista midiendo el torque y la velocidad angular en ambos ejes a fin de calcular la potencia recibida y emitida respectivamente. La relación entre ambas es la eficiencia mecánica de la transmisión:

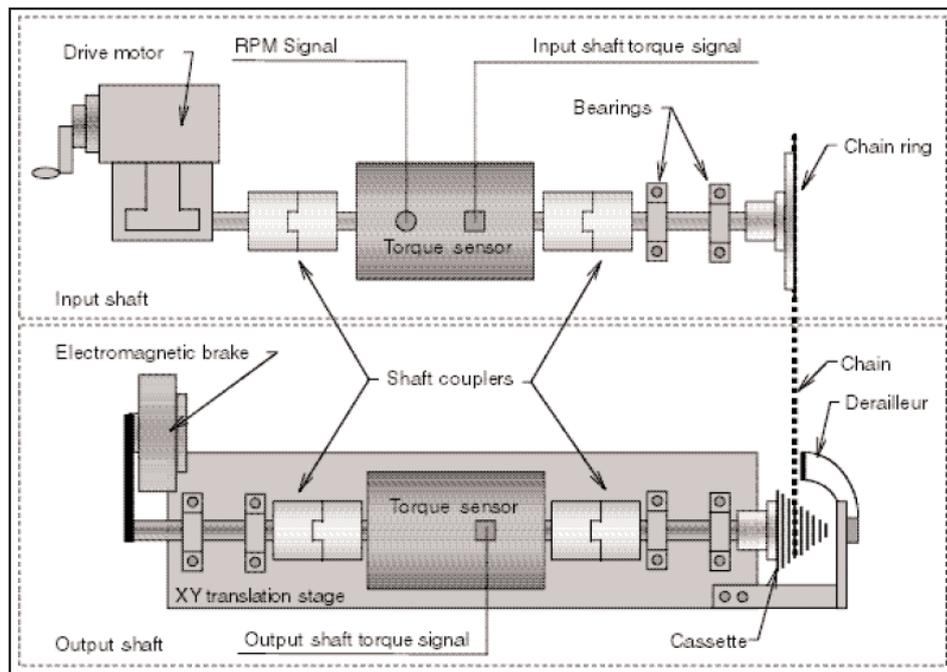


Imagen 4.1: sistema utilizado para la medición de las pérdidas de eficiencia de la transmisión por cadena.

$$\text{Eficiencia\%} = 100 \cdot (\text{Potencia medida en el eje de la rueda trasera}) / (\text{Potencia medida en el eje pedalier})$$

Adicionalmente utilizaron filmación infrarroja para analizar los cambios de temperatura y tratar de identificar el origen de las pérdidas de energía.

En las pruebas utilizaron una transmisión *Shimano Dura Ace* convencional y realizaron mediciones a diferentes potencias, cadencias y multiplicaciones incluyendo diferentes lubricantes de cadena.

Los resultados fueron publicados en el *Journal of Mechanical Design* bajo el título *Effects of Frictional Loss on Bicycle Chain Drive Efficiency*.

La siguiente tabla muestra como varía la eficiencia en función de la multiplicación utilizada. La relación 52-15 se obtiene con una línea recta de cadena mientras que las combinaciones 52-11 y 52-21 implican un cierto cruce de la cadena utilizando el cambio. La tabla contigua indica los resultados obtenidos en función de la potencia y las RPM y la combinación de plato/piñón:

	50 RPM 100 W	60 RPM 100 W	70 RPM 100W	60 RPM 150 W	60 RPM 175W
52-11	92.5	91.1	88.7	94.6	95.5
52-15	94.7	92.3	90.4	96.2	97.5
52-21	95.2	93.8	92.0	97.4	98.2

La eficiencia medida es relativamente elevada, superior al 90% en la mayoría de los casos y en el orden del 97-98% a potencias “razonables”.

Los investigadores encontraron que la eficiencia de la transmisión está linealmente relacionada con el inverso de la tensión de la cadena (a mayor tensión de la cadena las pérdidas son menores) al igual que parece ser más eficiente una cadena a menor velocidad de rotación.

Un aspecto interesante es la relación entre la eficiencia y la cantidad de dientes del piñón: el uso de piñones más grandes produce menos pérdidas de transmisión que los pequeños, relacionado con un menor movimiento angular de los eslabones de la cadena al seguir una circunferencia menos reducida.

Por ejemplo si se tiene la opción de rodar en 53x19 o 39x14 que producen el mismo desarrollo las pérdidas de transmisión serán menores en 53x19.

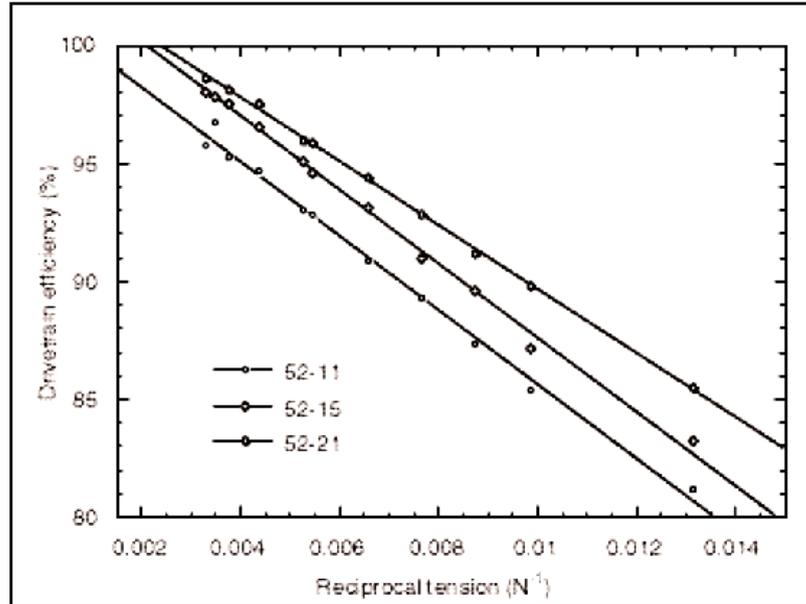


Gráfico 4.2: Relación entre fuerza aplicada en plato y eficiencia con la que la cadena la transmite hasta el piñón en función del tamaño de este.

La conclusión que obtiene *James Spicer* en su estudio (5) deja ciertos aspectos indeterminados:

El efecto “cruce de cadena” es la situación habitual en la que la cadena tiene tanto a la salida del plato como la entrada del piñón cierto ángulo diferente de 90° , igual para ambos casos, respecto del eje de giro de los mismos, en otras palabras, el plano donde se ubica el plato y el plano en el que se ubica el piñón engranados no son coplanares (aunque sí son paralelos). El estudio de *J. Spicer* no deja claro cual es el valor del “Offset” tomado para hacer el test. Sin dar ese ángulo concluye con que el efecto del “cruce de cadena” no tiene apenas relevancia en comparación con el diámetro del piñón movido o con la velocidad de la cadena. Lo cierto es que existe mucha controversia por parte de los usuarios acerca de este tema.

Otros temas que van a afectar a la eficiencia de la cadena y que *Spicer* no analiza o no amplía y que parecen de uso común son los efectos por las diferentes combinaciones de plato/piñón, pérdidas por la propia composición de la cadena, efectos de la lubricación, la suciedad, la elasticidad o la deformación por apoyo sobre los dientes. Todos ellos se convierten por tanto en inquietudes que son analizados en los siguientes puntos apoyados en estudios experimentales realizados por *James Smith* del laboratorio *Friction Facts* en *Colorado (EE.UU.)*.

4.2.1.a. El cruce de cadena

El “cruce de cadena” se da de forma habitual durante el uso normal debido al sistema tradicional de cambio de piñones y platos. La cadena se desplaza axialmente a su dirección de rotación en función del plato o piñón sobre el que engrane.

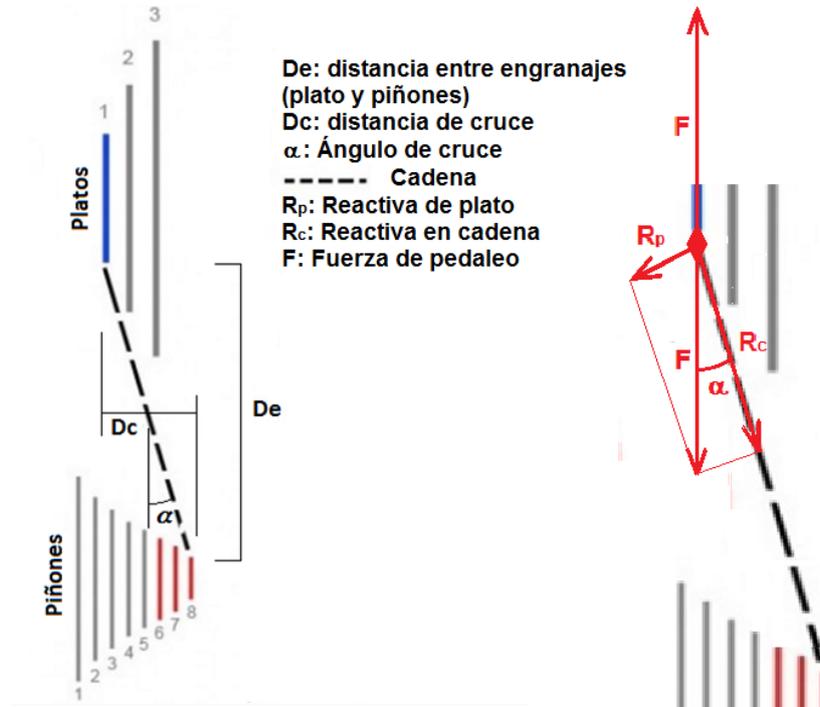


Imagen 4.3: visión esquemática de conjunto de transmisión de una bici formada por 3 platos y 8 piñones. Visto desde arriba.

Dada esta situación se puede presentar una simple comparativa trigonométrica para ver cómo afecta el reparto de fuerzas en función del ángulo de desviación de la cadena.

En la *imagen 4.3* se ve como se da un caso extremo de “cruce de cadena”. La configuración de los actuales sistemas de desviación permite engranar tanto esta opción representada esquemáticamente de plato pequeño con piñón pequeño así como el plato grande con piñón grande, es decir, el máximo cruce posible. Sin embargo no son recomendables tanto por la reducción de eficiencia que aporta la cadena como, sobre todo, por el grave perjuicio y desgaste que ángulos grandes puedan ocasionar en el sistema de transmisión.

La eficiencia, al menos teóricamente, debería de seguir un comportamiento que responda a una relación trigonométrica. El ángulo α se puede obtener sabiendo la distancia D_e y D_c tal y como se ve en la parte izquierda de la *imagen 4.3*. A partir de él se lograría descomponer la carga aportada por el plato F en dos vectores reactivos R_c y R_p . Bajo esta descomposición queda claro que la carga aportada por el ciclista, descontando la eficiencia de las bielas tal y como se indica en el punto anterior, se ve reducida factorizada por el valor del coseno de α :

$$R_c = F \times \text{Cos}(\alpha)$$

Siendo R_c la fuerza que transmite la cadena y F la fuerza directa aportada por los dientes del plato sobre la cadena.

Por ejemplo, la distancia entre el eje pedalier y el eje de la rueda trasera de una bici de montaña podría estar en torno a los 440mm. Esa distancia valdría como valor D_e . La distancia D_c podría venir determinada por el salto entre piñones consecutivos. El estándar de la marca Shimano para 8 piñones de desvío es una distancia de 5,6 mm horizontales entre puntas de piñones. Si se tomase como referencia neutra, es decir con ángulo α igual a cero la posición de cadena en la que se engrana el plato 1 con el piñón 3 según la *imagen 4.3*, existirían otros 5 piñones hasta el número 8 en el que progresivamente el valor de α se incrementaría según se moviera la cadena engranando esos 5 piñones. En el cuadro contiguo se considera la columna de “piñones desplazados” como el número de piñones entre la posición neutra ($\alpha = 0^\circ$) y la combinación elegida, es decir, para el máximo cruce de cadena de la *imagen 4.3* se estaría en la fila con un valor igual a 5:

Piñones desplazados	Ángulo α	Cos(α)	Rendimiento por cruce
0	0°	0	100%
1	0.75°	0.9999	99.99%
2	1.51°	0.9996	99.96%
3	2.26°	0.9992	99.92%
4	3.02°	0.9986	99.86%
5	3.77°	0.9978	99.78%
6	4.52°	0.9968	99.68%
7	5.27°	0.9957	99.57%
8	6.02°	0.9944	99.44%
9	6.76°	0.9930	99.30%

Se aprecia como trigonométricamente a medida que el cruce es mayor el rendimiento se va reduciendo sin embargo los valores porcentuales son relativamente bajos y se podrían considerar como prácticamente despreciables. Concretamente para el ejemplo elegido el rendimiento del máximo cruce sería de 99.78% sólo por efecto vectorial, es decir, la carga perdida que se transmite por la cadena sería de un 0,22%.

Teóricamente se ha comprobado que el cruce de cadena apenas afecta teóricamente al rendimiento, no obstante es necesario puntualizar que este efecto definido sí causa un impacto negativo en la transmisión a nivel de desgaste de todas sus piezas dado que:

- La cadena trabaja con ángulo permitiendo que gran parte de la carga se transmita con un reparto desigual en los eslabones unidos por los mismos pernos permitiendo un sobre-estiramiento a medio-largo plazo de la cadena y consecuentemente pérdidas de fiabilidad y prestaciones.
- La corona trabaja con cargas transversales lo que implica principalmente un desgaste por rozamiento de los dientes en sus laterales y un trabajo desbalanceado del eje pedalier y sus rodamientos.
- En los piñones se daría un efecto similar al de las corona o plato.

Es lógico pensar que el mal reparto de las cargas y el rozamiento equivalen a pérdidas por elasticidad y fricción, con lo cual, no sólo el efecto de descomposición de vectores de

carga va a ser el condicionante de un probable descenso en el rendimiento ¿Cómo afectan estos puntos entonces?

4.2.1.b. Estudio experimental del cruce de cadena y combinación entre platos y piñones.

Según el estudio de *J. Spicer (5)* este efecto de cruce de cadena es despreciable y se ha comprobado que al menos a nivel gráfico es así por lo visto en el anterior punto. Sin embargo, *Jason Smith* en el laboratorio de *Friction Facts* en *Boulder (Colorado, USA)* ha realizado un interesante estudio acerca de este efecto dando combinaciones reales que un usuario podría utilizar en una bici de carretera de 2 platos (53-39 dientes) y 11 piñones (11-12-13-14-15-17-19-21-23-25-28 dientes).

El test de *J. Smith (6)*, similar en cuanto a formas al de *J. Spicer (5)* utilizando un motor eléctrico para producir movimiento en el plato y un lector de llegada de potencia al buje de piñones, mide las 22 diferentes combinaciones que se pueden dar engranando tanto en el plato pequeño como en el grande. En este caso la potencia aportada es de 250W y con una cadencia de 95 r.p.m.

El autor indica que existirán dos puntos en el que el ángulo de salida de la cadena es cero, es decir, plato y piñón coplanares. Esas combinaciones son las que posicionan la cadena en el plato pequeño y el piñón 6° (39-17) y el plato grande con el piñón 4° (53-14). Estas combinaciones no tienen pérdida por “cruce de cadena”.

Aportados los precedentes se pueden apreciar los resultados obtenidos en la gráfica reducida para las combinaciones más usuales para este tren de engranajes posicionadas en abcisas por relación de giro (Vueltas de rueda / Vueltas en pedaliar) y en ordenadas por la pérdida de potencia en Watios:

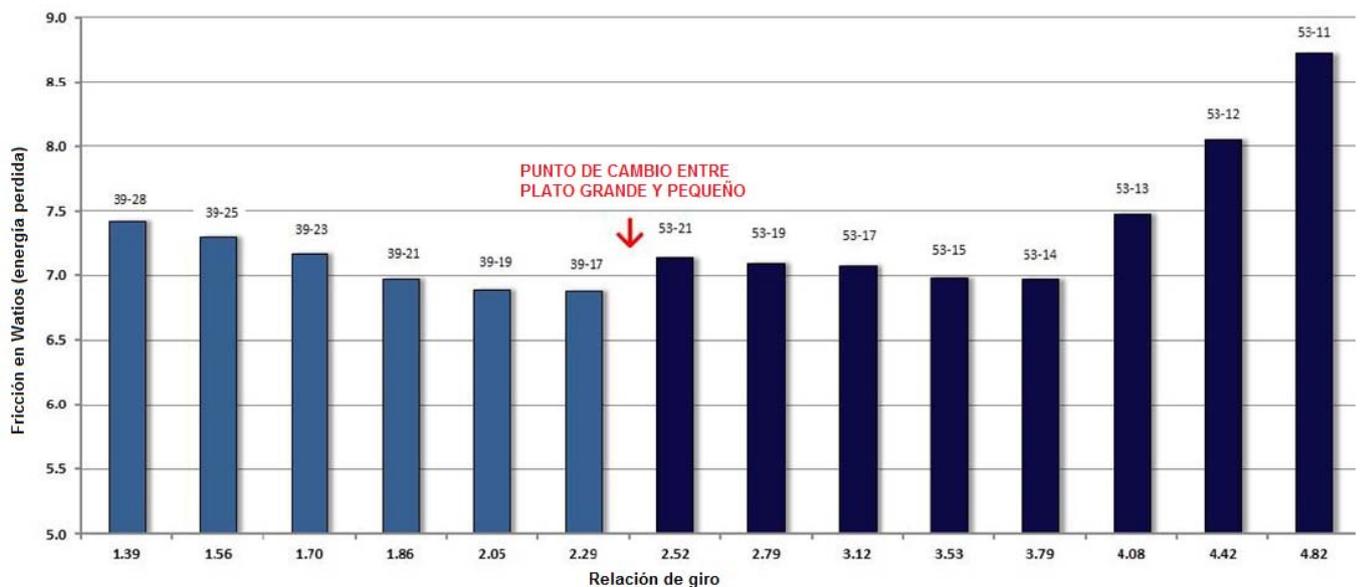


Imagen 4.4: Rendimiento en combinatorias Plato/Piñón más usuales.

Las barras azul claro son las combinatorias comunes para el plato pequeño de 39 dientes y las azules oscuro son las combinatorias más comunes para plato grande de 53 dientes.

En la gráfica ampliada (*imagen 4.5*) se presentan todas las combinaciones posibles y en ella es donde se puede apreciar como varía el rendimiento pivotando para cada plato en las relaciones con menores pérdidas que son aquellas que tienen ángulo cero en la salida de la cadena hacia el piñón (39-17 y 53-14).

Según las conclusiones dadas y que se pueden extraer de la gráfica se confirma, coincidiendo con *J. Spicer*, que el rendimiento de estas combinatorias de desarrollo no sólo depende del ángulo si no también en gran medida de los tamaños de radio de los piñones engranados.

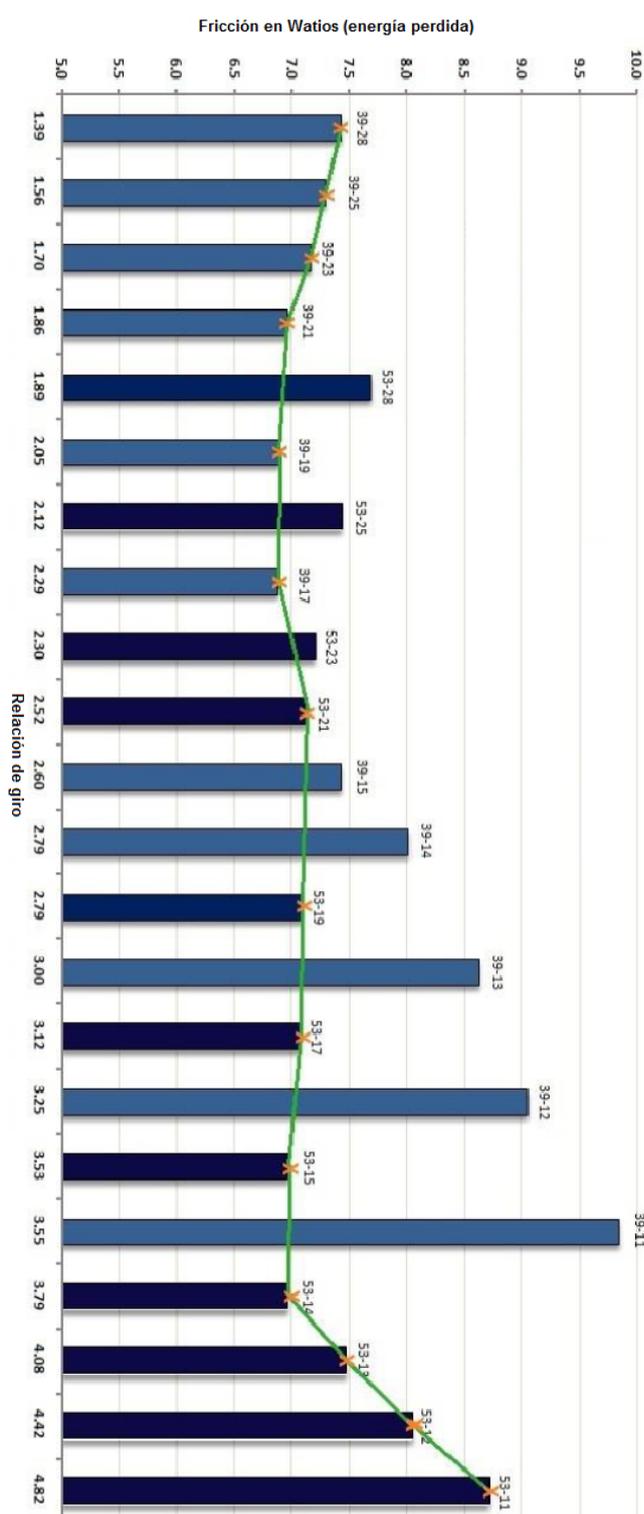


Imagen 4.5: Rendimiento para todas las combinaciones Plato/Piñón

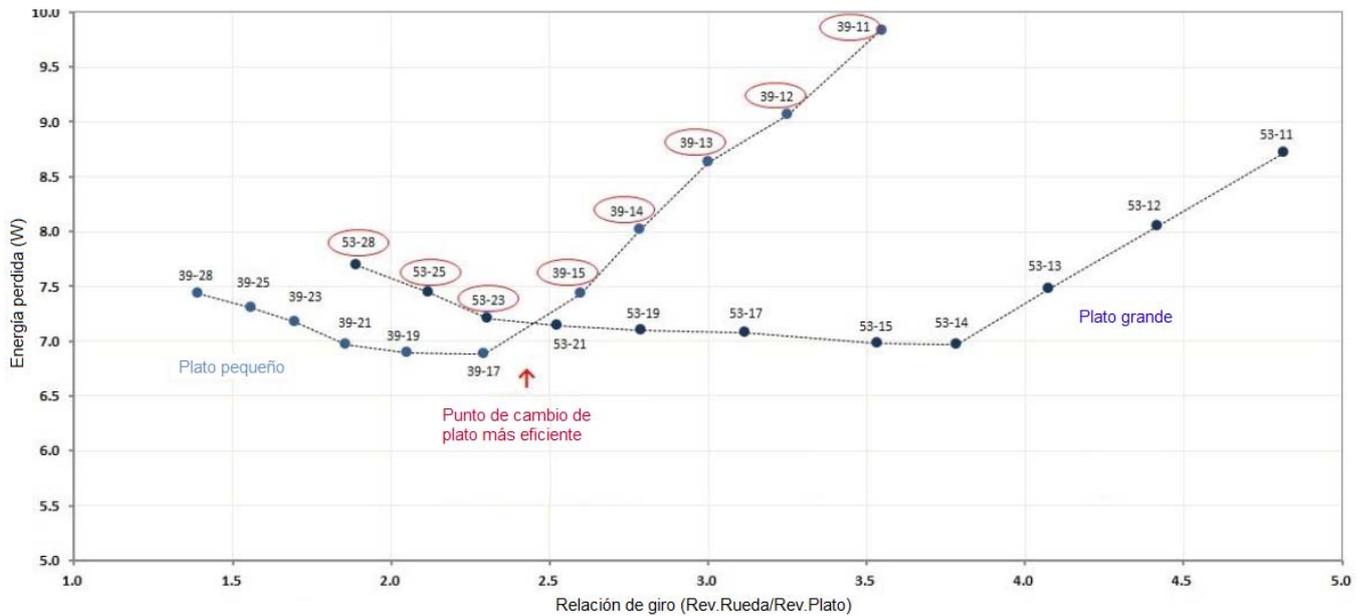
Piñón #	Dientes en piñón	Dientes en plato	Relación de giro	Desalineación (mm)	Ángulo desalineación	Pérdida media (W)	Pérdida %
1	11	39	3,55	19.5	2.90	9,84	3,94
2	12	39	3,25	15.6	2.32	9,06	3,62
3	13	39	3,00	11.7	1.74	8,64	3,46
4	14	39	2,79	7.8	1.16	8,02	3,21
5	15	39	2,60	3.9	0.58	7,44	2,98
6	17	39	2,29	0	0	6,89	2,76
7	19	39	2,05	3.9	0.58	6,89	2,76
8	21	39	1,86	7.8	1.16	6,97	2,79
9	23	39	1,70	11.7	1.74	7,18	2,87
10	25	39	1,56	15.6	2.32	7,30	2,92
11	28	39	1,39	19.5	2.90	7,43	2,97
<hr/>							
1	11	53	4,82	11.7	1.74	8,72	3,49
2	12	53	4,42	7.8	1.16	8,05	3,22
3	13	53	4,08	3.9	0.58	7,48	2,99
4	14	53	3,79	0	0	6,97	2,79
5	15	53	3,53	3.9	0.58	6,98	2,79
6	17	53	3,12	7.8	1.16	7,08	2,83
7	19	53	2,79	11.7	1.74	7,10	2,84
8	21	53	2,52	15.6	2.32	7,14	2,86
9	23	53	2,30	19.5	2.90	7,21	2,88
10	25	53	2,12	23.4	3.48	7,44	2,98
11	28	53	1,89	27.3	4.06	7,69	3,08

Tabla 4.6: Tabla de valores de rendimiento en un montaje real de 2 platos y 11 piñones con cruce de cadena.

En referencia a la piña analizada de 11 piñones, para el plato grande el piñón cuyo rendimiento es más alto es el de 14 dientes que coincide con el considerado en ángulo de cruce de cadena cero. La potencia perdida de los 250W usados es de 6.97W lo que significa un 2.8% de pérdidas. A partir de este piñón si subimos al siguiente más grande o bien bajamos al contiguo más pequeño esta potencia perdida varía de diferente forma a pesar de que el ángulo de cruce de cadena es el mismo. Es así como se comprueba visualmente que el ángulo de giro de los eslabones de la cadena es un factor más importante que el del giro de cadena al menos es estos ángulos de cruce relativamente pequeños que se dan en la transmisión de una bicicleta.

La variación es mucho mayor si la cadena se desvía hacia los piñones pequeños. Concretamente llega hasta un 7.48W, 8.05W y 8.72W, es decir 3%, 3.2% y 3.5% respectivamente mientras que hacia el lado de piñones más grandes las pérdidas aumentan pero en una progresión suave en los más cercanos que poco a poco se va haciendo más acusada a medida que el ángulo de cruce va aumentando al buscar engranar con piñones más alejados. Tal y como indica la tabla de valores se trataría de un gasto de 7.08W, 7.10W, 7.14W, 7.21W, 7.44W y 7.69W que pasado a pérdidas de rendimiento porcentual sería de 2.83%, 2.84%, 2.86%, 2.88%, 2.98% y 3.1% respectivamente.

La combinación de piñones con el plato pequeño sigue un reparto similar, siendo que en este caso se dan las situaciones de mayor y menor rendimiento, de 2,76% y 3,94% para las combinaciones 39-17 y 39-11 respectivamente. Se da también el caso en que la compensación de rendimiento que se tiene al cambiar al piñón de 19 dientes con el ángulo mínimo posible de cruce es suficiente como para igualar las pérdidas por esta desviación de la cadena en comparación con la combinación de ángulo cero 39-17. Viendo esto la cuestión ahora es saber cómo afectaría exclusivamente el cruce de cadena.



Gráfica 4.7: Variación de rendimiento por conjuntos de relaciones (Plato pequeño y Plato grande)

El experimento continúa investigando sobre la afección real que tendría el cambio de piñón exclusivamente sobre el rendimiento sin sumarle el efecto de ángulo de cruce. Interesantes resultados se pueden extraer de la tabla de valores:

Piñón #	Dientes en piñón	Dientes en plato	Relación de giro	Desalineación (mm)	Ángulo desalineación	Pérdida media (W)	Pérdida %
1	11	39	3,55	0	0	8,24	3,30
2	12	39	3,25	0	0	8,01	3,20
3	13	39	3,00	0	0	7,58	3,03
4	14	39	2,79	0	0	7,45	2,98
5	15	39	2,60	0	0	7,27	2,91
6	17	39	2,29	0	0	6,89	2,76
7	19	39	2,05	0	0	6,71	2,68
8	21	39	1,86	0	0	6,61	2,64
9	23	39	1,70	0	0	6,49	2,60
10	25	39	1,56	0	0	6,28	2,51
11	28	39	1,39	0	0	6,14	2,46
1	11	53	4,82	0	0	8,03	3,21
2	12	53	4,42	0	0	7,54	3,02
3	13	53	4,08	0	0	7,30	2,92
4	14	53	3,79	0	0	6,97	2,79
5	15	53	3,53	0	0	6,78	2,71
6	17	53	3,12	0	0	6,49	2,60
7	19	53	2,79	0	0	6,31	2,52
8	21	53	2,52	0	0	6,08	2,43
9	23	53	2,30	0	0	5,94	2,38
10	25	53	2,12	0	0	5,79	2,32
11	28	53	1,89	0	0	5,56	2,22

Tabla 4.8: Tabla de valores de rendimiento en una combinatoria de 2 platos y 11 piñones sin cruce de cadena.

Para comprobar gráficamente la diferencia de rendimiento entre ambas situaciones, se trasladan los valores de las tablas a una gráfica de comparación:

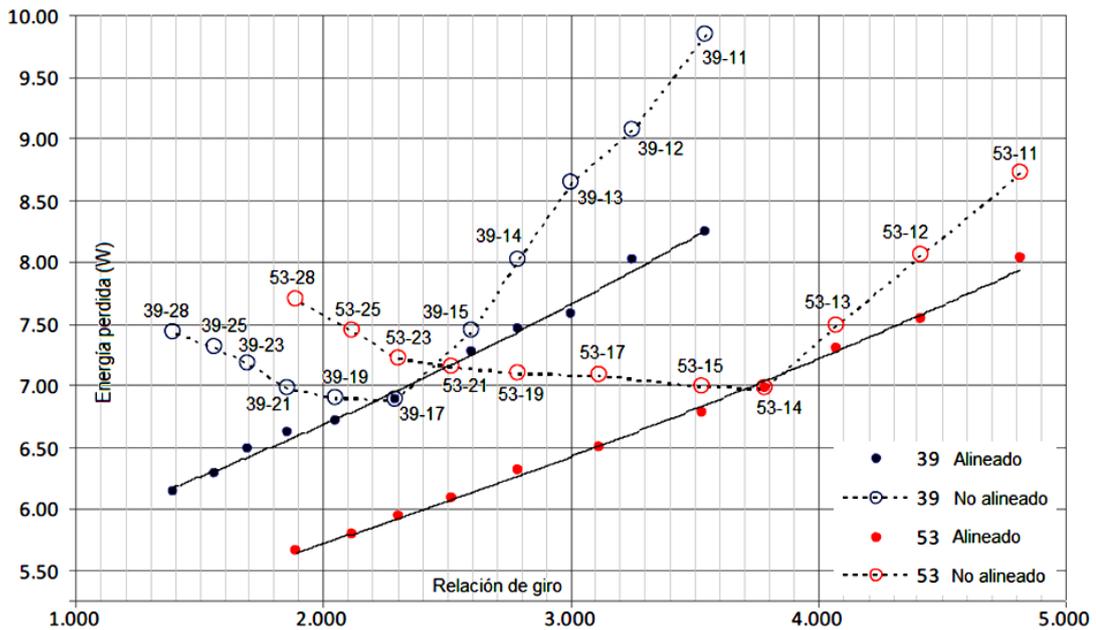


Imagen 4.9: Tabla de valores de rendimiento en una combinatoria de 2 platos y 11 piñones con y sin cruce de cadena.

- La variación del efecto de cambio de piñón engranado es prácticamente lineal para el cassette de piñones utilizado en el test.
- Las pérdidas de eficiencia son menos acusadas en la combinatoria con plato grande.

La segunda de las características a su vez despierta otra pregunta ¿Por qué no se tiende a montar transmisiones con platos y piñones más grandes? Es una buena cuestión porque tras estas comparativas se sabe que cuanto mayores sean los platos y piñones engranados mayor rendimiento se obtendría. De hecho, se puede comprobar gráficamente en el siguiente diagrama en el que se utilizan platos de mayores dimensiones:

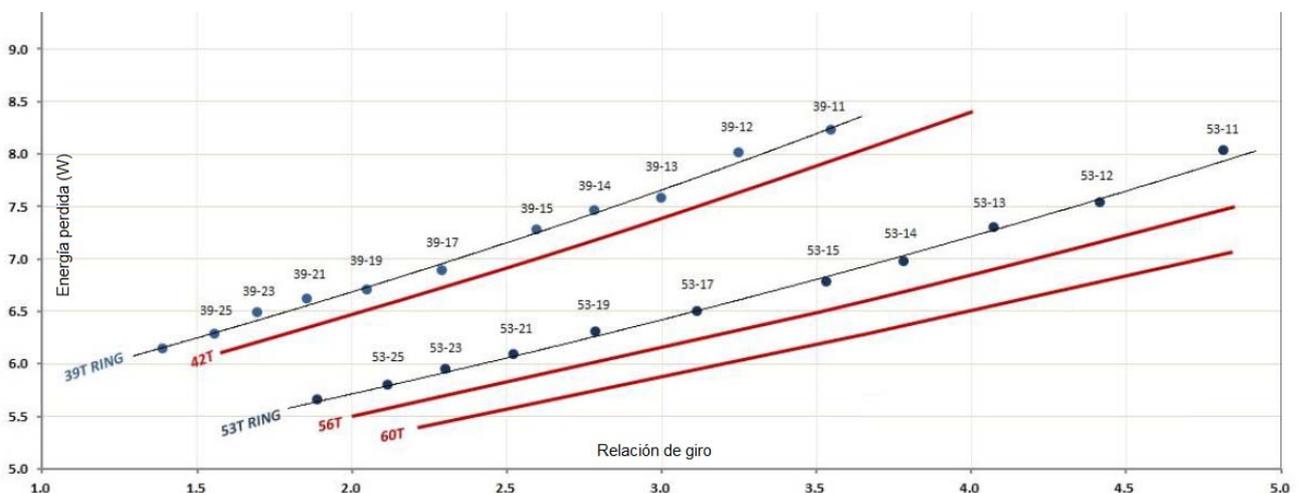


Tabla 4.10: Tabla de valores hipotéticos de rendimiento en una combinatoria de 3 platos de 42, 56 y 60 dientes y 11 piñones sin cruce de cadena.

Si se compara la recta de variación del plato de 60 dientes con el de 53 dientes clásico, se puede comprobar que con un juego de piñones que dé la misma relación de giro, es decir, piñones más grandes, la media de Watios ahorrados está en torno a 0.75W.

Con lo cual si se supone que es más efectivo utilizar relaciones con engranajes más grandes, entonces, ¿Por qué no se montan platos de 106 dientes con un cassette de 22-56 dientes que sería lo equivalente en lo que a relación de giro al 53 y 28-11? A nivel de pérdidas por fricción la respuesta sería positiva, es decir, efectivamente es más eficiente esta configuración, sin embargo existen factores que habría que tener en cuenta a la hora del uso real fuera de laboratorio:

- Mayor peso: Piezas más grandes y cadena más larga repercuten en un aumento de la masa.
- Peor aerodinámica: Al tener más superficie tiene más resistencia sobre todo lateral con lo que la bici es algo más inestable.
- Mayores deformaciones: Al tener un plato más grande las deformaciones elásticas son más altas acusándose más aun en dirección transversal con el cruce de cadena lo cual puede crear más ineficiencia, desgaste, roces e incomodidad durante el pedaleo.

4.2.1.c. Ineficiencia por la propia cadena

Se ha de tener en cuenta, tras el análisis de los resultados del efecto del cruce de cadena y sus diferentes combinaciones de Plato/Piñón, que no solo es esta casuística la que hace que se den pérdidas de rendimiento en la conexión entre los dientes interconectados.

Uno de los principales efectos de ineficiencia que se dan en la transmisión es la disipación de energía a través de la propia cadena debido principalmente a:

- Giro de los eslabones sobre el pasador que los une: La malla exterior e interior que forman el cuerpo de la cadena pivota sobre el perno que los une lo cual produce un rozamiento entre ambas y de éstas sobre el propio eje de pilotaje. Cuanto mayor sea el giro mayores serán las pérdidas. Este efecto, por lo tanto, será más acusado cuando se engrana sobre piñones pequeños en los que el giro es consecuentemente mayor. Así mismo este efecto se suaviza con una buena lubricación.
- Elasticidad estructural: La cadena está realizada con materiales metálicos, aceros aleados, los cuales tienen un pequeño efecto de elasticidad el cual hay que vencer antes de transmitir el movimiento. Debido a esto cuanto mayor sea la distancia entre plato y piñón el efecto de deformación elástica será mayor al ser más larga la cadena y haber más eslabones a deformar.
- Deformación de los casquillos sobre el diente: aunque este efecto no parece sea muy importante también hay que tenerlo en cuenta. El contacto directo entre la cadena y los dientes produce una pequeña deformación que resta efectividad. El efecto es más acusado cuando la cadena está sobre estirada debido al uso porque el contacto con los piñones se hace más paulatino creándose un efecto de roce antes de su asentamiento definitivo en la rueda engranada lo cual es más ineficiente.

La ineficiencia creada por la cadena ha sido medida por *Jason Smith (7)* en experimentos realizados sobre cadenas de 5 fabricantes punteros y en sus productos más competitivos dando los siguientes resultados de pérdidas:

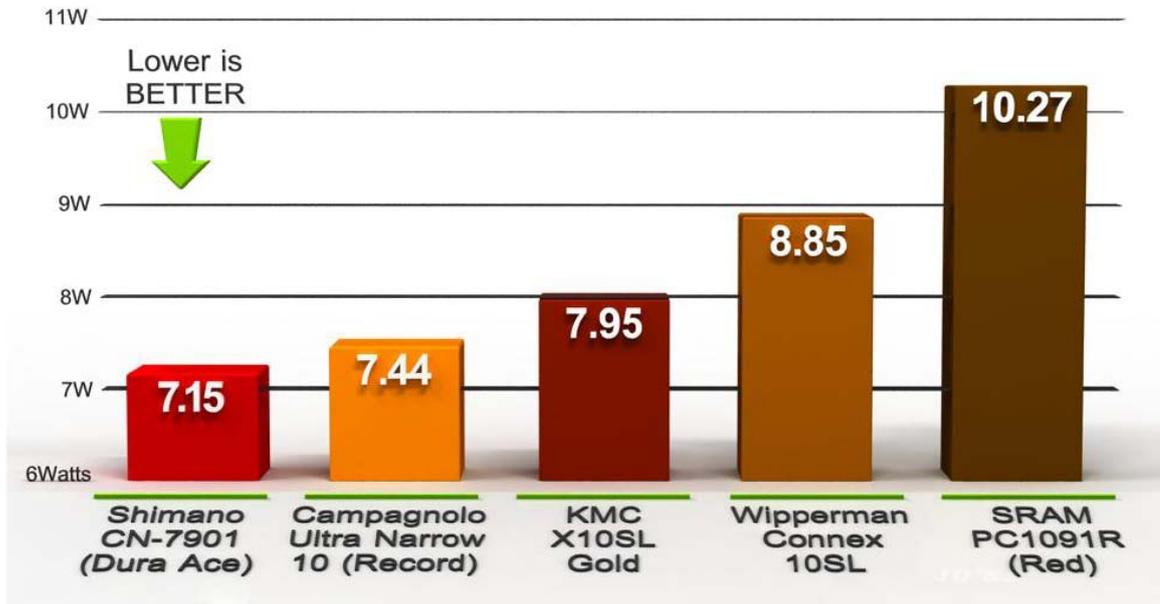


Gráfico 4.11: Pérdidas de energía en diferentes modelos de cadenas con lubricación de fábrica.

Los ensayos se realizaron a una potencia de 250W y 95 r.p.m. y sobre un plato de 53 dientes y piñón de 11 dientes coplanares. Cadenas nuevas, limpias y con lubricación de fábrica.

Los resultados de estos artilugios punteros del mercado actual hablan de entre 7.15 y 10.27 wátios de media perdidos, o lo que es lo mismo 2.86% y 4.11% coincidiendo con lo expuesto en la *tabla 3.22* que indicó una pérdida media de 8.03 wátios si se tiene en cuenta que las dos cadenas usadas en el test (7) son modelos pertenecientes a las de este ensayo.

3.2.1.d. Lubricación

Según el estudio de *J. Spicer (5)* la lubricación no tiene un efecto mensurable, aún la falta de lubricación no parece afectar a la eficiencia en condiciones de laboratorio. Sin embargo el efecto de una buena lubricación sí parece mensurable y relativamente importante en el efecto de las pérdidas energéticas.

Experimentalmente y como continuación al test de eficiencia de cadena (7) de *J. Smith* se puede determinar un efecto positivo en mayor o menor grado de la lubricación nueva sobre las cadenas cuya eficiencia previamente fue medida con lubricación de fábrica.

La reducción de las pérdidas, como se puede contrastar entre la gráfica 4.11 y 4.12 es significativa en unas cadenas más que en otras:

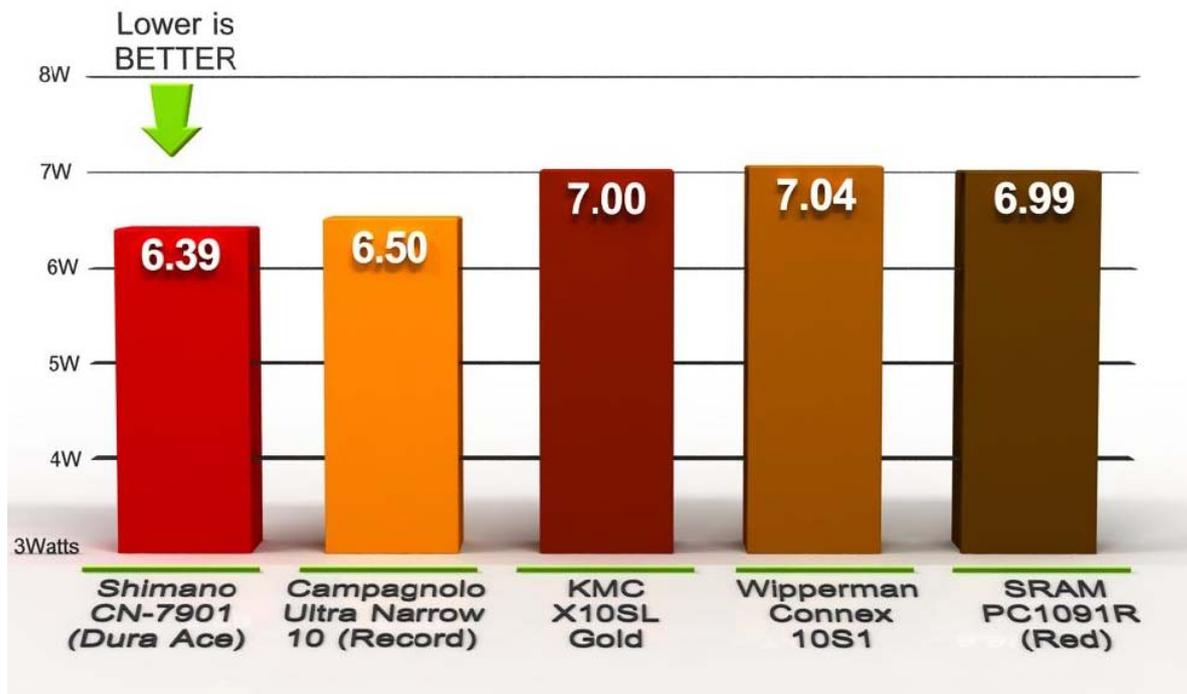


Gráfico 4.12: Pérdidas de energía en diferentes modelos de cadena con lubricación nueva.

En el ensayo previo con lubricación de fábrica la diferencia entre la más y menos eficiente era de 3.12 vatios (10.27 – 7.15) mientras que una vez re-lubricadas con el mismo lubricante (un aceite ligero genérico) esa diferencia se reduce a sólo 0.60 vatios.

Queda por lo tanto probado empíricamente con datos cuantitativos que la lubricación sí juega un papel relativamente importante en el rendimiento de la transmisión a nivel de cadena.

Hay que tener en cuenta que este resultado aplica en condiciones de laboratorio, con la cadena nueva y limpia; en condiciones reales la lubricación tiene además el efecto de dificultar el ingreso de partículas a las partes móviles de la cadena que aumentarían la fricción, además de aumentar la vida útil de la misma reduciendo la temperatura de trabajo y el roce directo entre partes móviles, de manera que en la práctica sigue siendo importante para evitar el degradado progresivo. Sin embargo si esta lubricación envejece la tendencia es la contraria. Las partículas adheridas día tras día al propio lubricante van a tener como consecuencia un contacto continuo del sistema de transmisión con estos elementos abrasivos que pueden degradar rápidamente las partes móviles.

3.2.1.e. Suciedad y uso

El sistema de transmisión va perdiendo propiedades con el paso del tiempo y el uso. La suciedad, el polvo, el agua, etc. van contactando con la cadena y las partes móviles y provocando una fricción extra.

Es perfectamente previsible que por esta causa se va a perder capacidad de transmisión de la fuerza ejercida hasta la rueda pero ¿En qué grado afecta? J. Smith procedió a realizar un estudio (7) en el que comparaba varias cadenas antes y después de una prueba de cicloturismo. Primero medía su capacidad en estado óptimo de limpieza y lubricación a tres cadenas con dos usos previos, posteriormente realizaba la medición tras la prueba sin ningún tipo de tratamiento a mayores a estas tres cadenas y a otras tres con cinco usos previos. A todas ellas se las realizaba el mantenimiento pertinente consiguiendo así una comparativa clara del efecto de la suciedad acumulada en la eficiencia:

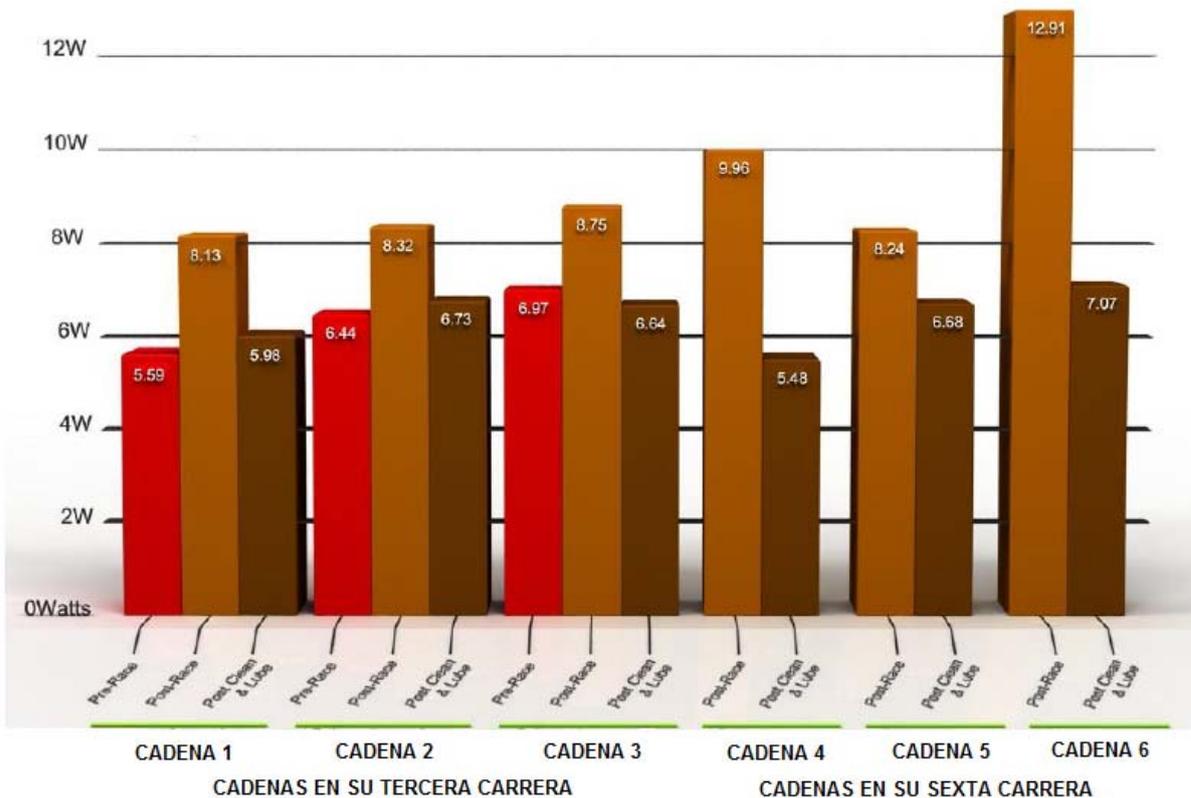


Gráfico 4.13: Efecto de la suciedad sobre la cadena / comparativa de eficiencia de cadenas antes, después de uso en carrera de ciclocross y tras mantenimiento.

Las pruebas son realizadas a 250W de energía entrante constantemente, a 95 r.p.m. y en un grupo plato/piñón de 53/11 dientes respectivamente. Se puede analizar cuáles son las pérdidas (*) debidas a la suciedad adquirida tras la prueba tanto en valor absoluto como porcentual y la mejora (**) experimentada tras la prueba y un efecto de mantenimiento que incluye limpieza y lubricado:

Cadena #	Pre-carrera (W)	Post-carrera (W)	Diferencia (W)	Pérdida* (%)	Mantenim. (W)	Diferencia (W)	Mejora** (%)
1	5,59	8,13	2,54	1,016	5,98	2,15	0,860
2	6,44	8,32	1,88	0,752	6,73	1,59	0,636
3	6,97	8,75	1,78	0,712	6,64	2,11	0,844
4	no data	9,96	-	-	5,48	4,48	1,792
5	no data	8,24	-	-	6,68	1,56	0,624
6	no data	12,91	-	-	7,07	5,84	2,336

El análisis del cuadro y de la *gráfica 4.13* permite ver que efectivamente el grado de suciedad sobre la cadena, en una sola prueba, es decir, en un mismo día, tiene un efecto negativo en el rendimiento de entre 0.7 y 1%. Además se ve que tras este uso de alta exigencia la cadena no parece capaz de dar el mismo soporte energético que previamente.

Por otro lado también se puede interpretar que la mejora de rendimiento de una cadena debido al mantenimiento pertinente es mayor en una cadena más desgastada que en una menos usada, o lo que pudiera ser lo mismo, el pico de pérdidas respecto al antes de la carrera y al después del mantenimiento se ven más acusadas en cadenas de mayor uso.

Dos conclusiones podrían extraerse por parte de un usuario exigente en lo que a efectividad y rendimiento se refiere:

- Utilizar cadenas con poco uso para evitar que durante una prueba la eficiencia caiga.
- Realizar mantenimiento en la cadena tras las pruebas o antes de la prueba para mantener la mayor eficiencia posible.

3.2.1.f. Elasticidad estructural / Desgaste en la transmisión

La propia elasticidad natural del acero confiere a la cadena la propiedad de ser elástica. Debido a esto, por definición, la cadena se comporta como imperfecta para transmitir la energía mecánica íntegra a través de sí misma. Cualquier miembro elástico sometido a tracción (o a compresión) absorbe una energía para producir esa deformación. La energía necesaria para obtener la posición de equilibrio es la energía potencial elástica cuyo cálculo responde a esta fórmula:

$$E_p = \frac{1}{2} * k * x^2$$

Siendo:

E_p la energía potencial en *Julios* de la cadena una vez sometida a estiramiento.

k la constante del muelle en *N/m*

x la distancia de estiramiento respecto a la posición de equilibrio en *metros*.

La energía potencial es la energía que llegaría al piñón de la bici la cual para producir movimiento tiene que ser un poco mayor que la resistencia al movimiento del conjunto rueda / piñón. En este sentido una cadena eficiente sería aquella cuya constante k sea muy alta dado que así el valor de x o estiramiento de la cadena es muy bajo para alcanzar la energía demandada para aplicar movimiento.

A nivel biomecánico y de forma visual, por ejemplo, si se supone una cadena muy elástica el valor de x aumentará, es decir, se tiene que ejercer un movimiento del pedaliar lo suficientemente alto como para aportar una energía potencial suficiente, es decir, que se realizaría un esfuerzo de precarga inefectivo. Esa fuerza está determinada por la ley de Hooke:

$$F = k * x$$

Si este valor de x es alto significa que hay un tiempo de aplicación de carga inactivo que puede suponer durante un pedaleo estándar (no perfectamente redondo) que la aplicación de la carga no sea aplicada en el ángulo del pedaleo óptimo siendo esto un problema de ineficiencia biomecánica.

A nivel puramente mecánico, además de la precarga dada para deformar la cadena y que llegue a la energía acumulada necesaria para producir movimiento, se analiza el efecto que el paso de tiempo y del uso tiene sobre la cadena. Los eslabones y piezas que componen este mecanismo de transmisión están diseñados para que durante el uso normal e incluso extremo nunca se supere la tensión de fluencia del material. Sin embargo, lo que es inevitable es que se produzca la fluencia lenta. Este efecto, conocido como *creep*, se produce cuando un material está sometido a una tensión constante durante un periodo de tiempo relativamente alto. Debido a esta tensión se produce una reorganización molecular más o menos lenta, en función de si la carga es más alta o más baja, dando como resultado un estiramiento permanente del material en la dirección de la carga.

Como consecuencia del *creep* la cadena va a sufrir una elongación constante y lógicamente la distancia entre los pernos de pivotaje de los eslabones aumentará. En este sentido, el efecto de las cargas sobre el plato y los piñones no produciría un efecto de *creep* que aumente la distancia entre los dientes por lo que el problema que se asocia a la elongación constante de la cadena es que los rodillos que contactan con los dientes cada vez entren antes por la cresta del diente con lo que se produce un efecto de fricción más acusado entre diente y eslabón.

¿Tendrá este efecto de fricción consecuencias al rendimiento? Todo hace pensar que así sea. El aumento de la fricción siempre es sinónimo de pérdidas energéticas. Para ello analizamos un test de *James Smith (9)* en el que compara el rendimiento de varias cadenas afectadas en mayor o menor grado por la elongación constante sufrida con el uso. Además este estudio lo conjuga con juegos de platos y piñones nuevos y usados para ver además el efecto global.

De esta forma vemos reflejado en el cuadro contiguo, en azul los conjuntos de plato/piñón nuevos y en rojo los desgastados, como afecta en el rendimiento las características de estos elementos de la transmisión:

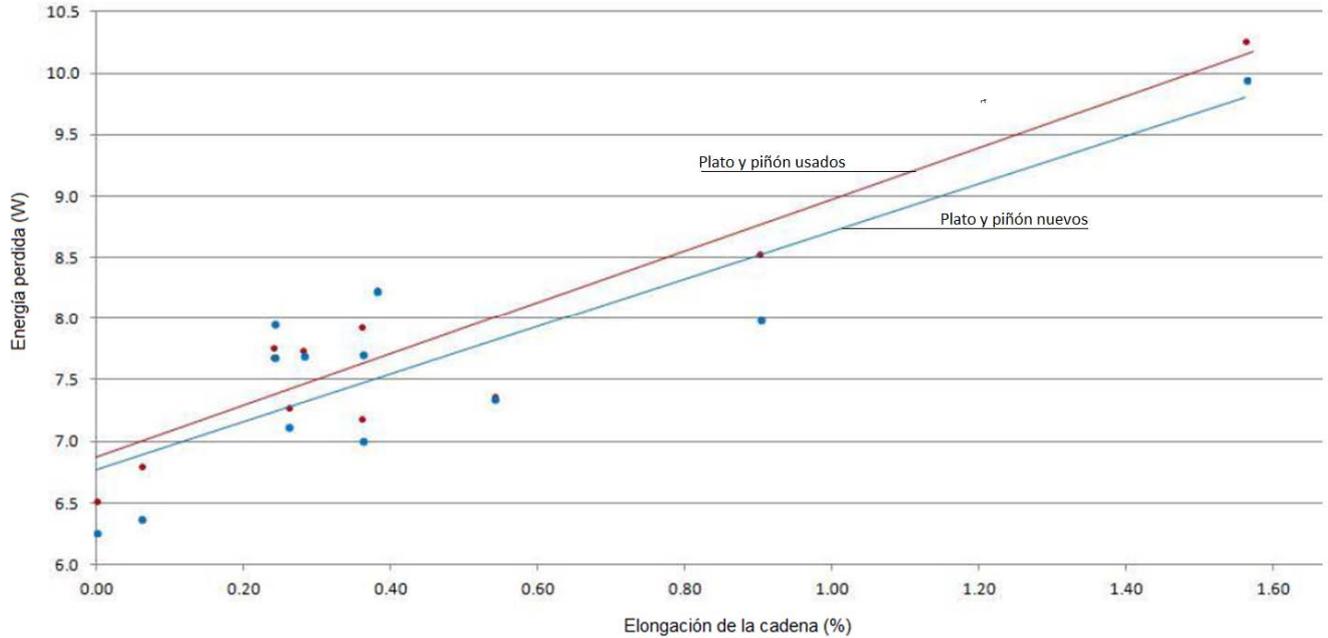


Gráfico 4.14: Pérdidas en transmisión en función de la elongación de la cadena. Líneas de tendencia superpuestas.

A pesar de existir cierta dispersión en los datos, el autor puede establecer unas líneas de tendencias. Coincidiendo con el estudio acerca del rendimiento de las cadenas, la gráfica comienza aportando datos de pérdidas de carga en torno a 6.3 y 6.5 vatios en el caso de una cadena nueva con grupo nuevo y usado respectivamente sobre los 250W aportados en origen.

Al utilizar cadenas con elongación las pérdidas energéticas por fricción aumentan tanto en grupos nuevos como en usados. Se podría pensar que si tanto la cadena como los dientes están desgastados por igual las pérdidas no debieran de ser más acusadas que si ambos son nuevos. La cuestión es que nunca el desgaste de ambas partes es igual dado que la cadena se elonga con más prontitud que el desgaste acumulado de los piñones en condiciones habituales por lo que la fricción de rodillo con la cresta siempre existirá en mayor o menor grado. Además el grado de contacto y micro-asentamiento entre ambas partes puede ser irregular lo cual se traduce también en pequeñas pérdidas que van acumulándose al total.



Imagen 4.15: Dos comparativas de plato con dientes desgastados y dientes nuevos. Giro en sentido horario.

El efecto de fricción de los rodillos o casquillos de la cadena con los dientes se puede analizar basándose en la *imagen 4.15*. Se ve en la comparativa como una cadena con elongación va a ir desgastando los dientes. Al tener más separación entre los rodillos la entrada de estos sobre los dientes cada vez será más a la izquierda de los dientes lo cual hará que primero la punta del mismo se vea desbastada poco a poco para permitir la entrada del propio rodillo al valle del diente donde se asienta finalmente. Con el tiempo la elongación y desgaste van aumentando por tanto la fricción irá afectando cada vez más al diente que paulatinamente irá perdiendo su simetría para transformarse en lo que popularmente se conoce como “aleta de tiburón” por su similitud con ésta. Podría incluso darse la situación de que se cree un semi valle a mitad del diente donde se asiente el rodillo de la cadena aumentando el par en la pedalada al distanciarse del eje de giro y aportando inestabilidad en el contacto cadena / diente.

Lo que sucede en un grupo de cadena y dientes nuevos es que el rodillo vaya paralelo al diente en los momentos previos al engrane, si apenas rozarlo, hasta que asienta en el valle de forma directa, sin fricción previa. Se evita así ese roce que equivale a energía extra a aportar.

3.2.1.g. Deformación de los casquillos sobre el diente

Además del efecto causado por la sobre elongación de la cadena, también puede tener un efecto negativo el que los casquillos que recubren el perno de la cadena y que contactan con el diente del plato o piñón esté en malas condiciones.



Imagen 4.16: Macro de cadena nueva y cadena desgastada en los rodillos

Si la superficie de estos casquillos se ha visto deteriorada por el uso o simplemente tienen suciedad por su superficie, el contacto con el diente puede llegar a darse de forma inestable, amortiguada o progresiva lo cual hace que esa pérdida de tacto se convierta en tiempo de aplicación de la carga y deformaciones que significan energía para salvar ese contratiempo y pérdidas de rendimiento.

3.2.2. Ineficiencia en el cambio por desviador

Los sistemas clásicos de cadena llevan asociados unos sistemas de cambio de piñón a través de un desviador que se encarga de dirigir la entrada de la cadena hacia un piñón u

otro mientras simultáneamente mantiene la tensión mínima para que no se produzca excesiva flecha en los vanos que aporte inestabilidad al conjunto.

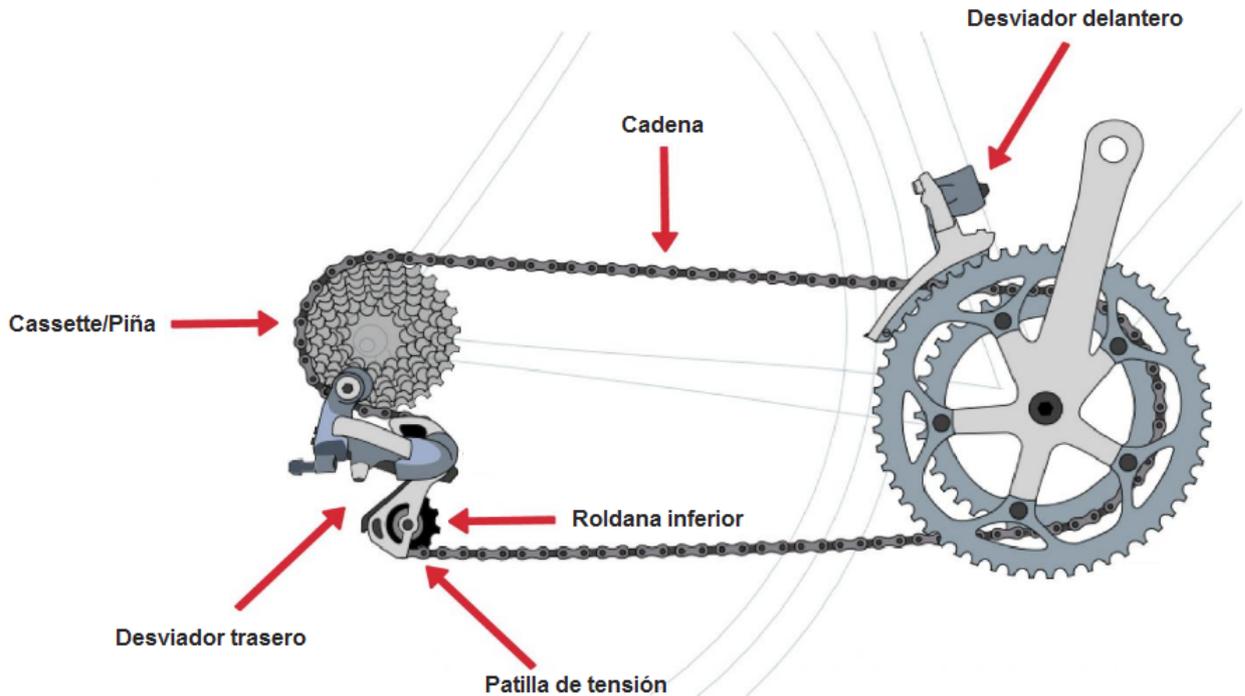


Imagen 4.17: Esquema de transmisión clásico con desviadores para el cambio de piñón y/o plato.

La ineficiencia de este desviador se puede considerar básicamente en dos estadios: Durante el momento del cambio de un piñón a otro y constantemente al pasar la cadena a través de la patilla de tensión.

3.2.2.a. Ineficiencia durante el momento del cambio de piñón

Cuando se pasa de un piñón a otro puede existir, durante unas décimas o incluso algún segundo, momentos en los que la cadena no está asentando correctamente en los dientes. Durante ese tiempo la fuerza ejercida no va a ser la misma que la que normalmente se está transmitiendo a la rueda por lo que aquí se está dando puntualmente una acusada pérdida de eficiencia.

Aparte de la destreza del propio ciclista, lo importante es que el desviador esté bien reglado para que la velocidad de paso de la cadena de uno a otro piñón sea lo más rápido posible y sin desequilibrios ni sobresaltos.

Actualmente los desviadores llevan sistema de indexado o sincronizado que permite al usuario desplazar con precisión la palanca de cambio. De hecho, los nuevos diseños de los fabricantes punteros, a parte de aportar piezas con tolerancias dimensionales muy reducidas y resistentes en sus modelos exclusivos, tratan de conseguir la mayor velocidad de cambio, con precisión, para minimizar este efecto de ineficiencia durante el pedaleo.

Uno de los últimos sistemas que se ha implementado en este sentido es el desarrollado por Shimano (XTR Di2) en el que los controladores y el movimiento consecuente se realiza electrónicamente. A parte de proceder con el cambio y acople de la cadena en los piñones o platos contiguos en un tiempo muy reducido y con precisión, este sistema combina la posibilidad de utilizar el un mapeado de combinaciones plato/piñón con el mejor rendimiento de forma automática.



Imagen 4.18: Desviador trasero electrónico.

La eficiencia perdida por este motivo es en un momento puntual y no se podría dar una valoración cuantificable aunque sí es cierto que se mejora en este sentido en función de la destreza y del tipo de sistema utilizado y su precisión.

3.2.2.b. Ineficiencia al paso de la cadena por la patilla del tensor.

El principal efecto negativo que se da en este caso es durante el paso de la cadena a través de las dos roldanas de la patilla de tensión.

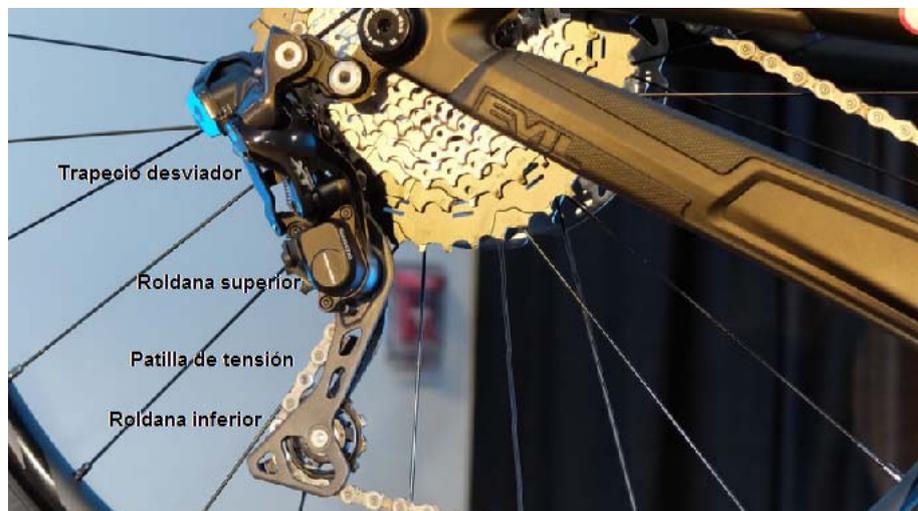


Imagen 4.19: Desviador trasero y sus partes principales.

El desviador trasero mantiene la tensión en la cadena. Esta se consigue mediante el efecto de la patilla de tensión la cual pivota a la altura orientativa de su roldana superior para hacer que la zona de la roldana inferior tense la cadena gracias al efecto de un resorte.

La necesidad de esta patilla hace a su vez que sea necesario doblar la cadena a través de las dos roldanas de sus extremos. Este efecto hace que:

- La cadena tiene que estar constantemente girando. El paso por las roldanas hace que la cadena cambie de dirección en un ángulo relativamente cerrado. Cierto es que no tiene tensión por lo que teóricamente el giro por sus pasadores tiene menos fricción.
- Resistencia al movimiento de las roldanas. Los actuales fabricantes tratan de realizar estos diseños con el menor de los rozamientos posibles en sus cojinetes. Aun así, y más acusado con cierta carga, existirá algo de pérdida por rozamiento durante la rodadura.

A través de un test realizado experimentalmente por *J. Smith (10)* se puede verificar que cuanto menor sea el radio de giro de la cadena, es decir, menor sea la roldana la eficiencia se reducirá.

La parte más clara y sencilla de los tests realizados va a demostrar que la combinación de las roldanas superior/inferior con diámetros mayores es más eficiente:

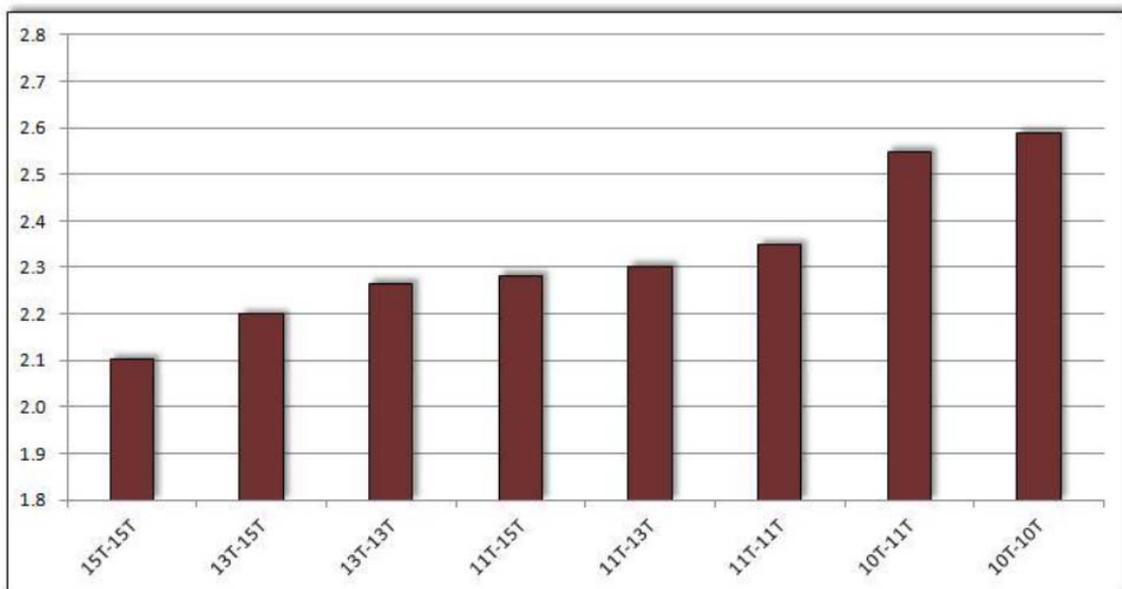


Gráfico 4.20: Rendimiento por combinación de roldanas clasificadas según el número de dientes.

4.3 Transmisión por correa

4.3.1 Características básicas

Este sistema de transmisión por correa es el que a día de hoy está empezando a crecer con más claridad. Dado su casi nula necesidad de mantenimiento debido a la teórica inalterabilidad frente a humedad, barro y polvo, además del escaso ruido durante el uso y longevidad, parece que sea el sistema de transmisión que se imponga a lo largo de los años.

Otras características interesantes frente al sistema de cadena es que al no disponer de grasa ni lubricante, es un sistema más limpio, no mancha. Además, se eliminan los platos de acero con los piñones puntiagudos causantes de dolorosas y aparatosas heridas al clavarse en la pierna del ciclista.

Estas ventajas son relativas al uso cotidiano y a la comodidad del usuario. Sin embargo, a nivel de rendimiento, las características frente a la cadena pueden ser mejores o peores en función de si el sistema de cadena se compara en una u otras condiciones. La transmisión por correa, una vez montado en la bicicleta, posee unas características prácticamente inalterables: positivas y negativas.

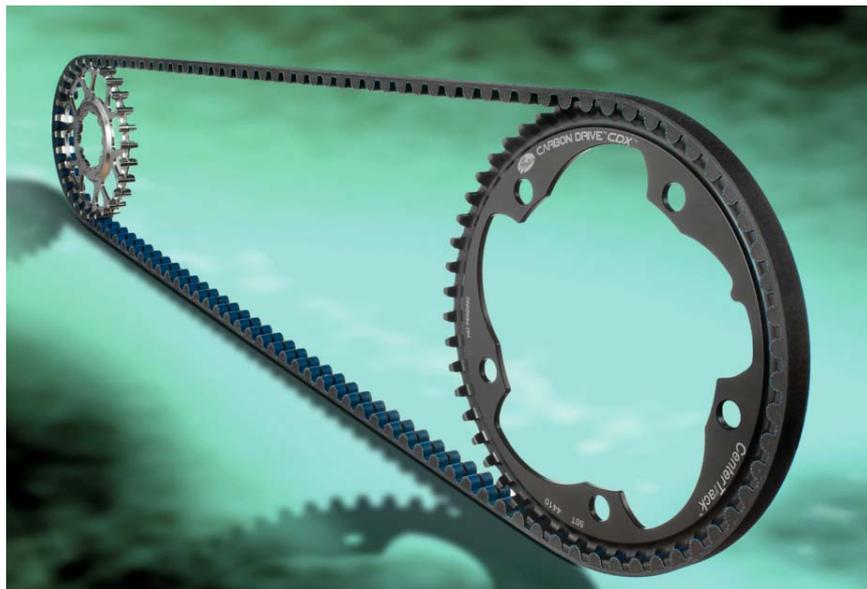
Existen ciertas características para este sistema que pudieran parecer una mejora inicial respecto al sistema de cadena:

- Ausencia de elasticidad: apenas es necesario aportar fuerza para que de forma íntegra esta sea transmitida a su punto de destino. La parte interior de la correa está realizada con cuerdas de fibra de carbono, flexibles transversalmente pero muy rígidas en dirección longitudinal. Al no existir necesidad de vencer la elasticidad que, por ejemplo sí existe en la cadena, se puede afirmar que la transmisión de la tensión a través de la correa es del 100%. Como se verá a continuación esto tiene su parte interpretativa y es que la precarga hace que esta elasticidad mínima si la hubiera está ya superada debido a la precarga.

- Baja pérdida de rendimiento por grandes giros de dirección: Lo habitual en estas transmisiones es que tanto el piñón como el plato sean de un tamaño suficientemente grande como para que el giro de 180° para el retorno tenga un radio que apenas influya en el rendimiento. Las correas se diseñan en su parte no dentada con un acabado plástico estriado transversalmente que protege al corazón de fibra de carbono de roces y golpes y que permite flexar con el menor de resistencia posible. Tal y como se mostró en el punto del rendimiento de la transmisión por cadena la mayor de las influencias en el rendimiento de los medios transmisores viene determinado por las pérdidas al tener que hacer un giro de retorno sobre un piñón relativamente pequeño. Cuanto menor diámetro tenga el piñón, la reducción porcentual de efectividad variaría exponencialmente.



- No existe "cruce de correa": Una de las características principales en este sistema es que el piñón y el plato son únicos y coplanares. No existe por tanto posibilidad de pérdidas de rendimiento por un ángulo de salida de la correa diferente a cero.



- Reducción de peso respecto al sistema de cadena: La correa está hecha normalmente de Kevlar y fibra de carbono y tanto el piñón como el plato son de un compuesto de fibras y termoplásticos, materiales siempre menos pesados que el acero. Se estima que la reducción de peso sería en torno a los 250-300 gramos respecto a la cadena tradicional.

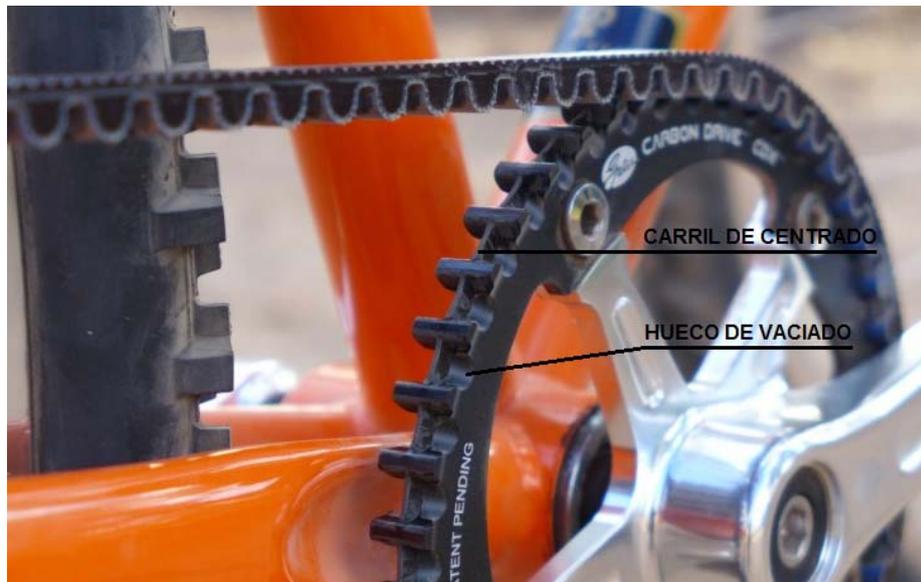
Pero estas características teóricamente positivas son descompensadas principalmente por otras dos negativas que confieren cierta pérdida de rendimiento frente a la transmisión por cadena:

- Tensión por precarga: En comparación con el sistema de cadena en el sistema por correa no dispone de forma habitual de un tensor que le confiera esa estabilidad tensional que mantenga en uso al sistema frente a las vibraciones y distensiones por esfuerzos del ciclista. La motivación para esta falta no está del todo clara y a continuación se hará una

valoración de la situación. Además la longitud efectiva no varía en función de los platos o piñones engranados dado que en el sistema de correa esta relación es constante al ejecutar los cambios de velocidad a través de sistemas de engranajes internos (gearbox) los cuales son analizados también a posteriori en el presente documento.

- Mayor adherencia entre piñón y correa: La superficie de contacto entre ambas partes y la relativa deformación durante el mismo hace incluir en la cadena de movimiento cierta energía desperdiciada durante este momento.

- Entrada de agente externo entre correa y diente: Este podría ser un problema de fiabilidad más que de rendimiento. Si una piedra, una rama o cualquier agente se introdujese entre la correa y el piñón o el plato, la alta tensión a la que se le sometería podría causar un desengranaje, daños en cualquier pieza en contacto o incluso rasgar la correa. Un desengranaje o una rotura en campo podría significar el “volver a casa” andando sin posibilidad de reparación. En este sentido se está mejorando esta casuística mediante la introducción de un carril central de centrado de la correa en las ruedas y huecos para no albergar esos objetos o al menos reducir la probabilidad de hacerlo.



4.3.2. Precarga en una correa: Relación con su efectividad.

Para mantener la tensión y estabilidad durante el uso el sistema de correa necesita de una tensión previa la cual se obtiene separando el eje de la rueda del eje pedalier la distancia necesaria.

La precarga en ambos sistemas, correa y cadena, es necesaria para que en el vano inferior siempre exista una tensión mínima que garantice el correcto engranaje en el piñón. En este vano, al igual que en el superior, la tensión no es estática si no que depende de la carga que el ciclista aplique sobre el vano superior mientras pedalea.

La tensión a la que se precarga una cadena a partir de la patilla de tensión ronda el kilo aportado de forma dinámica por el resorte de la patilla de tensión, es decir, siempre se va a aportar al vano inferior una tensión positiva de un kilo exista la tensión que exista en el

vano superior durante el uso. Por otro lado una correa necesitará dar un valor de precarga inicial para contar con tensión positiva en el vano inferior durante el uso.

El efecto de destense del vano inferior tiene una relación directa y lineal con la tensión del superior, y es que si se aplica por parte del usuario una tensión de salida del plato a través de la correa de, por ejemplo, 25 kilos, esos 25 kilos se suman a la precarga del vano superior y se restan del inferior. Cuando se habla de una precarga de 40 kilos significa que la correa (o el medio transmisor) tiene una carga mínima en el vano superior de 40 kilos y en el inferior de otros 40 kilos. En total la correa está precargada con 80 kgs de tensión (o lo que es tradicionalmente lo mismo 784,53 Newtons). Si el usuario aplica una tensión de 25 kilos sobre el vano superior el reparto que se va a dar será de 65 kilos en el vano superior y 15 kilos debido a la suma y resta de estos 25 kilos en el vano superior e inferior respectivamente.



Imagen 4.21: Reparto de precarga en estático.



Imagen 4.22: Reparto de precarga + 25 kg aportados por el usuario.

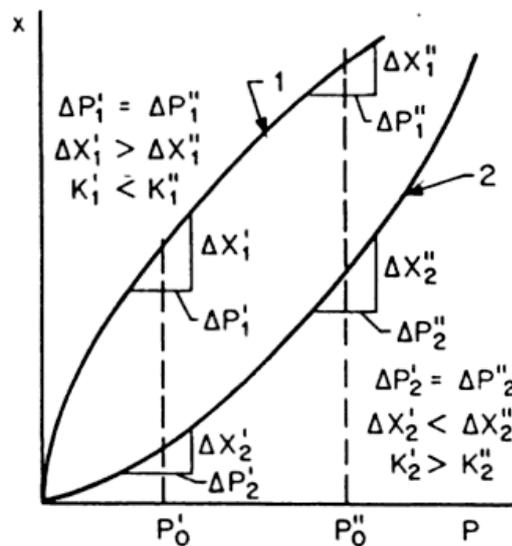
La cuestión es averiguar cómo va a afectar esta precarga a la capacidad de aportar movimiento desde el eje pedalier hasta el eje de la rueda.

Por definición la correa posee la cualidad del endurecimiento o resistencia a la flexión en función de un aumento de la carga aplicada. Esto es lo que se define como "load-

deflection characteristic", la característica del medio conductor de rigidizarse debido a la carga. La rigidez o *stiffness* se define como la relación entre la carga y la deflexión;

$$k = \Delta P / \Delta x$$

La gráfica de esta característica puede variar más o menos rápido en función de la característica de la correa o medio transmisor a analizar. Este medio puede aumentar o bien reducir su rigidez en función de la tensión aplicada. En la *gráfica 4.23* se determina la variabilidad no lineal de dos medios, la línea 1 que aumenta su rigidez con la tensión aplicada (al aumentar Δx) y la línea 2 que disminuye su rigidez debido al mismo motivo:



Gráfica 4.23: Evolución de la rigidez (k) de un medio transmisor en función de su deflexión (x) y carga aplicada (P).

La línea 1 se define como "*Hardening load-deflection characteristic*" o endurecimiento progresivo por el aumento de la tensión, mientras que el "*Softening load-deflection characteristic*" de la línea 2 indica un suavizado de esta rigidez al aumentar la tensión. Ambos tipos de evolución permiten, mediante la precarga, elegir un punto de trabajo adecuado a las necesidades.

Precisamente unas características peculiares, descritas por *Eugene Rivin (11)*, que se pueden observar en entramados de fibras, tal y como la correa, es que su rigidez está descrita como "*hardening*" mientras que en condiciones de vibraciones o impacto (rigidez dinámica) se comporta como "*softening*". Las deformaciones en este tipo de materiales están causadas principalmente por deslizamiento en los contactos entre las fibras.

En definitiva, se alude a un aumento de la rigidez y por tanto mayor dificultad para deformar la correa al aumentar la tensión de precarga y que consecuentemente va a derivar en un mayor esfuerzo por parte del usuario de la bicicleta para desarrollar el movimiento en ella, lo cual es una ineficiencia.

De modo experimental *J. Smith (12)* ha hecho una comparativa para determinar cómo afecta esta tensión de precarga en la efectividad final de la correa y su comparación con el sistema de cadena.

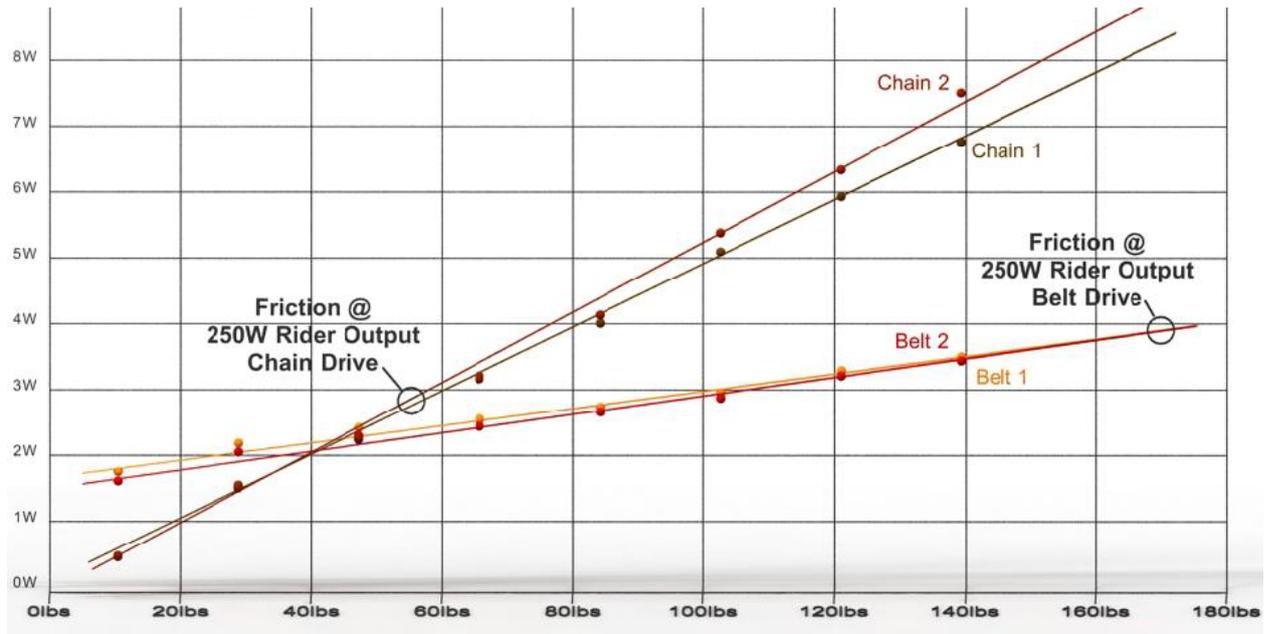
La tensión de precarga que se da a la correa es variable, primero al tipo de correa utilizada y segundo al tipo de ciclista que va a utilizarla. Hay que prever que el vano inferior nunca entre en carga a compresión porque eso significaría que se pudiera dar el caso de saltos de dientes al engranar o al menos un mal encaje de la correa sobre éstos. Evaluar la clase de ciclismo que se va a practicar determinará qué pico de tensión máxima se puede prever y por tanto que precarga utilizar.



Imagen 4.24: Sistema de transmisión por correa sin tensor.

Para hacer un análisis empírico de las pérdidas se hace un estudio de laboratorio comparando el efecto tanto en correa como en cadena bajo condiciones prácticamente iguales. Se utiliza una potencia estática de 250W con cadencia de 95 r.p.m con un plato de radio efectivo de 106mm y 107mm en correa y cadena respectivamente. Para mantener dicha potencia y revoluciones la tensión aportada en la correa es de 53.3 libras mientras que la precarga elegida es de 85 libras. Durante el transcurso de la prueba el pico de tensión en el vano superior es de 138.30 libras cantidad obtenida de la suma de 85 lb de la precarga + 53.30 lb de la carga aplicada. A su vez el vano inferior obtiene una tensión de 31.70 libras tras restarle a la precarga de 85 libras las 53.30 libras aportadas por el usuario. Por otro lado la potencia aportada en el sistema de cadena es de 52.81 libras y una precarga de 1 kilo aunque esta precarga desaparece en lo que el ciclista dé pedales siendo entonces el propio peso de la cadena el que mantenga el vano con cierta tensión para evitar saltos de cadena o malos acoplamientos debido a cualquier fluctuación o vibración.

Los resultados en estas condiciones, habiéndose practicado ambos ensayos en dos cadenas y dos correas de similares características para corroborar la medición y las referencias, son que la correa pierde 3.93 Watios y la cadena 2.92 Watios de los 250 iniciales aportados. Esto queda reflejado en la *Gráfica 4.25*:



Gráfica 4.25: Comparativa de pérdidas energéticas entre cadena y correa en función del valor total de la carga (pedaleo + precarga)

Queda patente en esta gráfica que una transmisión por correa normal ha de tener la previsión de un tense elevado para dar cobertura a posibles picos de carga realizados por parte del usuario de la bicicleta durante momentos de alto esfuerzo. Es decir, esta precarga ha de ser lo suficientemente alta como para que su valor no sea superado por la carga de entrada dejando al vano inferior con carga negativa que pueda producir inestabilidad en el sistema.

Asumir este sistema implica automáticamente pérdida de efectividad, concretamente, y tal y como se describe en el ejemplo planteado por *J. Smith*, 1 Watio de pérdida cada 250W aportados respecto a la cadena tradicional.

Sin embargo, existen de forma comercial tensores dinámicos equiparables a los de las bicicletas con transmisión por cadena. De hecho, las bicicletas con suspensión total lo han de llevar incorporado debido a que su distancia entre ejes varía en función del recorrido de la suspensión. Para mantener constante la tensión incorporan un *idler wheel* o rueda de tensión.

4.3.3. Eficiencia por uso de tensor dinámico

Integrar este sistema de tensión progresiva implicaría la enorme ventaja de mejorar el rendimiento de la correa junto con todas las demás características positivas del sistema frente a la cadena convencional.



Imagen 4.26: Sistema de transmisión por correa con tensor dinámico incorporado.

Si se vuelve a analizar la gráfica de rendimientos Cadena vs. Correa podríamos estar moviendo el punto de utilización de la correa a 250W y 95 r.p.m. a la zona cercana a los 53.30 libras de tensión total simplemente por ser la tensión aplicada por el usuario:

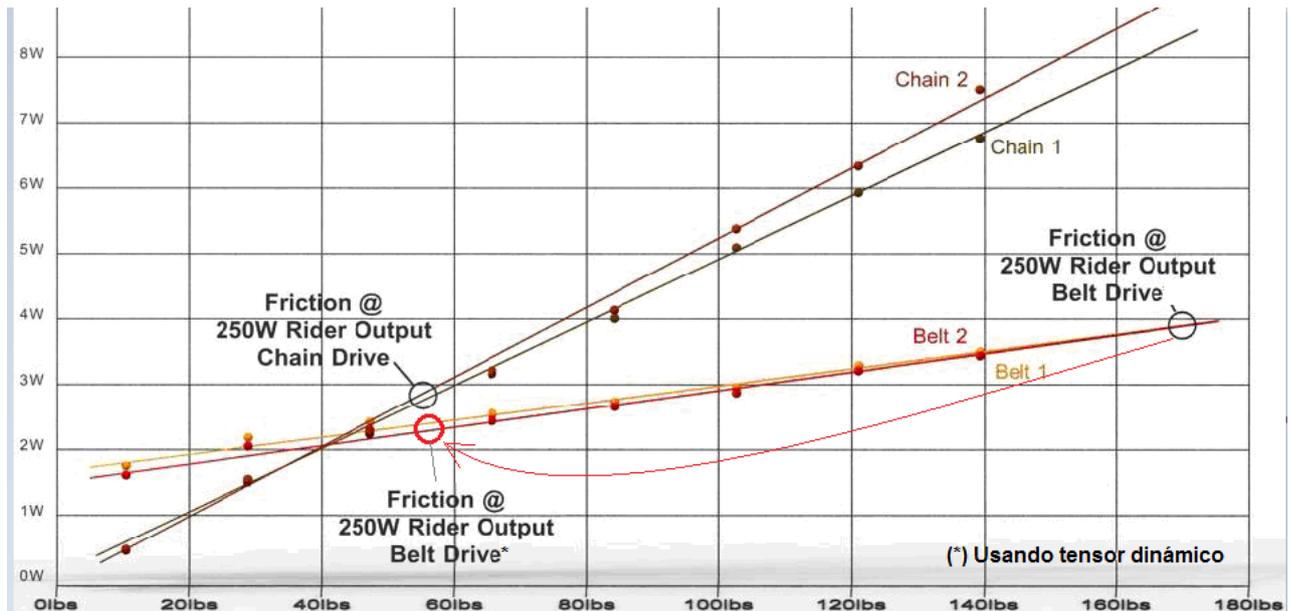


Gráfico 4.27: Descenso teórico de las pérdidas energéticas debido al efecto del tensor dinámico de correa.

Aplicando únicamente la teoría por el descenso de la carga acumulada en la correa se pasaría gracias a poder aplicar una precarga despreciable durante la rodadura, de perder casi 4W bajo las circunstancias indicadas a perder poco más de 2W. Al ser teórico no se tiene en cuenta el posible efecto negativo por fricción de la rueda del tensor ni evidentemente el efecto global por el incremento de peso en el sistema.

Dada esta situación teórica a día de hoy los usuarios no tienen claro qué es lo que motiva a las marcas a sacar modelos de correa sin tensor, no solo por este ahorro energético indicado si no también porque este sistema, sin tal precarga:

- Es más respetuoso con las piezas de la bici como los rodamientos del buje y del eje pedalier que no están sometidos a esa carga constante.
- Es más cómodo para el usuario que no tendría que estar calculando si el tense es correcto y suficiente.
- Es más seguro frente al desgaste de la correa y piezas ya que al no tener tanta tensión el efecto negativo de cualquier agente introducido entre el piñón y la correa es menor.

El efecto negativo en cuanto a rendimiento sería probablemente el peso extra aportado y el rozamiento de la roldana o rueda del tensor. Además es otra pieza a incluir en el precio final aunque eso en principio no habría de ser un impedimento.

4.4. Transmisión por eje de torsión

La transmisión a través del eje de torsión o *Shaft drive* es un sistema que elimina como elemento transmisor el compuesto por los conceptos de vano superior (tensión) y vano inferior (distensión), como sucede con la cadena y con la correa, siendo sustituido por un eje rígido que torsiona sobre sí mismo para, mediante engranajes de desmultiplicación y redirección, transmitir este movimiento hasta la rueda motriz.

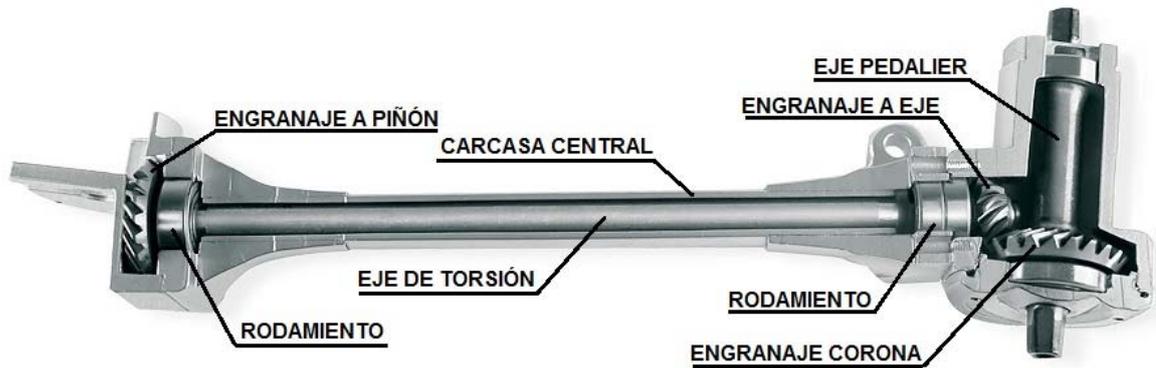


Imagen 4.28: Sección de una transmisión por eje de torsión / Parte interna

El rendimiento obtenido por este sistema, según el propio o los propios fabricantes de estos (todos ellos parecen coincidir en este dato), es considerado como el mismo que podría tener una cadena sin cruce, con una combinación de plato/piñón razonable, limpia y lubricada, es decir, en torno al 3-4%. Sin embargo, haciendo comparativas e investigaciones a través de comentarios de técnicos y usuarios de esta clase de sistema de transmisión, se constata que el rendimiento y fiabilidad de la transmisión por eje de torsión es algo menor en la práctica.

Se pueden obtener una serie de ventajas y desventajas que hacen que el eje transmisor de torsión en la bicicleta sea una opción válida o no en función de las consideraciones y expectativas realizadas por el usuario.

Las principales cualidades teóricamente positivas en comparación con el sistema de cadena serían:

- Mantenimiento: Mucho menor que en cadena al estar el eje y su lubricación protegidos por la carcasa del eje.
- Fiabilidad: Durante un uso normal el eje de torsión apenas necesitará de inversión para el mantenimiento excepto un reengrasado de las conexiones y partes móviles cada varios miles de kilómetros o según indique el fabricante. Además el fallo por suciedad, saltos de cadena, enganchones de la patilla de tensión o fallos por engranaje debido a la acumulación de objetos indeseados durante un uso, por ejemplo, entre maleza, no se va a dar en ninguna ocasión.
- Higiene: Al tener la lubricación a cubierto la parte externa en contacto con el usuario está exenta de grasa con lo cual se trata de un sistema limpio hacia el usuario.
- Seguridad: La velocidad o relación elegida no salta (Eje de torsión + gearbox o caja de cambios integrada de ruedas epicicloidales) al contrario de lo que puede ocurrir con el sistema de cadena si esta no está bien centrada.
- Protección: Las distintas carcasas se encargan de proteger las partes móviles que se encuentran en su interior efecto que protege a estas piezas clave frente a posibles golpes, agua, barro, roces, etc.
- Practicidad: Para sustituir la rueda trasera hay que soltar el buje sin más, no es necesario mancharse o perder excesivo tiempo en el desmontaje/montaje.
- Silencioso: Apenas aporta sonido durante el pedaleo.
- Robustez de la rueda: Al poseer de manera general el cambio de marcha insertada en el buje de la rueda el perfil de esta pasa a ser simétrico en lo que al ángulo de inclinación de los radios se refiere. Además la brida de apoyo en el eje es más amplia

con lo que los radios se hacen más cortos (ambos comentarios en comparación con el sistema de cambio por desviador).

Pero tal y como se ha indicado previamente la situación real que se desprende de este sistema aporta ciertos aspectos negativos:

- Limitación de fuerza ejercida: En algunos casos existe un límite en el par aportado al eje de torsión. De hecho ciertos fabricantes indican un límite máximo de uso para el mismo. Es cierto que tanto la cadena como la correa pueden tener un límite igualmente, sin embargo este está muy por encima de lo que las bielas pueden extraer de las piernas del usuario (a menos de existir un desgaste previo que disminuya la resistencia de aquellas), es decir, el margen de seguridad para la cadena y correa es alto al contrario que en el eje de torsión.
- Rendimiento menor del supuesto: Con los cambios de dirección de la fuerza de torsión y, principalmente, la propia deformación torsional causada en el eje y que aumenta cuanto mayor sea el par ejercido, el rendimiento se reduce bastante más de lo indicado por los fabricantes. Se calcula que aplicando potencias no muy altas, es decir situaciones casuales o paseos, la ineficiencia efectivamente es la indicada por el fabricante y similar a la de un sistema de cadena pero al aplicar cargas más exigentes, digamos subiendo un puerto, las pérdidas aumentan de forma exponencial al contrario de lo que sucede con la cadena.
- Precio: El propio sistema de eje de torsión es más caro que el sistema de cadena (posiblemente porque la diferencia de desarrollo y uso a nivel mundial de cada uno de ellos). La principal diferencia recae, al igual quizás que el sistema por correa, en la caja de cambios. Para este sistema analizado lo que se utiliza es el gearhub o gearbox trasero insertado en el buje de la propia rueda. Estas piezas a día de hoy son caras. Además el mantenimiento, aun siendo teóricamente muy bajo, ha de ser realizado por un profesional o un experto con lo cual es más caro que el de la cadena.

Otras características como el por ejemplo el peso son variables en función del tipo de eje de torsión que sea instalado siendo que en unos casos el peso puede ser menor que en una transmisión por cadena y en otros mayor que éste. Es el caso del eje de torsión estructural que tiene la cualidad de que la carcasa central actúa como si fuera la propia vaina del cuadro. Sin embargo en esta situación, y para ciertos diseños, la geometría del cuadro y sus puntos de cruce entre barras puede que se realice de forma un tanto excéntrica. Esto debilitaría estructuralmente al conjunto con lo que puede ser una solución no del todo válida para usuarios que necesiten de una alta capacidad resistente y fiabilidad en el cuadro.



Imagen 4.29: Eje de torsión estructural (montado sustituyendo la vaina inferior)



Imagen 4.30: Eje de torsión (sólo transmisión)

En definitiva, este tipo de sistemas de transmisión por eje de torsión parecen más adecuados para usuarios de perfil medio-bajo quienes utilizan la bicicleta relativamente poco, sin mayor exigencia que un uso cotidiano, sencillo y que además no quiere o no puede dedicar tiempo al mantenimiento de su bicicleta. Parece descartado para usuarios exigentes dado su bajo rendimiento y fiabilidad en momentos de exigencia energética.

4.4 Sistemas de cambio de relaciones: Desviador clásico y gearbox

En anteriores puntos se ha hablado de los cambios de velocidades clásico de desviación de cadena sobre la piña montada en la rueda trasera combinado con la desviación en los platos ubicados en el pedalier.

Las bicicletas equipadas con correa o con cadena sin desviador pueden llevar incorporado los sistemas de cambio de velocidad por medio de cajas de cambio o *gearbox* integradas por ruedas dentadas epicicloidales.

Estos sistemas se pueden ubicar bien en el interior del buje de la rueda trasera o bien junto con el eje pedalier. Están basados en la desmultiplicación del giro de entrada para sacar una relación mayor o menor que las revoluciones aportadas en origen, es decir, de una vuelta por pedalada pueden extraer un giro en rueda de dos vueltas, por ejemplo.



Imagen 4.31: Gearbox central / Desmultiplicación antes de medio transmisor.



Imagen 4.32: Gearbox en buje / Desmultiplicación después de medio transmisor.

El gearbox central presenta la ventaja de tener el reparto del peso del propio sistema totalmente centrado a la vez que presenta una desventaja y es que la tensión que sale desde él va directo al medio transmisor (cadena, correa o eje torsor) sin ningún tipo de reducción con lo

cual podría decirse que la transmisión hasta el piñón de la rueda, inclusive este, es más exigente y puede degradar el sistema más fácilmente siendo que el medio de transmisión puede llegar a dar potencias muy variables.

El gearbox trasero aventaja al central en lo opuesto. El medio transmisor mantiene una transmisión de potencia bastante constante al ser siempre la aportada por las piernas del usuario, sin embargo el peso aportado por la caja se deriva a la zona trasera de la bicicleta aportando un desbalanceo que puede ser incómodo dependiendo de la actividad que se esté realizando.

El desarrollo de las nuevas bicicletas eléctricas o con ayuda al pedaleo se está haciendo a través de estos sistemas principalmente porque no permiten la desconexión puntual del elemento transmisor como sucede con el desvío clásico de cadena evitando así problemas de falta de engranado y sobre todo roturas de dientes o desgaste acusado por exceso de tensión durante el cambio de marcha. En estos casos el cambio de marcha se hace de forma interna en la caja por medio de correas que conectan una cadena u otra de epicicloidales de forma continua, sin desconexión del medio.

Debido al uso en este tipo de bicicletas el desarrollo estas cajas de cambios están experimentando una mejora continua e implantándose como una alternativa seria a los desviadores clásicos.

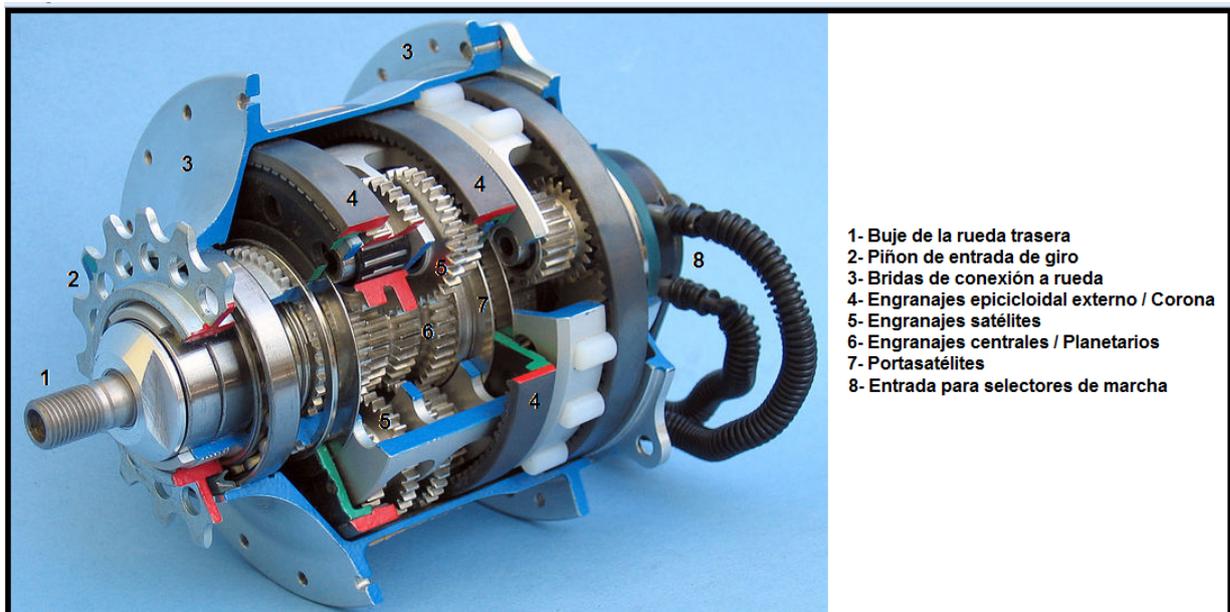


Imagen 4.33: Partes de una caja de cambios de buje trasero

Las cajas de cambio integradas presentan una serie de características básicas:

- Resistencia a agentes externos: El sistema está totalmente aislado del medio exterior por lo que es muy difícil que se vea afectado en su rendimiento interno por suciedad, barro, agua, polvo, etc.
- Protección frente a golpes: Al no tener partes móviles como patas de tensión o trapecios es difícil que se deteriore por golpes desde el exterior, roces o enganchones.

- Amplio rango de desmultiplicación (alta gama): Los sistemas actuales más punteros permiten alrededor de 18 desmultiplicaciones con más de un 500% de variabilidad en su relación.
- Sin mantenimiento: Según los fabricantes los gearbox están preparados para aguantar decenas de miles de kilómetros simplemente con un cambio de aceite cada x kilómetros a fijar por el propio fabricante.
- Cambio sin pedaleo necesario: Al contrario que los desviadores, el gearbox es capaz de efectuar el cambio de marcha en parado y/o sin pedalear.
- Cambio instantáneo: Una de las principales características frente a los desviadores y es que nunca se va a producir un salto en la transmisión de la fuerza sobre la rueda dado que el cambio de marcha es realizada al instante.
- No hay cruce de cadena posible: Tanto el plato como el piñón está totalmente alineados con lo cual la transmisión a través de la cadena o correa es más efectiva al igual que su desgaste y el de las partes implicadas como plato y piñón.
- Simetría en la rueda: Las bridas de conexión a los radios distan lo mismo a cada lado por lo que el efecto de aparaguado o asimetría en los radios desaparece aportando mayor robustez a la rueda.
- Radios más cortos: Las bridas de conexión a radio son más amplias(al menos en los gearbox situados en el buje trasero) lo que permite, para un mismo diámetro en comparación con el sistema de desviador clásico, que los radios sean más cortos mejorando la robustez y resistencia de la rueda.

¿Qué sistema elegir, desviadores clásicos o gearbox integral? Los estudios y comentarios investigados indican a que el rendimiento de un gearbox, bien central o bien en el buje trasero, tienen un rendimiento energético prácticamente idéntico que un sistema de marchas clásico en buenas condiciones de uso. La elección de uno u otro dependerá de la importancia que el usuario dé al global:

- Usuario exigente: un usuario de estas características se supone que tiene un mantenimiento del sistema de transmisión óptimo con lo cual en lo que a rendimiento se refiere podría elegir cualquiera de los dos sistemas. No obstante como se ha comentado, el peso de la gearbox es superior dando cierta importancia en este sentido al rendimiento global del equipo. Sí es cierto que para pruebas en las que intervenga la suciedad podría ser interesante el llevar la caja de cambios con sistema de correa, sistema en el cual puede que el peso de la correa menor que en de la cadena compense el incremento de peso de la gearbox. El problema de esta combinación podría ser que si hubiera de cambiarse la rueda por pinchazo o similar el tiempo aplicado para ello pudiera ser mayor que con sistemas tradicionales.
- Usuario medio: Aquel que suele salir en bici a rutear y hacer ejercicio de forma más o menos periódica teóricamente podría verse seducido por el sistema de correa y gearbox, sobre todo por durabilidad y por evitar el trabajo extra del mantenimiento. No obstante estos sistemas tienen principalmente dos problemas que no tienen que ver con factores técnicos: Precio e inercias comerciales.

¿Por qué a día de hoy estos sistemas de cambio de relaciones integrado no son de uso común? Se da por entendido que los principales focos de atención del mercado de bicicletas son los usuarios semi-profesionales y sobre todo los usuarios medios tal y como se ha descrito. Siendo que a nivel técnico parece más ventajoso el uso de cajas de cambios epicicloidales dado su alto rendimiento, bajo mantenimiento y alta fiabilidad no parece razonable el que las

gearbox no se estén utilizando de forma más generalizada, sin embargo dos razones de peso son las que parece son la causa principal de esto:

- Precio: La instalación de estos sistemas en una bici puede rondar los 600-800 euros para un sistema de gama media. Entre el Gearbox, plato, piñón, correa y rueda específica (si se trata de gearbox en buje) el precio puede ascender hasta esta cantidad, siendo que un sistema clásico de gama media puede rondar los 200-300 euros en componentes totalmente instalado. Ciertamente es que hasta ahora no se haya implantado con fuerza esta técnica hace que los precios no terminen de ser competitivos.
- Inercias comerciales: Los principales fabricantes de componentes y de bicis mantienen el sistema de desviador desde hace décadas. La gran acogida y popularidad por su fácil montaje, coste y mantenimiento relativamente fácil da ciertas garantías al usuario. Además, por extraño que pueda parecer, el que sus diferentes piezas puedan fallar y romperse con cierta periodicidad permite obtener constantes beneficios comerciales por reparación y cambio de componentes. Así se puede intuir que las dos o tres marcas punteras tienen garantizado el entramado mercantil por lo que es probable que, con la fuerza que pueden hacer, les interese mantener este mercado frente a otros tales como los comentados. Un cambio en "las reglas" permitiría a otras marcas penetrar en él con lo cual esto implicaría un riesgo que posiblemente no quieren o no tienen por qué correr. Por lo tanto y bajo este razonamiento se podría establecer una relación de por qué no se incentiva el uso de los sistemas con gearbox.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones generales

Tras el estudio y compilación de la información referente al pedaleo, la principal conclusión a la que se puede llegar es que la eficiencia tiene una importancia relativa a cada tipo de usuario, con exigencia baja, media y alta, siendo que el rendimiento no habría de considerarse únicamente como la eficiencia energética obtenida si no también dejar un hueco al concepto de rendimiento por funcionalidad, es decir, a que el usuario esté contento no solo por el ahorro de energía si no también por el ahorro de tiempo y dinero durante su uso y disfrute.

El presente TFM se centra en la energía desperdiciada o ganada en función de una mejor técnica de pedaleo y un mejor uso del sistema de transmisión, pero también realiza apuntes del trabajo o tiempo invertido en mantenimiento o incluso de comparativas económicas. Así, dentro de cada colectivo se podría concluir como resumen:

- Usuarios exigentes: Estos son aquellos ciclistas profesionales, semi-profesionales o amateurs avanzados quienes buscan pulir cualquier aspereza en su técnica de pedaleo y aplicación tecnológica. Este colectivo estaría muy interesado en poner en práctica los consejos y análisis realizados en este TFM en busca de arañar el ahorro del Watio malgastado por lo que en ellos influirá mucho el resultado final de rendimiento energético y fiabilidad puntual sin importarles la necesidad de mantenimiento de las piezas (tiempo empleado), fiabilidad a largo plazo y precio de los componentes. Por supuesto, gran importancia a la biomecánica y a la mejora constante. Estos usuarios elegirían transmisión por cadena dado que a día de hoy es el sistema con mejor rendimiento pero con un alto grado de mantenimiento para permitir esta eficiencia. Los cambios son por desviadores dado su bajo peso y

alto número de combinaciones en detrimento de los gearbox que tienen más limitado el número de combinatorias y aportan más peso al conjunto.

- Usuarios medios: Este se puede considerar como el principal colectivo ya que agrupa a multitud de usuarios a quienes les gusta disfrutar de la bicicleta desde un punto de vista equilibrado. No le dan tanta importancia al rendimiento energético fino de la transmisión o de la bicicleta en general, es decir, un 1% o 2% de gasto extra en su marcha no presenta ningún inconveniente. Para este colectivo lo importante es que la bici les funcione sin problemas aparentes, con los reglajes del cambio bien acoplados, la cadena (sistema generalizado) bien engrasada y sin elongaciones... Dado que a nivel comercial lo habitual es encontrar bicicletas con sistema clásico de cadena y desviador para los cambios, este colectivo mayoritariamente va a elegir este tipo de transmisión. Sin embargo estaría justificado el cambio a sistema por correa y cambio integrado en caja de cambios o buje trasero si esto no supusiera un desembolso alto, lo cual a día de hoy, con características competitivas, no existe. Este sistema permitiría un bajo nivel de mantenimiento situación que el usuario medio agradecería ya que en este caso el rendimiento lo considera como un compendio entre eficiencia energética y de tiempo empleado para su cuidado, lo cual es aportado por este sistema de correa.
- Usuarios poco exigentes: Este tipo de usuario no necesita tener una bicicleta energéticamente capaz si no más bien un sistema que siempre esté en condiciones de uso cotidiano en cualquier momento, que resista bien los agentes externos y sea resistente a posibles golpes o maltrato del material. Lo habitual es que lleven el sistema de cadena dada su amplia extensión comercial ya comentada, sin embargo lo óptimo para este colectivo podría ser el eje de torsión ya que va totalmente protegido de la intemperie con lo cual no necesita mantenimiento, se le puede acoplar un gearbox en el buje trasero con 5 o 6 velocidades con lo que se combina una transmisión muy resistente y relativamente eficiente para marchas de poca potencia con un precio accesible.

5.2. Principales aportaciones

El presente TFM posee principalmente la cualidad de agrupar multitud de conceptos e información de un tema interesante para muchos ciclistas y que hasta ahora no había sido tratado conjuntamente.

El poder tener una comparativa técnicamente refrendada de varios sistemas de transmisión y cualidades dentro de cada uno de ellos para su mejora en un solo documento es la principal virtud y aportación.

No obstante, se prevén ciertas mejoras en sistemas o análisis teóricos de aportación propia:

- Un tema un tanto opaco como es el tensor dinámico de la correa (ver *punto 4.3.3*) del cual no es fácil encontrar estudios, bibliografía o foros de cómo afecta esta aportación al global del rendimiento de este sistema. Lo que se ha hecho en el presente es realizar una interpretación gráfica y una equivalencia teórica.
- La interpretación de los valores y características del pedaleo sobre platos ovalados u ovoides (ver *punto 3.7.5*) está realizada a partir de la lectura de artículos y debates con usuarios a lo largo del tiempo además de los análisis comentados por especialistas.
- El análisis de rendimiento vectorial del cruce de cadena (ver *punto 3.2.1.a*) se realizó para contrastar las indicaciones de *J. Spicer* dado que en su estudio no daba más datos que la no afección por este motivo y por tanto su despreciabilidad dentro del rendimiento global. Al ser este un tema candente entre los usuarios se realizó una contrapropuesta y finalmente se contactó con *J. Smith* personalmente para poder compartir información a este respecto. Así queda reflejado en el *punto 3.2.1.b*.

En cualquier caso, cada uno de estos temas tocados en el presente trabajo podrían tener un desarrollo propio más extenso pero si se quiere realizar una memoria completa dentro de las limitaciones que por definición posee un TFM la información final aportada ha de ir directa a la cuestión realizando con cautela un equilibrio suficiente para que a la vez de demostrar y dejar claros los conceptos estos no sean demasiado extenso como para que la suma global de puntos y afecciones entre dentro del concepto de Trabajo Fin de Máster.

5.3. Sugerencias para trabajos futuros

El presente TFM comenzó con la idea de hacer un ejercicio de rendimiento de la bicicleta de forma global, es decir, tanto la biomecánica y la transmisión, finalmente expuestos, como factores tan sumamente determinantes como el peso, los materiales, la aerodinámica e incluso sistemas de suspensión o neumáticos era lo planteado y lo que en inicio se pretendía exponer. Dos factores fundamentales hicieron que no pudiera ser realizado de esta forma:

- El grado de desarrollo que suponía esta exposición de cada uno de los sistemas que entran a formar parte del rendimiento global de la bicicleta debiera ser tan completo que la extensión que ello hubiera reportado crearía un informe muy extenso, totalmente fuera de los límites marcados para el TFM, y sin embargo, una exposición más liviana de cada uno de ellos implicaría previsiblemente un trabajo de exposición del estado del arte sin mayor interés.
- El tiempo que habría de emplear para conseguir un desarrollo de todos los sistemas indicados similar al desarrollado para la biomecánica y transmisión sería muy alto contando con que temas como materiales, aerodinámica y suspensión, por citar tres sistemas, tienen mucho material desarrollado, bastante más que a nivel de transmisiones del cual no se ha analizado tanto a lo largo del tiempo ni se ha avanzado tanto como en estos otros tres.

Estas indicaciones habrían de servir a futuros alumnos como piedra de toque para iniciar el desarrollo, compilación y estudio de esos sistemas que tan decisivamente afectan al global del rendimiento sobre la bicicleta.

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

- (1) "Road cycling" (Robert J. Gregor / Francesco Conconi, 2001)
- (2) "La eficiencia del pedaleo" (David Suárez, 2007)
- (3) "¿Cuál es la mejor cadencia de pedaleo?" (Richard Giménez, 2013)
- (4) "Bicycle hub bearings" (John Neugent)
- (5) "Effects of Frictional Loss on Bicycle Chain Drive Efficiency" (Jim Spicer and others, 2001)
- (6) "Effects of lateral chain misalignment (Cross-Chaining) on drivetrain efficiency" (Jason Smith, 2015)
- (7) "Pre-race and Post-race in dirty race conditions" & "Effects of cleaning and Re-lubing after a dirty race" (Jason Smith, 2015)
- (8) "Chain efficiency test" (Jason Smith, 2015)
- (9) "The effects of chain elongation vs. efficiency" (Jason Smith, 2015)
- (10) "Oversized derailleur pulley efficiency test" (Jason Smith, 2015)
- (11) "Stiffness and damping in mechanical design" (Eugene Rivin – Wayne State University, 1999)
- (12) "Gates carbon drive system vs traditional chain drive – Efficiency test" (Jason Smith, 2015)

ANEXO 1: Cinemática de la cadena

A.1.1 Análisis cinemático

En toda cadena de transmisión, cada vez que se produce el engrane de un eslabón con la rueda dentada, se produce una variación tanto en la trayectoria como la velocidad del eslabón. Es lo que se conoce como "efecto poligonal".

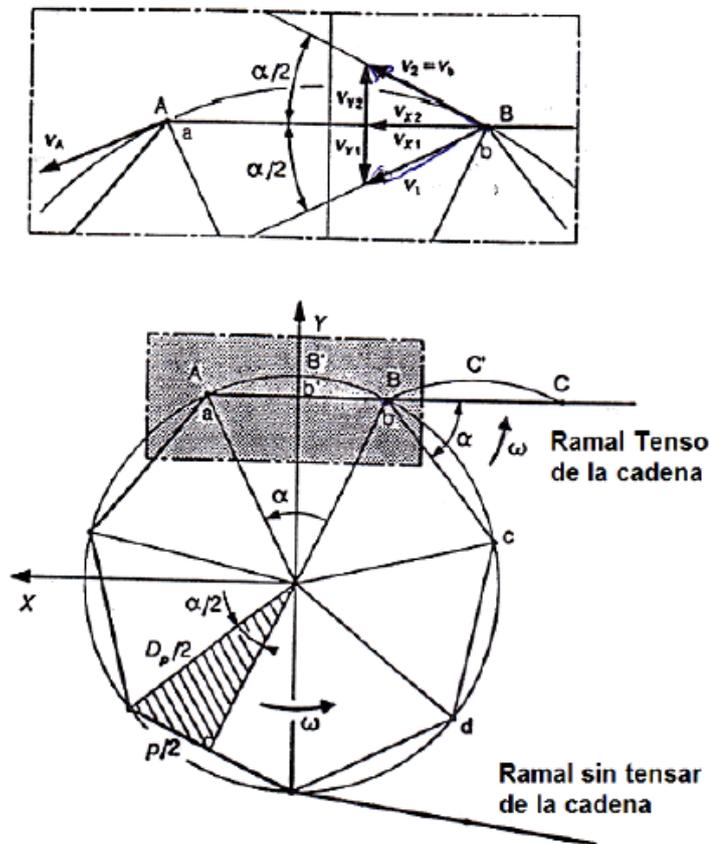


Figura A.1.1: Movimiento de la cadena sobre la rueda dentada

En la figura anterior b, B representan puntos pertenecientes a la rueda y a la cadena respectivamente, ω es la velocidad angular a la que gira la rueda dentada y D_p es su diámetro primitivo.

La velocidad lineal de la rueda (v_b) viene expresada en función de su velocidad angular de giro (ω) y su diámetro primitivo (D_p). Debido al llamado efecto poligonal, la proyección horizontal de la velocidad del punto B de la cadena (v_{Bx}) varía a lo largo del arco de engrane. Esta variación de la velocidad horizontal de la cadena se hace menor conforme aumenta el número de dientes (z) de la rueda.

En efecto, si aumenta el número de dientes (z) de la rueda, el ángulo α entre dientes disminuye, por lo que la geometría poligonal tiende a semejarse a una

circunferencia, y el llamado efecto poligonal se atenúa por lo que la variación horizontal de la velocidad de la cadena (v_{Bx}) a lo largo del arco de engrane se hace menor. No obstante, el número de dientes de la rueda no puede aumentar en demasía, dado que esto supone que la altura de los mismos se haga más pequeña y la posibilidad de desengranar la cadena, es decir, que se salga la cadena de la rueda dentada será mayor.

A.1.2. Transmisión de esfuerzos

El valor del esfuerzo que transmite la cadena es máximo en la primera articulación del eslabón que engrana con la rueda por el ramal tenso de la cadena, y a partir de ahí este esfuerzo va gradualmente decreciendo conforme avanza por el arco de engrane hasta salir de la rueda por el ramal de la cadena que está menos tensado.

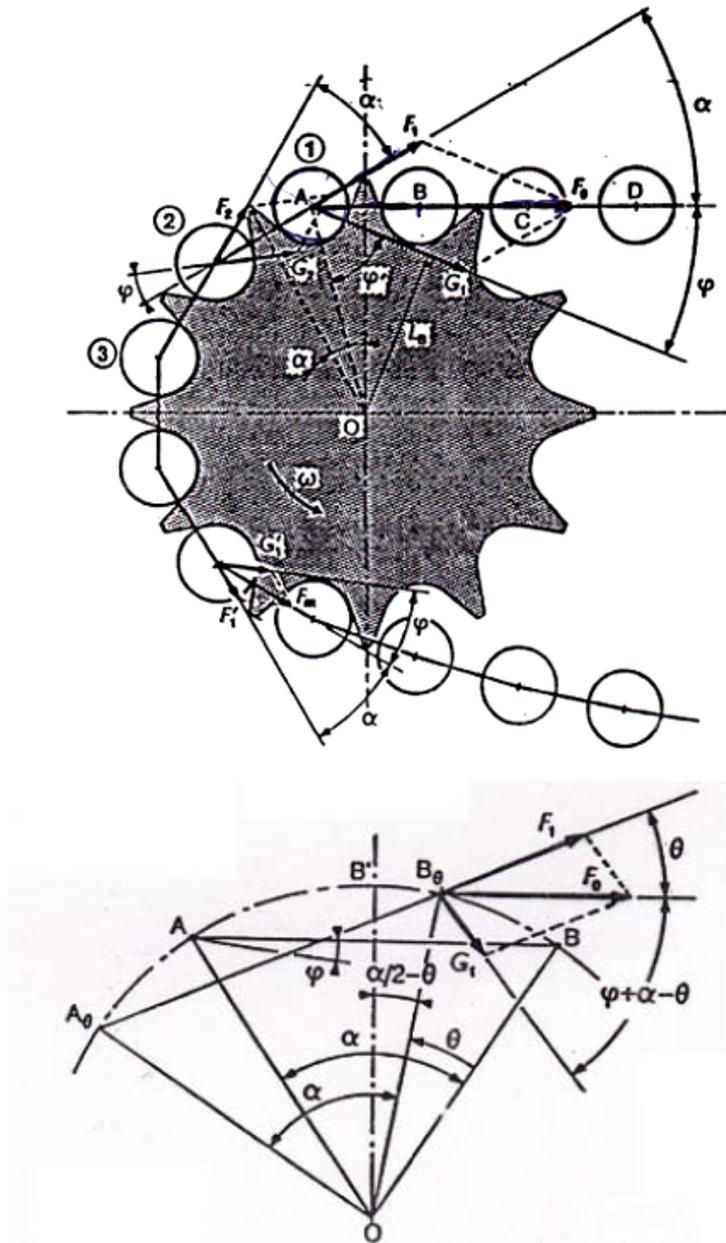


Figura A.1.2: Esfuerzos de la cadena en la rueda durante el momento de engrane

Si F_0 es el esfuerzo máximo que soporta la cadena y que se origina en la primera articulación de la misma al engranar con el primer diente de la rueda al entrar en contacto, el esfuerzo que soporta la cadena en las siguientes articulaciones viene expresado por la siguiente formulación:

$$F_n = F_0 \cdot \left[\frac{\text{sen } \varphi}{\text{sen}(\alpha + \varphi)} \right]^n$$

Siendo n el número de articulación de la cadena.

Por otro lado, la cadena origina una reacción sobre la rueda dentada al engranar en los dientes, que viene expresada por:

$$G_n = F_0 \cdot \left[\frac{\text{sen } \varphi}{\text{sen}(\alpha + \varphi)} \right]^{n-1}$$

Ambos valores, tanto esfuerzos entre las articulaciones de la cadena (F_n) como las reacciones sobre la rueda (G_n), van decreciendo paulatinamente desde el ramal tenso de la cadena hacia el ramal menos tenso. Se comprueba que en una de las articulaciones la reacción (G_n) sobre la rueda llega a ser radial, es decir, la articulación de la cadena aprieta el fondo de la rueda. En el resto de articulaciones la reacción de la cadena sobre la rueda se realiza sobre el flanco de los dientes.

El desgaste progresivo de los dientes hace que la reacción sobre el flanco se realice cada vez a una mayor altura, llegando el momento en que al ser la holgura tan importante la cadena salte el diente y se salga de la rueda.

Por otro lado, la composición del esfuerzo total (F_0) que soporta la cadena, incluye a su vez los siguientes tipos de esfuerzos según el origen:

- 1º. Una componente útil o esfuerzo útil asociado al par transmitido (F_u);
- 2º. Otra componente del esfuerzo asociado a la fuerza centrífuga de la cadena (F_c);
- 3º. Una última componente asociada al peso propio de la cadena o esfuerzo de la catenaria (F_p). Esta componente del esfuerzo en las cadenas de transmisión de potencia que suelen ser más corta es despreciable, pero en las cadenas de manutención y de carga, que son más largas y pesadas, habrá que considerarlo.

El esfuerzo total (F_0) en la cadena se obtiene sumando las componentes anteriores:

$F_0 = F_u + F_c + F_p$. En la tabla contigua que incluye las principales fórmulas de cálculo de las cadenas de transmisión se puede consultar la formulación

que proporciona los valores de las distintas componentes del esfuerzo: F_u , F_c y F_p .

Diámetro primitivo de un piñón de z dientes	$D_p = \rho / \text{Sen}(\pi/z)$
Efecto poligonal de la velocidad de la cadena: - Longitudinal - Transversal	$V_{bx} = \rho \cdot \omega \cdot \cos((\alpha/2) - \phi) / (2 \cdot \text{sen}(\alpha/2))$ $V_{by} = \rho \cdot \omega \cdot \text{sen}((\alpha/2) - \phi) / (2 \cdot \text{sen}(\alpha/2))$
Amplitud transversal debido al efecto poligonal	$H_t = \rho / 2 \cdot \text{tg}(\alpha/4)$
Velocidad lineal promedio de la cadena	$V = \rho \cdot z_i \cdot N_i / 60$
Esfuerzo útil Esfuerzo centrífugo Esfuerzo de catenaria	$F_u = P/v$ $F_c = M \cdot v^2$ $F_p = M \cdot g \cdot ((B^2/8 \cdot h) + h)$ siendo $h = \frac{1}{2} \cdot (B'^2 - B^2)^{1/2}$
Reacciones de la zona engranada - Del enlace n - Del diente n Reacción del brazo de palanca de la reacción G	$F_n = F_o \cdot (\text{sen} \phi / \text{sen}(\alpha + \phi))^n$ $G_n = F_{n-1} \cdot (\text{sen} \alpha / \text{sen}(\alpha + \phi))$ $L_b = D_p / 2 \cdot \cos(\alpha/2 + \phi)$
Frecuencias de excitación - Por un giro de cadena - Por efecto poligonal - Por la excentricidad	$f_1 = z \cdot \omega / (2 \cdot \pi \cdot L)$ $f_2 = z \cdot \omega / (2 \cdot \pi)$ $f_3 = \omega / (2 \cdot \pi)$

<p>Frecuencias propias de la oscilación</p> <ul style="list-style-type: none"> - Longitudinales - Transversales 	$F_l = k/(2*B)*(R/M)^{1/2}$ $F_{\lambda t} = \lambda/(2*B)*(F_o/M)^{1/2}$
<p>Presiones de contacto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Real (según Hertz) - Convencional 	$P_s \max = 0.838/d*(F*E*a/l)^{1/2}$ $P_s = F/(d*l)$ <p>siendo d=diámetro de perno l=longitud de casquillo</p>
<p>Velocidad económica</p>	$V_e = (P/(2*M))^{1/3}$

A.1.3. Potencia transmitida: método de dimensionado de cadena

La potencia transmitida por la cadena viene determinada por el esfuerzo útil (F_u) y su velocidad lineal promedio (v):

$$P = F_u * v$$

Siendo (F_u) el esfuerzo útil asociado al par de fuerza transmitido, y (v) la velocidad lineal promedio de la cadena, que a su vez puede ser expresada en función de la velocidad angular de giro (ω) y el diámetro primitivo (D_p) de la rueda dentada como,

$$V = D_p * \omega / 2$$

No obstante, para el cálculo y diseño o más concretamente, para la selección de la cadena (a nivel genérico) que un determinado sistema de transmisión necesita, se usará la potencia corregida de cálculo (P_c), obtenida a partir de la potencia transmitida (P) anterior afectada por unos coeficientes que tendrá en cuenta diversos aspectos del montaje y uso de la cadena:

$$P_c = K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * P$$

Importante indicar que para este valor de potencia P_c se presupone una cadena en un buen estado de uso y perfectamente lubricada. A continuación se expone cómo obtener los valores de los anteriores coeficientes:

- Coeficiente K_1

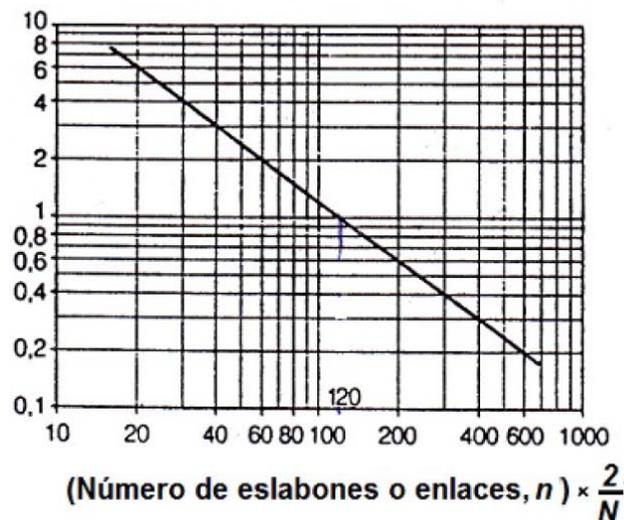
Tiene en cuenta que el número de dientes de la rueda pequeña o piñón sea distinto de 19. En efecto, si el número de dientes del piñón es igual a 19 el coeficiente (K_1) toma de valor la unidad ($K_1 = 1$). En caso contrario, se puede tomar como primera aproximación para el valor de (K_1) la proporcionada por la siguiente expresión:

$$K_1 = 19/z$$

Siendo (z) el número de dientes de la rueda pequeña o piñón.

- Coeficiente K_2

Tiene en cuenta el número de eslabones o enlaces que conforman la cadena. El valor K_2 se obtiene entrando en la siguiente tabla:



Siendo n el número de eslabones o enlaces de la cadena y N el número de ruedas de la transmisión. En este caso, para una bici convencional, $N=2$.

- Coeficiente K_3

Es el factor de servicio que tiene en cuenta las condiciones en que trabaja la transmisión. Es un factor muy importante, aproximativo y difícil de afinar, que relaciona la constancia en la tensión de la cadena con el rendimiento que a esta se le saca dependiendo directamente de la forma de pedalear del usuario.

En la relación contigua se dan valores del coeficiente K_3 para tres casos específicos de motores:

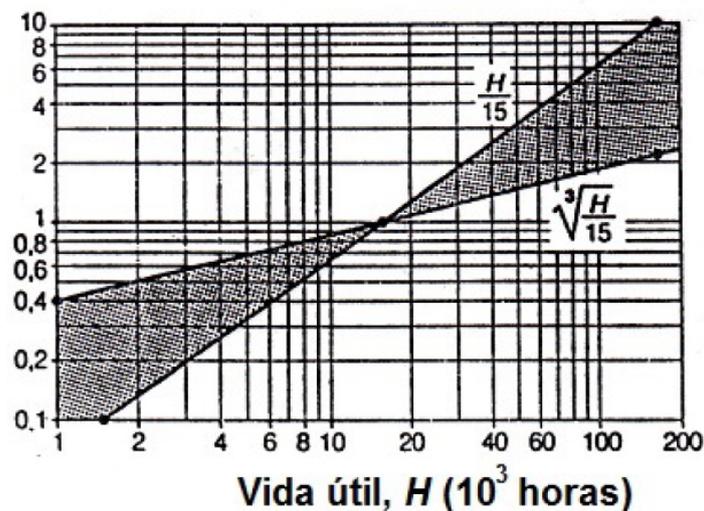
- Motor eléctrico: $K_3 = 1.00$ (*carga constante, tensión en cadena constante*)
- Motor de explosión de 4 y más cilindros: $K_3 = 1.10$ (*mínimo, en el caso de 4 cilindros, 2 cargas puntuales más o menos amplias durante los 360° de giro*)

- Motor de explosión con menos de 3 cilindros: $K3 = 1.30$ (máximo, en el caso de 3 cilindros, de 2 cargas puntuales durante 720° de giro)

Con estos datos un técnico dedicado a la valoración de las diferentes condiciones de trabajo podría equiparar estos casos particulares a la forma de pedaleo del ciclista a analizar: Si el pedaleo es más o menos redondo o, en otras palabras, si la tensión de la cadena por vuelta oscila mucho o poco. Cuanto menos oscilación el coeficiente de pérdidas $K3$ se acercará más a 1. Suponiendo o dando por seguro que el ciclista no es capaz de ejercer constantemente la misma tensión en cadena a lo largo de los 360° del pedaleo, un buen rodador con platos especiales (análisis a posteriori) y con entreno en pedaleo redondo podría estar cerca de un $K3=1.01$. Sin embargo un usuario de perfil utilitario puede tener una $K3 = 1.10$. Entre esas dos constantes (1% y 10%) se va a mover la interpretación que se obtenga del análisis al ciclista en cuestión.

- Coeficiente $K4$:

Es el coeficiente de duración en función de la vida útil prevista para la cadena.



Tal y como se ha indicado este valor P_c , aproximativo, cuenta con que la cadena esté en buenas condiciones de uso. Si la cadena estuviera sucia, no lubricada o desgastada habría que añadir un coeficiente extra a valoración del técnico aunque parece claro que realizar esta valoración en esas condiciones carecería de sentido.