

Estudio de la viabilidad del uso de un motor generador en el desarrollo de bicicletas estáticas.

Carlos García García, Javier Gil Lázaro, Miguel Vaquero Sánchez, Rubén Mariano Serrano

Ing. Diseño, Ing. Mecánica, Ing. Mecánica, Ing. Eléctrica, Respectivamente.

Resumen

En este proyecto se estudiará la viabilidad de implementar en una bicicleta estática un motor Como sistema de frenado para aportar funciones que actualmente no están satisfechas. Para ello se ha realizado un análisis de los sistemas actuales y del comportamiento de las personas que utilizan las bicicletas estáticas, donde se ha determinado el camino del proyecto hacia un perfil concreto de usuarios. Paralelamente se han estudiado aspectos biomecánicos del ciclismo, así como fuerzas que influyen en el ciclista, para ajustar el perfil de usuario definido previamente. Seguidamente con estos ajustes se procederá al diseño del motor junto con su accionamiento y de este modo poder comprobar la viabilidad de este.

1. Introducción

En el mercado actual se encuentra como la bicicleta estática está adquiriendo un gran protagonismo. Esto se debe a la complejidad de los sistemas que utiliza, ya que permite controlar una gran cantidad de datos como cadencia del pedaleo, potencia o frecuencia cardíaca. De esta manera se permiten entrenamientos más precisos, y que satisfagan a una gran cantidad de personas con diferentes objetivos, los cuales pueden ser: tratamientos de rehabilitación, la realización de un ejercicio cardiovascular, la pérdida de peso o la práctica del spinning, una actividad que dispone de una gran cantidad de seguidores. Es por estos motivos que se desea proponer mejoras en este sector, con el fin de seguir una línea hacia el realismo de la bicicleta convencional.

2. Bicicletas estáticas actuales

Después de realizar un estudio de las bicicletas estáticas actuales, se ha detectado una serie de carencias en los frenos que utilizan.

3. Usuarios

Con el fin de mejorar los sistemas actuales se realiza un estudio de los usuarios. De este modo se determinan características como:

- Zonas de trabajo habituales que definen potencia, cadencia y par en el pedal.
- Formas de trabajo habitual.
- Características de las bicicletas reales que utilizan los diferentes usuarios.

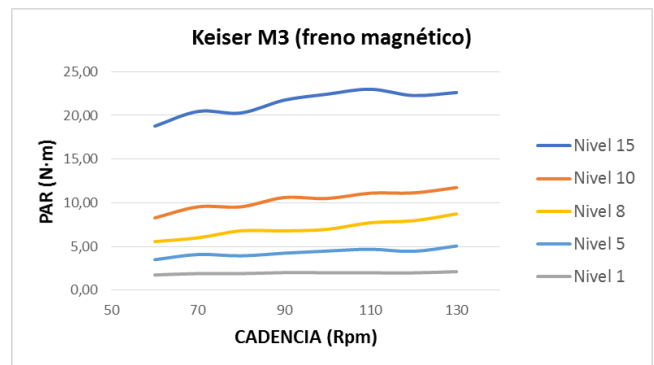


Fig. 1. Ejemplo de pie de figura

Esta gráfica muestra como a medida que se aumenta la cadencia en la bicicleta Keiser M3, el par de frenado aumenta pero de una forma irregular. Además de esto, su tendencia creciente tiende a ser lineal y por tanto no aumenta como en un caso real.

Por otro lado mediante la realización de una clase de spinning se han detectado algunos puntos negativos como:

- Todos los participantes realizan la misma intensidad de ejercicio. Esto puede repercutir en lesiones para los participantes o la incorrecta realización de la sesión.
- Es difícil seguir las indicaciones del monitor cuando indica el nivel de intensidad que se debe aplicar, ya que el freno generalmente es manual y no puede precisarse la posición de este.

4. Propuesta

Debido a las carencias encontradas en el estudio de los usuarios, se proponen las siguientes mejoras en función de cada uno:

- Uso general: permitir programar entrenamientos por objetivos, y mantener un registro de ellos para motivar a estos a conseguirlos.
- Amateur y profesional de carretera: simular recorridos en los que se encuentran zonas llanas y de montaña, una serie de entrenamientos específicos, entrenar el pedaleo redondo, y tener en cuenta el sistema de piñón libre o fijo.
- Profesional de pista: programación de entrenamientos cortos que permitan aplicar una intensidad elevada. Además de tener cuenta una transmisión mediante piñón fijo que es el utilizado en las bicicletas utilizadas por este perfil.
- Spinning: programar una prueba de máxima potencia y a partir de aquí poder definir el perfil de cada persona, repercutiendo en un entrenamiento óptimo, y mejorando la comodidad del monitor que realiza la clase.
- Rehabilitación: poder definir un par máximo, para que el usuario no sobrepase la fuerza que debe aplicar en el pedal y poder realizar el ejercicio evitando posibles daños. Por otro lado permitir trabajar diferentes zonas de la pierna con mayor o menor intensidad y simular el sistema de piñón libre.

Teniendo en cuenta todas las aportaciones que se desean ofrecer, se considera la aportación de un sistema de frenado que consista en la aplicación de un motor eléctrico. Deberá tener las siguientes características:

- Un control exacto del par respecto a la posición.
- Un alto par que se asemeje a un caso real.
- Permite el entrenamiento del pedaleo redondo.
- Gracias a su control permite la simulación de etapas.
- Posibilidad de almacenamiento de datos de entrenamientos.

Finalmente para comprobar que esta propuesta de sistema de frenado es viable, se determina una zona de trabajo que abarca a los usuarios amateur y profesional de carretera. Este intervalo es suficientemente grande para abarcar a otros usuarios, así se podrán detectar líneas futuras.

Zona de trabajo determinada	
Potencia mínima	100 W
Potencia máxima	1100 W
Cadencia	50 - 125 rpm

Tabla 1. Zona de trabajo limitada por la potencia y por la cadencia

5. Estudio del sistema mecánico de la bicicleta

En este apartado se ha realizado el estudio de toda la mecánica que afecta a la bicicleta, con el objetivo de entender todos los parámetros que intervienen en él, y comprobar su influencia para posteriormente implementarlo en Matlab/Simulink. El estudio se ha dividido en dos partes. La primera parte trata de las fuerzas propulsivas que genera el ciclista, y la segunda parte trata de las fuerzas de rozamiento que afectan al avance de la bicicleta.

5.1. Fuerzas propulsivas aplicadas a los pedales

Para la realización del estudio de las fuerzas propulsivas se ha escogido como datos de entrada la cadencia, dentro de un rango, y la fuerza que ejerce el ciclista sobre el pedal.

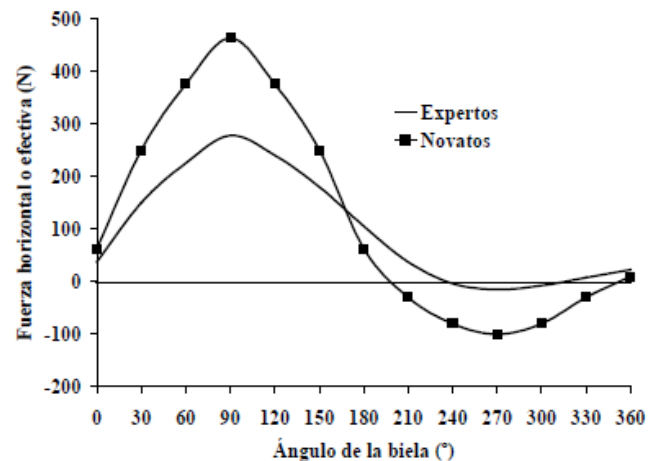


Fig. 2. Fuerzas que ejercen sobre el pedal durante un ciclo de pedaleo un ciclista profesional y ciclista amateur

Con la fuerza representada en la gráfica anterior, extraída de [1], y con la longitud de la biela, se ha calculado el par que ejerce el ciclista en un ciclo de pedaleo sobre la biela. Este par aplicado en la biela es el responsable de vencer el par resistente provocado por las fuerzas de rozamiento y transmitido hasta el plato. Si el balance de este sumatorio es positivo se produce el avance de la bicicleta. En caso contrario, se frenará.

5.2. Fuerzas de rozamiento

Dentro del ciclismo existen tres fuerzas de rozamiento que se oponen al movimiento de la bicicleta:

- Fuerza de rozamiento del aire.
- Fuerza de rozamiento por rodadura.
- Fuerza de la pendiente.

Cada una de estas fuerzas de rozamiento depende de unas variables determinadas. La pendiente (°) del terreno tiene un efecto tanto en el rozamiento por rodadura como en el rozamiento de la pendiente. En cambio, la velocidad (V) de la bicicleta es el parámetro que más afecta al rozamiento del aire.

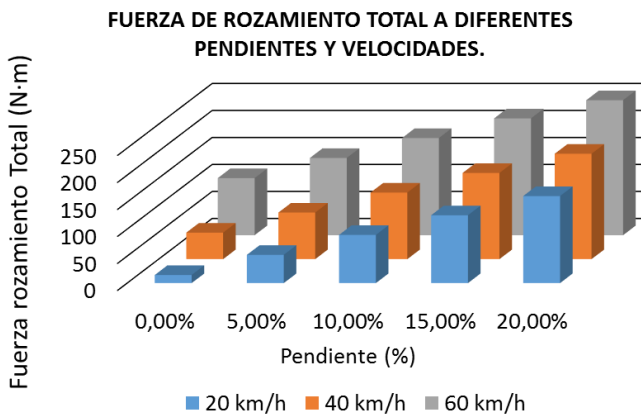


Fig. 3. Fuerzas de rozamiento total a diferentes pendientes y velocidades

A medida que la velocidad aumenta, también lo hace la fuerza de rozamiento del aire, y a medida que aumenta la pendiente, también aumenta las fuerzas de rozamiento por rodadura y de la pendiente.

El objeto de conocer estas fuerzas resistivas es encontrar el par de rozamiento final que se opone al par generado por el ciclista. Para realizar este sumatorio es necesario conocer el radio de la rueda para encontrar el par generado en ella. Llegados a este punto es necesario saber la relación de transmisión para encontrar finalmente el par de rozamiento en el plato que se opone directamente al generado por el ciclista.

5.3. Rangos de trabajo

Teniendo en cuenta las especificaciones de las zonas de trabajo de los ciclistas amateurs y profesionales descritas en el estudio de usuario, y sabiendo las curvas de rozamiento se encuentran las zonas de trabajo que fijan las especificaciones técnicas que debe abarcar el motor. Poniendo en común todos estos puntos se obtienen los rangos de trabajo.

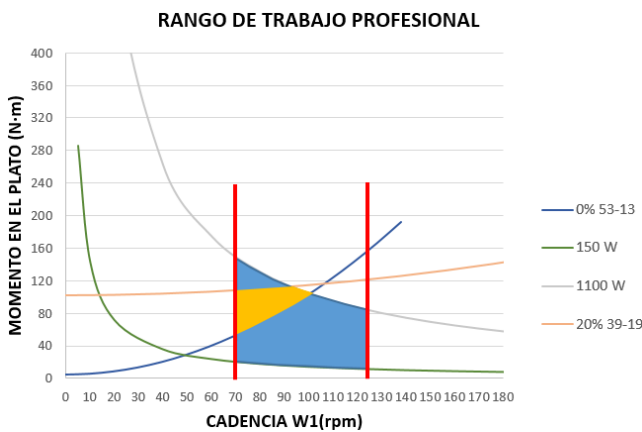


Fig. 4. Rangos de Trabajo para ciclistas profesionales

En la gráfica se muestra el rango de trabajo para ciclistas profesionales, la cual abarca a todos los demás usuarios. La zona marcada en azul se refiere al rango total, y la zona amarilla se refiere a la zona donde el ciclista va a trabajar la mayor parte del tiempo.

6. Elección del motor

En base a los requerimientos exigidos se seleccionará un motor entre 4 candidatos posibles para el óptimo funcionamiento de esta aplicación [3]; los motores candidatos han sido

- Inducción
- Brushless
- MHR
- Motor síncrono con imanes

La elección del motor ha sido el MHR, debido a que es un motor de construcción sencilla, y de coste bajo ya que se trata de un apilamiento de chapas con las cuales se determina el grosor del motor, un bobinado por cada fase y un imán insertado por cada fase para aumentar el flujo de esta fase.

Tiene la opción de una variación en la estructura del motor. Por otro lado, es un motor que se le permite un buen control electrónico, por lo que también tiene una buena precisión en cuanto al par y a la velocidad.

Gracias a la posibilidad de cambio de construcción, se ha propuesto la ubicación del motor en el volante de inercia, para de esta manera aprovechar la inercia del mismo.



Fig. 5. Esquema de ubicación del motor

7. Accionamiento MHR

Los accionamientos que componen un motor MHR son los descritos a continuación:

- El convertidor estático o bloque de potencia.
- Sensores
- Control de accionamiento
- Motor HRM

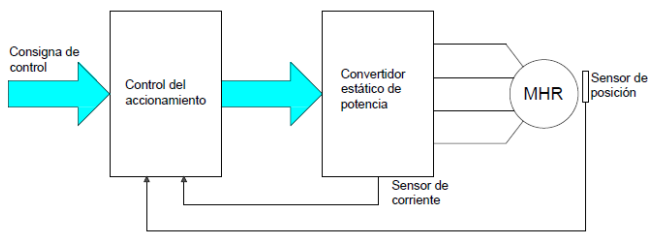


Fig. 6 Esquema de accionamiento HRM

8. Motor

Se diseñará un motor que actúe como freno, el cual se adecue a los requisitos establecidos por el estudio de usuario, y al estudio mecánico así como:

- Rango de velocidades de trabajo al que deberá trabajar el motor.
- Proporcionar el par necesario que cubra el estudio mecánico.
- Un corto paso polar para que el motor pueda tener un preciso control del par en una revolución.

8.1. Ensayos

Se realizarán unos ensayos de tendencia, para ello habrá que tomar dos valores extremos y analizarlos, y con ello ver la tendencia que tiene este cambio de parámetro, se ha realizado este ensayos para las partes que más influyen en el diseño del motor, y así poder realizar un diseño con unos criterios.

- Influencia de los Polos.
- Influencia del ancho de la corona estator y rotor.
- Influencia del ancho de polos del rotor y estator.
- Influencia de número de espiras.
- Influencia en la variación del entrehierro.

8.2. Propuesta de motor

Para el diseño final del motor se han tenido en cuenta todos los parámetros analizados anteriormente para el funcionamiento óptimo de este, y que se adapte lo mejor posible a los requisitos del motor de manera que el coste económico de este sea el menor posible.

Numero de fases: El motor tendrá 3 fases en el estator

Numero de Polos: El motor tendrá 20 polos en el rotor, esto influye en que al tener un número de polos elevado, el motor trabaja a altas potencias a bajas velocidades, por otro lado con ese número de polos se puede obtener un paso polar de 6° , lo que es necesario para tener un control preciso en pocos grados de movimiento del rotor.

Ancho de corona estator y rotor: El ancho de ambas coronas cumplirá las medidas mínimas para que con una

corriente que haga alcanzar un par deseado el motor no trabaje en saturación.

Ancho de polos rotor y estator: El ancho de polos del rotor y del estator será del mismo grosor, donde esta será la medida ideal para que durante su alineación el par no deje de aumentar.

Número de espiras: A partir de las pruebas realizadas se han definido 140 espiras por fase, la cual en el margen de trabajo del motor tiene una pendiente adecuada a la curva de potencia la cual ha de cubrir.

Entrehierro: La medida de este será de 0,4 mm el cual es un intervalo medio del exigido, al tener las fases en una sola posición corre el riesgo de que ocurra una desviación, por lo tanto el entrehierro no puede ser muy grande

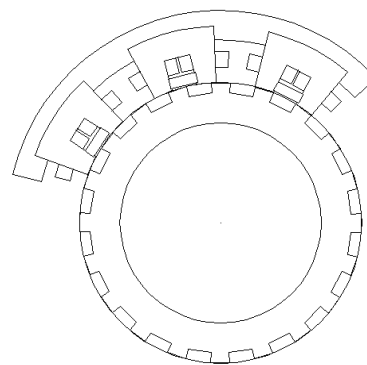


Fig. 7. Propuesta de diseño

9. Control

Se obtiene la curva Par velocidad del motor mediante el simulador, como se puede observar esta curva abarca todo el rango de trabajo del estudio mecánico.

Para el control del accionamiento se utilizará un modelo Simulink [2] el cual está diseñado para analizar motores de reluctancia autoconmutada

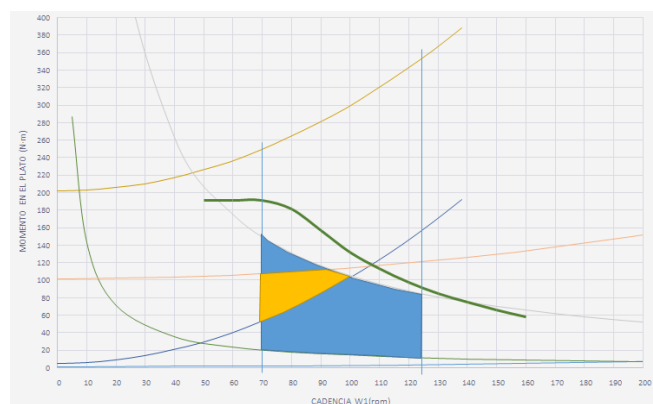


Fig. 8 Curva Par-Velocidad del motor y zonas de trabajo

Este motor junto al controlador debe ser capaz de abarcar toda el área que esta inferior a esta curva mediante diferentes técnicas de control del mismo las cuales son:

- Control de Histéresis
- Control PWM
- Ángulos de conducción

Este control será mediante:

- Hard-Chopping
- Soft-Chopping

El modo de control seleccionado será el hard-chopping, aunque este presenta mayores pérdidas, tiene una mayor precisión en cuanto al control.

9.1 Ensayos

Se realizarán unos ensayos de control con la finalidad de alcanzar un punto de la gráfica con el menor rizado posible, para ello se analizará la tendencia que tiene la variación del ángulo de conducción, la intensidad de referencia con la velocidad, y la sensibilidad de respuesta que tiene el motor respecto a un cambio de intensidad para ello los ensayos realizados han sido:

- Variación del Angulo de conducción.
- Intensidad de referencia.
- Control de Angulo de conducción con Intensidad de referencia variable.
- Control de Velocidad con Ángulos de disparo variables.
- Análisis de sensibilidad.

10. Convertidor

Se ha elegido el convertidor clásico para el uso de este motor debido a que tiene unas buenas propiedades que se adaptan mejor a la aplicación:

- La alimentación puede ser mediante corriente continua directamente o a través de un convertidor.
- Tiene una alta tolerancia a las faltas.
- Buena posibilidad de control.
- Puede permitir trabajar como motor y generador

11. Propuesta de mejora

Con todos los estudios realizados, y analizando las problemáticas que se encontrarán con el diseño anterior se realiza una propuesta de mejora con la que se propone:

- Mejorar la eficiencia del motor
- Abaratar el coste
- Mejorar el funcionamiento

Para ello se ha mejorado el accionamiento en los aspectos de:

- **Alimentación del accionamiento:** Alimentar el motor de tensión de línea para evitar la instalación de un transformador.
- **División de fases:** Duplicar la fase a una posición opuesta, repartiendo el par y evitando posibles desalineaciones del rotor
- **Disminución de entrehierro:** Con esta variación se aumenta la zona de trabajo del motor, y mejora su eficiencia

12. Simulación del sistema general

Para concluir el estudio mecánico de fuerzas y el estudio eléctrico del accionamiento que han sido analizados independientemente, se han combinado en un simulador para analizar en lazo cerrado el comportamiento que tiene uno respecto a otro. Se observa como al motor se le impone una corriente el cual puede simular un perfil de una ruta, el par humano se ha determinado para que la persona realice un par adecuado para vencer al motor con un factor proporcional, en la cadencia final se puede observar la cadencia resultante de la persona en el pedaleo.

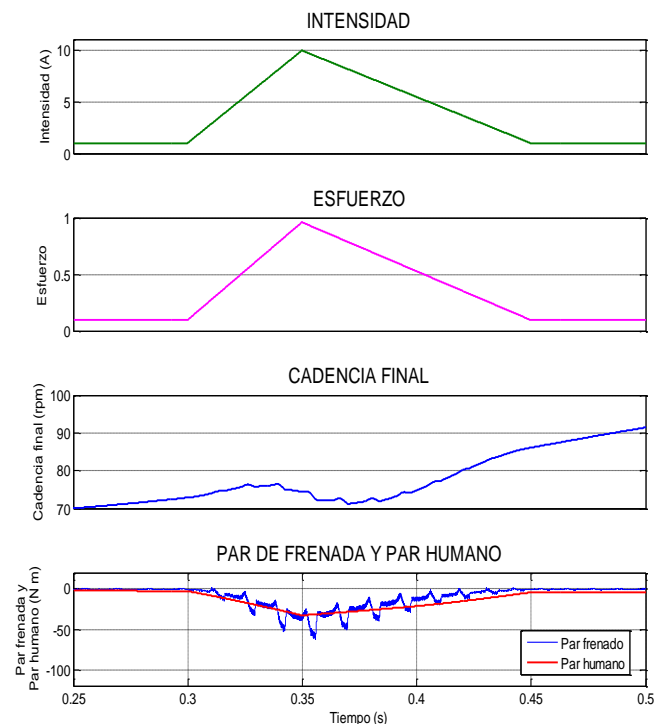


Fig. 9 Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia

Por otro lado, la gráfica inferior representa como el humano ejerce una fuerza acorde con el par impuesto en el motor. Al mismo tiempo se puede observar como el motor controlado responde con una alta exactitud a la variación de intensidad en un corto espacio de tiempo.

13. Presupuesto

COSTE DEL DESARROLLO DEL PROYECTO				
Concepto	Coste hora (€/h)	Horas (h)	Personal	Coste total (€)
Trabajos de ingeniería	50	420	4	84.000 €
Trabajos de secretaría	10	180	4	7.200 €
			Subtotal 1	91.200 €
	Amortización		10%	9.120 €
			Subtotal 2	100.320 €
	IVA		21 %	21067,2 €
			TOTAL	121.387,2 €

Tabla 2. Presupuesto

Por otro lado tenemos muy en cuenta el apoyo de la organización Agile y el grupo E-bike, que han rodeado al equipo y han hecho posible mejorar día a día en el proyecto.

Finalmente mencionar a Xabier de Wattbike que nos ayudó para poder realizar algunas pruebas físicas en las bicicletas estáticas.

16. Referencias

[1] Jiménez Díaz, J.F.; Terrados Cepeda, N.; Villa Vicente, G.; Manonelles Marqueta, P. Medicina y Fisiología del Ciclismo. Tomo I. Nexus Médica Editores, 2009.

[2] Blanque Molina, Baldui; “Simulación Interactiva de motores de reluctancia autoconmutada” Departament d’Enginyeria Elèctrica,2007

[3] P. Andrada, M. Torrent, B. Blanqué y J.I. Perat; “Accionamientos de Reluctancia Autoconmutados para Vehículos Eléctricos” Depto. de Ingeniería Eléctrica, E.P.S.E.V.G.

14. Conclusiones

Se ha diseñado y simulado un freno eléctrico de nueva tecnología que suple y mejora los frenos existentes. Lo cual confirma la viabilidad de su uso, se han especificado, contrastado y validado diferentes aspectos mecánicos, con los cuales se podrá estudiar y mejorar el sistema en función de los diferentes tipos de usuarios y materiales, se han realizado diseños de motores de diferentes estructuras, describiendo la tendencia en la generación de freno, modificando algunos aspectos de su diseño, además se recoge una serie de puntos los cuales confirman su viabilidad:

- Dimensiones del motor aptas.
- Rango de trabajo óptimo del motor se adecua al rango de velocidad que se determina en el pliego de condiciones.
- En el rango de velocidad, el motor puede trabajar al par definido en el estudio mecánico.
- Se ha encontrado un modo de control que proporciona un bajo rizado de par.
- Por la topología del motor dispone de una alta sensibilidad a la variación de par en un corto espacio de giro.

15. Agradecimientos

Nos gustaría agradecer en primer lugar el gran apoyo del Dr. Balduí Blanqué Molina, que ha sido el tutor del proyecto. Él nos ha guiado, transmitido multitud de conocimientos y dedicado gran parte de su tiempo para desarrollar el proyecto de forma adecuada, destacando sobre todo su apoyo en los momentos de mayor dificultad.