Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL: ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL USO DE UN MOTOR GENERADOR EN EL DESARROLLO DE BICICLETAS ESTÁTICAS.GILA

AUTOR: Javier Gil Lázaro

TITULACIÓ: Grado en Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Balduí Blanqué Molina

DEPARTAMENT: Enginyeria Eléctrica (709)

DATA: 08/07/2014

TÍTOL: ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DEL USO DE UN MOTOR GENERADOR EN EL DESARROLLO DE BICICLETAS ESTÁTICAS.GILA

COGNOMS: Gil Lázaro **NOM:** Javier

TITULACIÓ: Grado en Ingeniería Mecánica

PLA: Grado

DIRECTOR: Balduí Blanqué Molina

DEPARTAMENT: Enginyeria Eléctrica (709)

QUALIFICACIÓ DEL PFC

TRIBUNAL

PRESIDENT	SECRETARI	VOCAL
Sergio Sanchez Lopez	Jose Ignacio Perat Benavides	Marta Musté Rodríguez

DATA DE LECTURA: 18/07/2014

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: ☑ Sí ☐ No

TREBALL FINAL DE GRAU

RESUM (màxim 50 línies)

El mundo de las bicicletas estáticas se encuentra inmerso en un emergente periodo debido a la evolución de la tecnología de consumo. El entreno indoor tanto amateur como profesionales permite a los usuarios seguir realizando el deporte en condiciones climáticas adversas y sin correr riesgos de accidentes, por lo que cada día aumenta el uso de este sistema de entrenamiento. El entreno solo por entrenar ya no está justificado y cada vez son más los usuarios que desean ver cómo evolucionan o recibir información de cómo mejorar sus entrenos, por lo que en el futuro será necesario disponer de sistemas que registren todos los datos involucrados en el entrenamiento y que permitan satisfacer a los distintos tipos de usuarios, pudiendo motivar a otros a usar estos métodos, que siempre mejoran la forma física.

Este proyecto, tiene como objetivo el uso de un convertidor electromagnético específico para aportar mejoras en este tipo de bicicletas estáticas, debido a que se usa un freno de alta precisión controlado eléctricamente, lo cual puede usarse con diferentes objetivos en este tipo de aplicaciones.

Para ver el alcance de este proyecto, se analizan las clases de bicicletas existentes en el mercado, y de qué modo se pueden mejorar las sensaciones que ofrecen a nivel de realismo. También se estudian los usuarios existentes, el tipo de entrenamiento que realizan, y las zonas de trabajo en las que se encuentran respectivamente, para finalmente, hacer una propuesta del sistema que se quiere conseguir focalizándose en ciclistas amateurs y profesionales.

Al mismo tiempo, se ha realizado un estudio de la biomecánica del ciclismo para comprender que músculos se ven implicados en este deporte y las fuerzas que intervienen en el pedaleo, tanto las propulsivas que genera el ciclista para avanzar, como las de rozamiento generadas por las condiciones que le impiden el avance. El tipo de freno implementado debe permitir trabajar en todo tipo de regímenes y para ello se ha realizado un estudio de las ecuaciones que intervienen implementándolas posteriormente en Simulink para ver el efecto sobre el accionamiento completo.

A partir de las propuestas derivadas de los estudios de usuario y los rangos de trabajo obtenidos, se propone una serie de condiciones de trabajo, las cuales servirán para elegir el motor adecuado una vez se analice el sistema completo.

Se justifica el motor elegido y se profundiza en su funcionamiento, sus modos de control y su comportamiento mecánico adaptado a la aplicación. Para ello se realizan análisis de tendencia en la estructura del motor con el fin de encontrar la combinación de parámetros que permita alcanzar los requisitos previos.

Para dichos ensayos se utilizan diferentes programas de simulación, FEMM (Elementos Finitos) para análisis estático, y Matlab-Simulink para análisis dinámico, que permiten un análisis de los resultados para posteriores rediseños y la mejora del funcionamiento del motor.

Se hace un estudio del convertidor y se selecciona el más adecuado junto con la electrónica asociada a este para el correcto funcionamiento del accionamiento.

Se simula el comportamiento dinámico de todo el conjunto, aplicando los estudios mecánicos realizados para suministrar una carga lo más real posible y poder realizar la validación de la viabilidad. A partir de los resultados obtenidos, se determina una propuesta de mejora del accionamiento que consigue mejorar la eficiencia del mismo.

Paraules clau (màxim 10):

Entrenamiento	Bicicleta estática	Spinning	Freno eléctrico
Ciclismo indoor	SRM	Matlab/Simulink	FEMM
Accionamiento HRM	Innovación		

FINAL GRADE PROJECT

ABSTRACT (50 lines maximum)

The static bikes world is in an increasing period due to consume technology evolution. The indoor training amateur as professional allow to the users continue practicing sport in adverse climatic conditions, without risk, for this reason each day that training system is increasing. Train without a goal is not justified and each time there are more users who desire to see his evolution or receive information about his improving information. Then in the future it will be necessary provide of systems which archive the information of the training and it to satisfy the users.

The objective of this project is to use a specific electromagnetic drive to contribute improvements in this kind of bikes, due to it is using a high performance brake.
In this project has been analyzed different kinds of bikes in the market, and find how we can improve the sensations that it offer in realism level. It has been studied the different kind of users the, which training they practice, and the work areas whey they find , to finally make a proposal system it wants to get focusing in a amateurs and professional cyclist.

At the same time has been realized a biomechanics cycling study to understand the body movement, and the forces involved in cycling, the propulsive that cyclist use to move, as the friction force generated by the external conditions, that impede the movement. The brake implemented should allow to work in all kind of regime, and for that has been realized a study with the equations involved, to realize de analysis has been designed the platform system Matlab/Simulink which let to check the out response depending input variables imposed.

From the proposals derived from the users studies and the work areas obtained, it choose an appropriate motor.

Once the motor chosen it study his operation and control model with the goal to design a drive. For this has been realized trend analysis in the motor structure to find the combination parameters to let get the preview requisites. To that analysis has been used different simulation programs, FEMM (Elements finite) to static analysis, and Matlab/Simulink to dynamic analysis, which let an analysis with results for later redesign and improve the motor performance.

It select the appropriate converter, better adapted to the motor and give the best performance, also has been determined the sensors to use in the drive.

It has been realized a simulation if the dynamic behavior in whole system, applying mechanic studies to apply the load more real possible and can prove viability validation. From the results is determinate an efficiency improving proposal.

Keywords (10 maximum):

Training	Exercise bike	Spinning	Braking torque
Indoor cycling	SRM	Matlab/Simulink	FEMM
HRM Drive	Innovation		

AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer:

- a mis compañeros de grupo Mariano, Miky y Carlos por todas las horas de trabajo
- al grupo e-bike Carles, Kiko, Jennifer y Oriol por su ayuda, apoyo y humor
- al grupo del Drone Albert, Ana y Rubén
- a Balduino por todo el tiempo que nos ha dedicado.

Índice de contenido

1 Introducción 27
1.1 Justificación 27
1.2 Objetivos 28
1.3 Motivación 28
1.4 Estructura 29
1.5 Metodología de trabajo 32
1.6 Aspectos medioambientales 33
1.7 Participación 33
2 Introducción a las bicicletas estáticas 34
2.1 Elementos de la bicicleta estática 34
2.1.1 Volante de inercia 34
2.1.2 Freno 34
2.1.3 Transmisión 38
2.1.4 Display 39
2.2 Estado del arte 39
2.2.1 Primeras bicicletas estáticas 39
2.2.2 Bicicleta estática vertical 41
2.2.3 Bicicleta estática reclinada 45
2.2.4 Bicicletas estáticas con freno magnético 48
2.2.5 Ciclismo Indoor 51
2.2.6 Datos extraídos del estudio de mercado 65
3 Usuarios 68
3.1 Uso general 69
3.1.1 Trabajo que realizan 69
3.2 Profesional 70
3.2.1 Professional carretera 70
3.3 Profesional de pista 84
3.4 Amateur 86
3.4.1 Zonas de trabajo 87
3.5 Rehabilitación 89
3.5.1 Zonas de trabajo 89
4 Entrenamientos 91
4.1 Definiciones 91
4.2 Tipos de entrenamiento 91

4.2.1 Resistencia aeróbica 91
4.2.2 Resistencia anaeróbica 91
4.2.3 Resistencia anaeróbica láctica 91
4.2.4 Resistencia anaeróbica aláctica 92
4.2.5 Fuerza 92
4.2.6 Velocidad resistencia 92
4.3 Preparación de la temporada 92
4.3.1 Periodo preparatorio 92
4.3.2 Periodo competitivo 96
4.3.3 Periodo de transición 96
4.4 Observaciones 96
5 Propuesta del sistema 97
5.1 Parámetros que deberá permitir el sistema 97
5.1.1 Uso general 97
5.1.2 Amateur 98
5.1.3 Profesional de carretera 98
5.1.4 Profesional de pista 98
5.1.5 Spinning 98
5.1.6 Rehabilitación 99
5.2 Características del sistema 99
6 Pliego de condiciones 99
6.1 Propuesta de la zona de trabajo del accionamiento 99
6.2 Recomendaciones mecánicas 100
6.3 Normativa 100
6.3.1 UNE-EN 957. Sistema de bloqueo. 100
6.3.2 UNE-EN 957. Sistema de emergencia. 100
7 Introducción al estudio mecánico. 101
8 Estudio biomecánico 101
8.1 Estudio del pedaleo. 101
8.1.1 Fases del pedaleo. 101
8.1.2 Tipos de pedaleo. 102
8.1.3 Músculos utilizados en cada ciclo. 103
8.2 Variables cinemáticas existentes en el ciclismo. 104
8.2.1 Análisis cinemático de la pierna durante el pedaleo. 105
8.2.2 Análisis cinemático del conjunto de la bicicleta. 113

8.3 Variables cinéticas existentes en el ciclismo. 117
8.3.1 Fuerzas aplicadas a los pedales 117
9 Cálculo del sistema mecánico de la bicicleta convencional. 119
9.1 Objetivo del estudio mecánico. 119
9.2 Parámetros de entrada. 119
9.2.1 Fuerza 119
9.2.2 Cadencia 119
9.2.3 Juego de engranajes 119
9.3 Estudio de fuerzas ejercida por los ciclistas en el pedaleo. 120
9.3.1 Fuerzas ejercidas en el pedal. 120
9.3.2 Par obtenido en la biela. 125
9.3.3 Fuerza y par transmitidos al plato. 127
9.3.4 Fuerza y par transmitida al piñón. 128
9.3.5 Fuerzas y par transmitidos a la rueda. 131
9.4 Fuerzas opuestas al movimiento. 135
9.4.1 Fuerza de rozamiento por rodadura. 135
9.4.2 Fuerza de rozamiento del aire. 142
9.4.3 Fuerza de la pendiente. 153
9.4.4 Fuerza de rozamiento mecánico. 156
9.4.5 Sumatorio de las fuerzas y momentos de rozamiento. 157
9.5 Potencia obtenida. 160
9.5.1 Obtención de las curvas de Par – Velocidad. 160
9.6 Rangos de trabajo. 165
9.6.1 Cadencia. 165
9.6.2 Potencia. 165
9.6.3 Fuerzas de rozamiento - relación de transmisión. 166
10 Simulación del sistema mecánico. 170
10.1 Introducción 170
10.2 Esquema general del sistema. 170
10.2.1 Freno fijo 171
10.2.2 Par humano. 172
10.2.3 Sistema mecánico. 178
10.2.4 Simulación de la parte mecánica. 180
11 Introducción al estudio eléctrico 182
11.1 Elección de motor 182

11.2 Posibles elecciones 183
11.2.1 Inducción 183
11.2.2 Brushless 183
11.2.3 Motor síncrono con imanes 183
11.2.4 MHR 184
11.3 Ubicación del accionamiento 184
11.4 Control del motor 185
11.4.1 Materiales del volante 186
12 Procedimiento 186
13 Accionamiento HRM 188
13.1 Introducción a la Reluctancia magnética 188
13.2 Motor HRM 188
13.2.1 Diferencia MHR y SRM 189
13.3 Construcción 190
14 Principio de funcionamiento. 192
14.1.1 Perfil de inductancia 193
14.1.2 Característica Par-Velocidad 194
14.1.3 Saturación 195
14.2 Componentes para un accionamiento MHR 197
14.2.1 Convertidor estático de potencia 198
14.2.2 Sensores 198
14.2.3 Control del accionamiento 199
15 Diseño del motor 199
15.1 Pliego de condiciones 200
15.2 Materiales 201
15.2.1 Introducción curva histéresis 201
15.2.2 Curva de magnetización 202
15.2.3 Tipos de materiales 203
15.2.4 Rotor y estator 203
15.2.5 Soporte fases 203
15.2.6 Tipo de imán 204
15.3 Ensayos y su finalidad 204
15.3.1 Influencia de los Polos 204
15.3.2 Influencia del ancho de la corona estator y rotor 205
15.3.3 Influencia del ancho de polos del rotor y estator 206

15.3.4 Influencia de número de espiras 211
15.3.5 Influencia en la variación del entrehierro 212
15.4 Propuesta motor a analizar 213
15.4.1 Numero de Polos 214
15.4.2 Ancho de corona estator y rotor 215
15.4.3 Ancho de polos rotor y estator 216
15.4.4 Numero de espiras 216
15.4.5 Entrehierro 217
15.4.6 Características 217
15.4.7 Resultados 219
15.5 Otras aplicaciones 222
16 Control. 222
16.1 Angulo de disparo. 223
16.2 Angulo de conducción 223
16.3 Intensidad de referencia. 224
16.4 Control del accionamiento. 224
16.4.1 Control de pulso único 224
16.4.2 Control de histéresis. 225
16.4.3 Control PWM. 225
16.5 Modos de conmutación. 225
16.5.1 Soft Choping. 225
16.5.2 Hard Choping. 226
16.6 Consideraciones de diseño del controlador. 227
16.7 Control utilizado 228
16.7.1 Rizado de Par 228
16.7.2 Curva de Potencia 228
16.7.3 Ensayos 229
16.7.4 Variables de control utilizadas 238
16.7.5 Sensibilidad de respuesta 238
17 Convertidor 239
18 Sensores 242
19 Propuesta de mejora 243
19.1 Alimentación del motor 243
19.2 Modificación del entrehierro 246
19.3 División de fases 246

19.3.1 Medidas 248
19.3.2 Ensayo de división de fases 249
19.3.3 Resultados estáticos del motor 250
19.3.4 Resultados dinámicos del motor 252
19.4 Energía del sistema 255
20 Simulación del sistema general 257
20.1 Referencia de carga 258
20.2 Motor/freno 258
20.3 Control de esfuerzo 259
20.4 Simulaciones del accionamiento 259
21 Conclusiones generales 265
22 Futuras líneas de trabajo. 268
23 Presupuesto 270
24 Bibliografía 272
25 Planos 276
Annexo A. 279
Annexo B. 282
Annexo C. 290

Índice de figuras

Figura 1. Volante de inercia 34
Figura 2. Freno de tapón que crea una presión vertical 35
Figura 3. Sistema a patín 35
Figura 4. Sistema mecánico 36
Figura 5. Sistema magnético 36
Figura 6. Display de control 37
Figura 7. Transmisión 38
Figura 8. Display 39
Figura 9. Bicicleta estática antigua 40
Figura 10. Izquierda: Sistema de freno. Derecha: Regulación de la resistencia. 40
Figura 11. Bicicleta estática Tecnovita 41
Figura 12. Bicicleta estática Nordictrack 42
Figura 13. Bicicleta estática Life Fitness 43
Figura 14. Bicicleta estática Techness 44
Figura 15. Bicicleta estática Giro R 45
Figura 16. Bicicleta estática DD VCM 901R 46
Figura 17. Bicicleta estática Hipower 47
Figura 18. Bicicleta estática Visión R70 48
Figura 19. Potencia y cadencia 50
Figura 20. Par y cadencia 50
Figura 21. Bicicleta estática Schwinn Ic Pro 52
Figura 22. Bicicleta estática BH 53

Figura 23. Bicicleta estática Keiser M3 53
Figura 24. Bicicleta estática Bodytone 54
Figura 25. Bicicleta estática Spinner Pro 55
Figura 26. Transmisión bicicleta Spinning 56
Figura 27. Bicicleta estática Keiser M3 57
Figura 28. Display bicicleta estática Keiser M3 57
Figura 29. Comportamiento del freno magnético 59
Figura 30. Potencia y cadencia de la bicicleta estática 59
Figura 31. Bicicleta estática Wattbike 60
Figura 32. Display de la Wattbike 61
Figura 33. Formas de pedaleo según la experiencia 62
Figura 34. Bicicleta estática Wattbike 63
Figura 35. Análisis del freno 64
Figura 36. Gráfico del análisis 71
Figura 37. Gráfico del análisis ampliado 71
Figura 38. Resumen de la etapa 72
Figura 39. De izquierda a derecha: primero, segundo, tercer y cuarto punto seleccionado en la etapa. 72
Figura 40. De izquierda a derecha: Primer, segundo y tercer punto seleccionado. 73
Figura 41. Resumen de la etapa 74
Figura 42. De izquierda a derecha: Primer, segundo, tercer y cuarto punto seleccionado. 75
Figura 43. De izquierda a derecha: primer, segundo y tercer punto seleccionado 76
Figura 44. Resumen de la etapa 77
Figura 45. De izquierda a derecha: primer, segundo y tercer punto seleccionado 77
Figura 46. De izquierda a derecha: primer, segundo y tercer punto seleccionado 78
Figura 47. Potencia media en diferentes etapas 81

Figura 48. Media de potencia máxima 82

Figura 49. Picos máximos de potencia 82

Figura 50. Potencia media en diferentes etapas 84

Figura 51. Potencia y cadencia en una prueba de 200 metros. 85

Figura 52. Potencia con respecto al tiempo en una prueba de los 1000 metros. 86

Figura 53. Entrenamientos determinados para la bicicleta estática Wattbike 97

Figura 54. Fases existentes en el pedaleo 102

Figura 55. Principales fases del pedaleo 103

Figura 56. Músculos utilizados en el pedaleo 104

Figura 57. Estudio cinemático de la parte humano, desde un plano sagital 105

Figura 58. Rango del movimiento angular del tobillo 106

Figura 59. Posibles lesiones en la zona de la rodilla causadas por el mal posicionamiento del sillín 107

Figura 60. Medida para el posicionamiento del sillín. 107

Figura 61. Explicación para el buen posicionamiento del sillín 108

Figura 62. Estudio cinemático de la parte humano desde un plano frontal 109

Figura 63. Posiciones que adoptan los ciclistas durante el pedaleo sentado y de pie. Modificación de los valores de fuerza aplicada a los pedales (F) y distancia hasta las articulaciones del tobillo (Lα), rodilla (Lβ) y cadera (Lδ), en el pedaleo sentado (L) y de pie (L'). 110

Figura 64. Pedal simple 111

Figura 65. Rastrales metálicos y de plástico 112

Figura 66. Ejemplos de pedales automáticos 112

Figura 67. Medidas de la biela según la altura del ciclista. 113

Figura 68.Inclinación del pedal y fuerzas generadas en la biela. Derecha: Fuerzas normal (Fz), tangencial o efectiva (Fx), y resultante (Fr) aplicadas a la biela. 118

Figura 69. Impulsos positivo y negativo de fuerza efectiva a lo largo de un ciclo de pedaleo. Derecha: Diferencias en la fuerza efectiva aplicada por ciclistas profesional y amateurs para una misma potencia de pedaleo. 118

Figura 70. Fuerza máxima y mínima ejercidas en el pedal 121

Figura 71. Fuerzas ejercidas por ciclista Amateur 122

Figura 72. Comparativa fuerza total según deportista 123

Figura 73. Comparativa de la fuerza total según el rendimiento de cada pierna 124

Figura 74. Fuerzas y momentos aplicados a la biela 125

Figura 75. Par realizado en la biela 127

Figura 76. Fuerza aplicada al plato 127

Figura 77. Fuerza y par transmitidos al piñón 129

Figura 78. Par generado en el piñón según la relación de transmisión 130

Figura 79. Par generado en el piñón según la relación de transmisión 130

Figura 80. Fuerza y par transmitida a la rueda 131

Figura 81. Diagrama de fuerzas de rozamiento 135

Figura 82. Etapa El Boyar - Las Palomas (Cádiz). Anotaciones de las pendientes máximas 136

Figura 83. Medidas normalizadas de neumáticos 138

Figura 84. Explicación del porcentaje de pendiente 139

Figura 85. Comparación del efecto de la fuerza de rozamiento según tipo de ciclistas 141

Figura 86. Área frontal que exponen los ciclistas en función de su posición adoptada en la bicicleta de carretera (posiciones 1 a 3) y de contrarreloj (posición 4) 144

Figura 87. Área frontal en diferentes posiciones. La posición 3 en posición de contrarreloj, bicicleta de contrarreloj y casco, la posición 4 en posición de contrarreloj, bicicleta de contrarreloj y sin casco y la posición 5 con posición de contrarreloj 145

Figura 88. Rueda de radios, rueda de bastones y rueda lenticular con sus respectivos coeficientes de rozamiento (Cx) 146

Figura 89. 1. Cuadro y manillar aerodinámico, 2. Cuadro triangular y manillar aerodinámico y 3. Cuadro y manillar convencional con sus respectivos A•Cx 147

Figura 90. a = Posición del ciclista en un manillar convencional b = posición del ciclista en un manillar de triatlón 148

Figura 91. Coeficiente aerodinámico en función de la separación de las ruedas 150

Figura 92. Velocidad media para una misma potencia en función del número de corredores del grupo 150

Figura 93. Incremento de la fuerza de rozamiento del aire a mayor velocidad. 152

Figura 94. Etapa Torumalet (Francia). Anotaciones de las pendientes máximas 154

Figura 95. Comparación del efecto de la fuerza de la gravedad entre Amateurs y Profesionales 155

Figura 96. Elementos que generan el rozamiento mecánico 157

Figura 97. Elementos de la relación de transmisión: lugar donde se produce rozamiento mecánico 157

Figura 98. Fuerzas de rozamiento según pendiente y velocidad 158

Figura 99 . Evolución de las fuerzas de rozamiento según pendiente y velocidad 159

Figura 100. Evolución del par máximo y la cadencia según la relación de transmisión utilizada 161

Figura 101. Evolución del par máximo y velocidad con los dos platos más importantes 162

Figura 102. Evolución del par medio y la velocidad según la relación de transmisión utilizada 162

Figura 103. Evolución del par máximo a distintas cadencias 163

Figura 104. Evolución del par medio a distintas cadencias 164

Figura 105. Rango de trabajo para ciclistas amateurs 165

Figura 106. Rango de trabajo para ciclistas profesionales 166

Figura 107. Efecto de las Curvas de carga (sumatorio de los momentos de rozamiento) utilizando una relación de transmisión plato 53 dinentes y piñón 13 dientes 167

Figura 108. Efecto de las Curvas de carga (sumatorio de los momentos de rozamiento) utilizando una relación de transmisión: plato 30 dientes y piñón 29 dientes 167

Figura 109. Zona Azul: Rango de trabajo; Zona Amarilla: Zona de Trabajo Habitual (Amateurs) 168

Figura 110. Zona Azul: Rango de trabajo; Zona Amarilla: Zona de Trabajo Habitual (Profesionales) 169

Figura 111. Plano General del sistema de simulación en Matlab - Simulink 170

Figura 112. Funcionamiento del bloque: "Freno Fijo" 171

Figura 113. Entrada sinusoidal del par de rozamiento..... 172

Figura 114. Funcionamiento del bloque: "Par Humano" 172

Figura 115. Simulación para la obtención de la fuerza ejercida en los pedales 173

Figura 116. Evolución de la fuerza ejercida en los pedales, según la posición de la biela: Gráfica obtenida en Simulink. 173

Figura 117. Simulación de la variación del rendimiento de una pierna..... 174

Figura 118. Evolución de la fuerza ejercida en los pedales, según la posición de la biela y según el rendimiento: Gráfica obtenida en Simulink. 174

Figura 119. Comparativa de fuerzas según el rendimiento de cada uno: Gráfica obtenida en Simulink 175

Figura 120. Sistema para el cálculo del par humano 176

Figura 121. Par generado en la biela según los grados de esta: Gráfica obtenida en Simulink 176

Figura 122. Variación del par según el rendimiento de cada pierna: Gráfica obtenida en Simulink 177

Figura 123. Comparativa del par según el rendimiento de las piernas: Gráfica obtenida en Simulink. 177

Figura 124. Funcionamiento del bloque: "Sistema Mecánico" 178

Figura 125. Parámetros de entrada..... 179

Figura 126. Efecto de la inercia en el sistema 179

Figura 127. Cálculo del par realizado por el rozamiento viscoso..... 180

Figura 128. Simulación de la cadencia, el par humano y par de frenada (con esfuerzo constante)..... 181

Figura 129. Incorporación del motor en el volante de inercia..... 184

Figura 130. Incorporación del motor en el eje del pedal 185

Figura 131. Esquema del sistema 185

Figura 132.Procedimiento de trabajo..... 186

Figura 133.Ejemplo motor SRM..... 188

Figura 134.Diferencia de curvas de magnetización..... 189

Figura 135.Diferencia curva de Par 189
Figura 136.Muestra de Stroke 190
Figura 137. Perfil de inductancia 192
Figura 138.Secuencia de conmutación 193
Figura 139.Perfil de inductancia 194
Figura 140.Grafica Par-velocidad 194
Figura 141.Curva saturación 195
Figura 142. Produccion de par 196
Figura 143. Inductancia en saturación 197
Figura 144.Esquema del accionamiento MHR 197
Figura 145.Procedimiento de diseño 199
Figura 146. Curva Par Velocidad 201
Figura 147.Curva de saturación 202
Figura 148.Variacion del Par en función de los Polos 204
Figura 149.Ejemplo de fase saturada 206
Figura 150.Ejemplo de corona no saturada 206
Figura 151.Inductancia del Stroke 207
Figura 152.Polo desalineado I 207
Figura 153. Polo alineado I 208
Figura 154.Inductancia Polo rotor > Polo estator 208
Figura 155.Par Polo rotor > Polo estator 209
Figura 156.Polo desalineado II 209
Figura 157. Inductancia Polo estator > Polo rotor 210
Figura 158.Par Polo estator > Polo rotor 210
Figura 159.Perfil de par con diferentes espiras 211
Figura 160. Curva par velocidad en función de espiras 212

Figura 161.Curva magnetización en función de entrehierro 212
Figura 162. Esquema de medidas..... 213
Figura 163.Pedaleo 214
Figura 164.Grados de control del motor 214
Figura 165.Influencia de corona del rotor y estator 215
Figura 166.Medidas de las coronas 215
Figura 167.Anchura de polos..... 216
Figura 168. Velocidad Base del motor y pendiente de la curva 217
Figura 169. Medidas del motor 218
Figura 170.Densidad de Flujo del motor 219
Figura 171.Grafica de Par del motor 220
Figura 172.Grafica de Flujo concatenado del motor 220
Figura 173. Curva de magnetización del motor 221
Figura 174.Curva Par velocidad del motor 221
Figura 175. Muestra de ángulo de disparo..... 223
Figura 176. Muestra ángulo de conducción 224
Figura 177. Ejemplo Soft-Chopping..... 226
Figura 178. Ejemplo Hard Chopping..... 227
Figura 179. Muestra del rizado de Par 228
Figura 180.Curva Par velocidad sobre estudio mecánico 229
Figura 181.Influencia ángulos de conducción sobre curva par velocidad 230
Figura 182. Influencia Intensidad de referencia sobre la curva par velocidad 231
Figura 183. Relación Intensidad Par 231
Figura 184. Muestra Soft Chopping en el motor..... 232
Figura 185.Muestra del rizado de par influenciado por la corriente 232
Figura 186.Muestra Hard chopping en el motor..... 233

Figura 187. Influencia del hard chopping en el par 233
Figura 188.Angulo de conducción en relación intensidad de referencia 234
Figura 189. 65 rpm (-7,5 1,5) 235
Figura 190. 95 rpm (-7,5 1,5) 236
Figura 191. 95 rpm (-9 0) 236
Figura 192. 125 rpm (-9 0) 237
Figura 193. Angulo de conducción 238
Figura 194. Fase del convertidor clásico 240
Figura 195. Reposo 240
Figura 196. Conducción de fase 240
Figura 197. Circulación de la fase IN 241
Figura 198. Circulación de la fase I'N 241
Figura 199. Desmagnetizacion de la fase 241
Figura 200. Secuencia de conducción completa 242
Figura 201. Rectificador no controlado de Onda completa 244
Figura 202. Forma de onda del rectificador 244
Figura 203. Tensión resultante con rectificador 245
Figura 204. Curva magnetización en función de entrehierro II 246
Figura 205. Motor con fases divididas 247
Figura 206. Medidas del motor 248
Figura 207. Comparación Curva Par Velocidad con diferentes espiras 249
Figura 208. Comparación curva Par Velocidad añadiendo una fase 250
Figura 209. Curva de Saturación del motor 251
Figura 210.Curva Flujo concatenado Posición en función de la intensidad 251
Figura 211. Grafica Par-Posición en función de intensidad 252
Figura 212. Curva Par Velocidad motor fase dividida 252

Figura 213. 125rpm (-9 0) 253

Figura 214. 95rpm (-7,5 0) 253

Figura 215. 65rpm (-7,5 1,5) 254

Figura 216. Corriente de retorno al bus 255

Figura 217. Mejora de la señal del rectificador 256

Figura 218. Esquema del sistema general implementado en Simulink 257

Figura 219. Condiciones de entrada 258

Figura 220. Control del esfuerzo 259

Figura 221. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia 260

Figura 222. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia 261

Figura 223. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia 262

Figura 224. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia 263

Figura 225. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia 264

Figura 226. Datos iniciales del sistema 285

Figura 227. Numero de dientes del plato y del piñón 285

Figura 228. Cálculo de la relación de transmisión y el radio del plato 286

Figura 229. Velocidad de la bicicleta (rpm) 286

Figura 230. Cálculo del desarrollo y de la velocidad de la bicicleta en m/s 287

Figura 231. Datos iniciales para las fuerzas de rozamiento 287

Figura 232. Cálculo de la fuerza de la gravedad 288

Figura 233. Cálculo de la fuerza de rozamiento de rodadura 288

Figura 234. Cálculo de la fuerza de rozamiento del aire 289

Figura 235. Programación LUA 291

Índice de tablas

Tabla 1. Características bicicleta estática Tecnovita 42

Tabla 2. Características bicicleta estática Nordictrack 42

Tabla 3. Características bicicleta estática Life Fitness 43

Tabla 4. Características bicicleta estática Techness 44

Tabla 5. Características bicicleta estática Giro R 46

Tabla 6. Características bicicleta estática DD VCM 901 R 46

Tabla 7. Características bicicleta estática Hipower 47

Tabla 8. Características bicicleta estática VISION R70 48

Tabla 9. Perfil del usuario 49

Tabla 10. Potencia máxima y mínima 50

Tabla 11. Valores máximos y mínimos de par y velocidad 51

Tabla 12. Características bicicleta estática Schwinn 52

Tabla 13. Características bicicleta estática BH 53

Tabla 14. Características bicicleta estática Keiser M3 54

Tabla 15. Características bicicleta estática Bodytone 54

Tabla 16. Características bicicleta estática Spinner Pro 55

Tabla 17. Perfil del usuario de la prueba 58

Tabla 18. Potencias y velocidades (valor máximo y mínimo) 59

Tabla 19. Par mínimo y máximo 60

Tabla 20. Perfil del usuario que realiza la prueba 63

Tabla 21. Par máximo y mínimo 64

Tabla 22. Potencia máxima 64

Tabla 23. Características del volante de inercia 65
Tabla 24. Transmisiones utilizadas 66
Tabla 25. Características del piñón libre o fijo 66
Tabla 26. Par máximo que permiten las bicicletas estáticas 66
Tabla 27. Par mínimo de las bicicletas estáticas 67
Tabla 28. Potencia máxima de las bicicletas estáticas 67
Tabla 29. Potencia mínima de los frenos 67
Tabla 30. Zona de trabajo para uso general 69
Tabla 31. Datos del gráfico anterior. 71
Tabla 32. Valores extraídos de la etapa 73
Tabla 33. Valores extraídos de la etapa 74
Tabla 34. Valores extraídos de la etapa 75
Tabla 35. Valores extraídos de potencias sostenidas 76
Tabla 36. Valores extraídos del análisis 78
Tabla 37. Valores extraídos de la etapa 78
Tabla 38. Picos de potencia de Greg Henderson 78
Tabla 39. Picos de potencia de Chris Anker 79
Tabla 40. Picos de potencia Janez Brajkovic 79
Tabla 41. Picos de potencia destacados 79
Tabla 42. Picos de potencia máximos 79
Tabla 43. Valores de potencia poco habituales 80
Tabla 44. Zona de potencias poco habituales 80
Tabla 45. Potencias sostenidas de Greg Henderson 80
Tabla 46. Potencias sostenidas de Chris Anker 80
Tabla 47. Potencias sostenidas de Janez Brajkovic 80
Tabla 48. Potencias y cadencias habituales 81

Tabla 49. Picos de potencia máximos..... 83

Tabla 50. Picos de potencia máximos en intervalos de tiempo 83

Tabla 51. Zonas de trabajo poco frecuentes 83

Tabla 52. Potencias y cadencias en la zona de trabajo habitual 83

Tabla 53. Máxima potencia en las pruebas físicas 87

Tabla 54. Potencias máximas de la primera prueba 88

Tabla 55. Potencias máximas de la segunda prueba..... 88

Tabla 56. Potencias y cadencias del profesional 88

Tabla 57. Potencias y cadencias del amateur..... 89

Tabla 58. Datos extraídos en las pruebas físicas 90

Tabla 59. Valores de las pruebas físicas 90

Tabla 60. Zona de trabajo de una persona en rehabilitación..... 90

Tabla 61. Período de entrenamiento 93

Tabla 62. Cualidades físicas a entrenar 96

Tabla 63. Requisitos del motor..... 100

Tabla 64. Ángulos máximo del pedal obtenidos por diferentes autores a distintas cadencias (rpm); 106

Tabla 65. Ángulos máximos y mínimos adoptados por la rodilla..... 108

Tabla 66. Longitud biela según la altura del ciclista 114

Tabla 67. Velocidad angular de la biela y cadencia del pedaleo en 4 ciclos de pedaleo a 86.2 rpm. 115

Tabla 68. Cadencia ideal para una potencia de 200 W 116

Tabla 69. Variación de la cadencia según la potencia que se quiera conseguir 116

Tabla 70. Fuerzas normales (Fz), tangenciales o efectivas (Fx) y resultantes (Fr) aplicadas al pedal y a la biela. 117

Tabla 71. Características de los platos y dientes utilizados 120

Tabla 72. Fuerza máxima y mínima en el pedal con una sola pierna..... 121

Tabla 73. Fuerza máxima y mínima en el pedal con las dos piernas..... 122

Tabla 74. Variación de la fuerza ejercida según su rendimiento 124

Tabla 75. Comparación de la fuerza total según rendimiento y según la posición de cada una de ellas 125

Tabla 76. Par máximo, mínimo y medio según relación de transmisión utilizada 131

Tabla 77. Fuerzas generadas en la rueda 132

Tabla 78. Desarrollo obtenido según la cadencia y la relación de transmisión 133

Tabla 79. Desarrollo y velocidad según la relación de transmisión y la cadencia 134

Tabla 80. Parámetros de entrada para el cálculo de fuerzas de rozamiento 139

Tabla 81. Fuerza de rozamiento Amateur y Profesional según la pendiente 140

Tabla 82. Par de Rodadura según el tipo de ciclista y el tipo de pendiente 142

Tabla 83. Valores obtenidos del coeficiente de succión aerodinámico, A•Cx, y a del área frontal, A, según las diferentes posiciones 145

Tabla 84. Fuerza de rozamiento del aire según la velocidad 152

Tabla 85. Momento del aire según la velocidad 153

Tabla 86. Fuerza de la gravedad según pendiente (Amateurs y Profesionales) 155

Tabla 87. Valores de los momentos de la gravedad Amateurs y profesionales según la pendiente 156

Tabla 88. Momentos de rozamiento según pendiente y velocidad 159

Tabla 89 182

Tabla 90.Propiedades chapa 203

Tabla 91. Tabla de variación de parámetros 213

Tabla 92.Caracteristicas del motor 218

Tabla 93. Tabla de características del motor 248

Tabla 94. Comparación de propuesta de motores 254

Tabla 95. Resultados de las pruebas físicas en la bicicleta estática 279

Tabla 96. Resultados de las pruebas físicas en la bicicleta Keiser M3 281

Tabla 97. Resultados de las pruebas físicas en la bicicleta Wattbike 281

1 Introducción

1.1 Justificación

Actualmente la bicicleta estática está adquiriendo un gran protagonismo en cuanto al deporte realizado en los gimnasios y hogares. La evolución de la tecnología en la actualidad también se está llevando a este campo y es por este motivo que su funcionamiento evoluciona, mejorando los resultados (tanto físicos, como de mejora, o de tendencias en el entreno) que se obtienen con su uso. Al mismo tiempo, su aplicación requiere una mayor inversión en tecnología y sistemas más completos que pretenden controlar los entrenamientos de forma más precisa.

Esta evolución está incrementando el número de usuarios que utiliza este tipo de bicicletas, como profesionales del ciclismo, o aficionados a la modalidad del Spinning. Una práctica que puede encontrarse prácticamente en cualquier gimnasio. Por este motivo se cree que dar un paso más en el desarrollo de las bicicletas estáticas puede mejorar considerablemente estas para que se adapten adecuadamente a los cambios, y permitir su evolución teniendo como meta simular un ciclismo lo más real posible.

El frenado en este tipo de bicicletas suele ser muy inexacto y tiene grandes variaciones en función del mantenimiento que se le realiza y del uso que suele ser muy intenso. No se usan medidores de par ni de potencia, sino que esta medida se realiza por estimación indirecta a través de la medida de velocidad y de la cantidad inexacta de freno (mecánico o magnético) utilizado. El frenado de estos sistemas no es lineal con la cadencia, de forma que las estimaciones de potencia tampoco son reales, presentando errores fuera de la zona habitual de trabajo. Actuar de una forma minuciosa sobre el par (casi grado a grado) aportaría precisión al sistema y muchas ventajas para diferentes tipos de usuarios ya que se podría observar su evolución real.

Además, el desarrollo de nuevos motores adaptables a diferentes tipos de aplicaciones, como son los motores híbridos de reluctancia autoconmutados, ha motivado el interés de comprobar si es posible utilizar una configuración óptima, para ser usado como freno eléctrico y así tener el control del par angular realizado por los usuarios, cuando entrenan, materializando los deseos de muchos de estos, así como el de sus entrenadores en este deporte.

1.2 Objetivos

Como principal objetivo se desea determinar la viabilidad de la implementación de un nuevo sistema de freno eléctrico, en el sector de las bicicletas estáticas, que pueda aportar una gran cantidad de mejoras frente a los sistemas actuales que se encuentran en el mercado con la finalidad de innovar en el sector, justificando así el desarrollo de este tipo de accionamientos.

Para la realización de este proyecto se definen diferentes objetivos:

- Analizar el estado actual.
- Encontrar mejoras.
- Investigación.
- Cálculos mecánicos.
- Diseño eléctrico.
- Realizar simulaciones.
- Determinar viabilidad.
- Extraer conclusiones.

Aprender y practicar el trabajo en equipo incorporando la metodología Scrum que permite incorporar los conocimientos de diferentes disciplinas en el desarrollo del proyecto, dada la naturaleza multidisciplinar de este. El objetivo es proporcionar un valor añadido al producto final, debido a la visión global que explota este método de trabajo.

1.3 Motivación

Existen diferentes motivos por los cuales hemos deseado participar en el desarrollo de este proyecto.
En primer lugar el deseo de poder participar en una iniciativa nueva con personas que transmiten ilusión y motivación en hacer las cosas de forma diferente para evolucionar en la forma de trabajo en equipo en la universidad uniendo todas las disciplinas de ingeniería. Considerando que la creación de un equipo multidisciplinar puede ser el sitio para compartir y enriquecerse de conocimiento, además abrir la mente y analizar los problemas desde diferentes puntos de vista.
En segundo lugar iniciar un proyecto desde cero, donde se trabajan todos los aspectos que pueden intervenir como mecánicos, eléctricos o de diseño, como podría ocurrir en un caso real. Además de poder contar con la colaboración del Dr. Baldui Blanqué, especialista tanto en el tema de motores como de accionamientos y en el mundo del ciclismo, que consideramos puede enriquecernos con estos conocimientos.
Y finalmente añadir que siempre hemos creído que el desarrollo de este proyecto puede aportar un gran valor al sector del deporte que es de gran interés para nosotros y del que disponemos algunos conocimientos.

1.4 Estructura

Capítulo 1: Introducción

Planteamiento del proyecto y explicación de su desarrollo.

Capítulo 2: Introducción a las bicicleta estática

Se describe que es la bicicleta estática y los elementos que la componen que son relevantes para el desarrollo del proyecto. También se analiza detenidamente las bicicletas estáticas que se encuentran actualmente en el mercado identificando los usos y las características que tienen. Además en algunos casos se realizan pruebas físicas para obtener mayor información con respecto a los sistemas de freno actuales.

Capítulo 3: Usuarios

Análisis de los usuarios que utilizan las bicicletas estáticas, detallando sus objetivos, que tipos de bicis utilizan, características generales y las zonas en las que trabajan habitualmente para determinar potencias, cadencias y par que realizan.

Capítulo 4: Entrenamientos

Se analiza la forma de entrenamiento habitual de los ciclistas teniendo en cuenta cómo preparar una competición o como mejorar ciertos aspectos de la velocidad o fuerza del ciclista, que son características para mejorar el rendimiento.

Capítulo 5: Propuesta del sistema

Descripción global del sistema que motiva a desarrollar este proyecto donde se contemplan las principales funciones de cada componente y que beneficios puede reportar sobre los usuarios que utilizan las bicicletas estáticas.

Capítulo 6: Pliego de condiciones

En función del análisis realizado sobre el estado actual de las bicicletas estáticas y los usuarios se determinan algunos requerimientos y se presentan algunas consideraciones en el caso de que el motor eléctrico fuera viable y comenzara a desarrollarse.

Capítulo 7: Introducción al estudio mecánico

En este apartado se hará una pequeña introducción sobre los elementos que intervienen en el pedaleo y que están relacionados con el cuerpo humano y su actividad en el ciclismo y con los parámetros de carácter mecánico que intervienen en esta actividad.

Capítulo 8: Estudio biomecánico

En este capítulo se estudiarán los deferentes aspectos que intervienen en la mecánica del pedaleo sobre la bicicleta teniendo en cuenta el ciclo del pedaleo y los factores que intervienen en el, así como, las diferentes variables que afectan a la cinemática y a la cinética en el ciclismo.

Capítulo 9: Cálculo del sistema mecánico de la bicicleta convencional

En esta sección se realizan todos los cálculos necesarios para el entendimiento y análisis del funcionamiento mecánico de la bicicleta y como afectan las diversas variables que lo componen.

Capítulo 10: Simulación del sistema mecánico

En este apartado se hará uso de todo lo aprendido en los capítulos anteriores y se harán las diferentes simulaciones de todo el sistema mecánico con el programa Matlab/Simulink para poder ver los resultados que se obtienen.

Capítulo 11: Introducción al estudio eléctrico

En este apartado nos introduciremos en cómo se planteara el análisis del accionamiento eléctrico y desde donde partirá el proyecto. Aquí se llevara a cabo la elección del motor el cual se utilizara para el diseño del accionamiento entre varios candidatos posibles, se tendrá en cuenta las características que requiere el motor en el momento de su elección.

Capítulo 12: Procedimiento

En este capítulo una vez elegido el tipo de motor adecuado para esta aplicación se detallara el procedimiento que se seguirá para el diseño del accionamiento, y los ensayos a realizar en caso de que se requieran.

Capítulo 13: Accionamiento MHR

Se hará una introducción sobre los accionamientos MHR y su principio de funcionamiento para el entendimiento del estudio realizado y el diseño del accionamiento.

Capítulo 14: Diseño del motor

Aquí se procederá a determinar las partes constructivas del motor en base a un pliego de condiciones determinado por un estudio de mercado y un estudio mecánico mediante análisis de tendencia realizados para observar el comportamiento del motor con la variación de su estructura y así poder ajustar esta construcción a los requerimientos exigidos.

Capítulo 15: Control

En base a un simulador de motores HRM, se realizaran unos análisis de tendencia de control del motor para conseguir un modo de control que optimice el funcionamiento del motor, y conseguir un mínimo rizado de este.

Capítulo 16: Convertidor

Determinaremos la elección del convertidor del accionamiento que se ajuste a los requerimientos del motor, en función de potencia, alimentación, modo de funcionamiento.

Capítulo 17: Sensores

Este apartado se propondrán los sensores de los que el accionamiento deberá disponer, justificando la elección de estos.

Capítulo 18: Propuesta de mejora

Con los estudios realizados previamente, los conocimientos y conclusiones adquiridos, se procederá proponer un nuevo diseño en el motor, donde se puedan encontrar mejoras de eficiencia y el funcionamiento del mismo, a la vez que mejoras en el accionamiento.

Capítulo 19: Simulación del sistema general

En este apartado se mostrará la simulación de todo el conjunto formado por todos los componentes del sistema mecánico y los del motor eléctrico. Posteriormente se harán diferentes simulaciones para ver el funcionamiento dinámico.

Capítulo 20: Conclusiones generales

Explicación de las conclusiones globales sobre cada uno de los apartados de este proyecto y conclusiones generales sobre la viabilidad del motor HRM para su utilización e implementación en bicicletas estáticas.

Capítulo 21: Futuras líneas de trabajo

Detallar las posibles futuras vías de trabajo que han ido surgiendo a lo largo del proyecto.

Capítulo 22: Presupuesto

En este apartado se muestra el coste económico del proyecto.

Capítulo 23: Bibliografía

En este capítulo se enseña la bibliografía necesaria para la realización de este proyecto. Está dividida en webs, artículos y libros.

Capítulo 24: Planos

En este apartado se muestran los planos realizados del motor eléctrico.

1.5 Metodología de trabajo

Los integrantes de este grupo, acostumbrados a trabajar de forma tradicional, han aprendido otra forma de hacerlo. Una manera diferente, distinta, peculiar, atrevida, y sobretodo, contraria a cómo trabaja la gran mayoría. Utilizada en la actualidad por grandes empresas “Google, Spotify, Amazon, Toyota, etc”. Esta nueva forma de trabajar, ha permitido ver todo desde un punto de vista diferente. A veces no se ven las cosas de lejos o uno no se pregunta por qué está haciendo lo que está haciendo y a dónde quiere llegar con eso. La pregunta más sonada estos meses ha sido: “¿Por qué? “, una pregunta simple pero a la vez, una gran pregunta. Intentando responderla, se ha intentado trabajar con criterio, con discernimiento, y aprovechando el tiempo de forma más eficiente.

Esta metodología usa el método Agile, Scrum y lean thinking. Durante el transcurso de este proyecto se han ido realizando reuniones semanales con el fin de mostrar resultados y los posibles problemas que han ido surgiendo. Gracias a estas reuniones, los cuatro integrantes del grupo han podido trabajar en equipo y a la vez paralelamente con más personas para una optimización del tiempo.

Para una mejor visualización de los avances que realizaba el grupo, también se han realizado diversos “sprints”, los cuales han permitido plantearse llegar a unos objetivos concretos para una fecha determinada.

1.6 Aspectos medioambientales

En este proyecto se ha tenido en cuenta diferentes aspectos medioambientales como son los siguientes ejemplos:
En primer lugar, se ha entregado este proyecto en formato digital sin haber realizado ninguna impresión durante todo el proceso de elaboración, evitando así un gran gasto de papel y el impacto medioambiental que ello provoca.
En segundo lugar, se ha utilizado diversos software de simulación con el objetivo de validar los diseños creados en el proyecto. De este modo, mediante las simulaciones, se evita un gran gasto de energía y de material en la realización de la metodología prueba y error. Una vez validado el diseño final del motor, se podrá proceder a su fabricación para verificar si funciona correctamente. Ensayando únicamente los controladores más eficientes que se han programado previamente.
En tercer lugar, una vez fabricado el motor más óptimo, se podría generar energía de forma sostenible. Aunque puede haber varias formas de hacerlo, sería un gran triunfo llegar a aprovechar la electricidad generada mediante el pedaleo realizado por un conjunto de personas al realizar una clase de spinning.

1.7 Participación

Mi participación en este proyecto ha implicado el conocimiento de todas las disciplinas implicadas para conseguir los objetivos descritos con anterioridad, pero cabe destacar el liderazgo en el estudio mecánico, realizando los cálculos relacionados con todo el sistema de fuerzas de la bicicleta. Los conocimientos adquiridos durante la carrera sobre mecanismos y máquinas, me han permitido desenvolverme durante la realización de este proyecto con soltura y seguridad.
Las aportaciones más relevantes debidas a mi participación pueden resumirse seguidamente:

- Estudio de la biomecánica
- Desarrollo el sistema mecánico en Excel
- Análisis del sistema mecánico en Excel
- Obtención de los rangos de trabajo para el motor eléctrico
- Simulación del comportamiento dinámico del sistema mecánico
- Simulación del comportamiento dinámico del sistema mecánico y el motor eléctrico

2 Introducción a las bicicletas estáticas

La bicicleta estática es un aparato fijo que simula el ejercicio que se realiza en una bicicleta. En ella se pueden encontrar algunas ventajas frente a la bicicleta de calle como por ejemplo:

- Permiten un mejor control del entrenamiento ya que puede controlarse con mayor facilidad la velocidad y el nivel de dificultad del pedaleo.
- Permite trabajar en un recinto cubierto pudiendo evitar las inclemencias del tiempo.
- Permite trabajar a bajas velocidades permitiendo su uso para personas mayores o casos de rehabilitación.

2.1 Elementos de la bicicleta estática

Este apartado contemplara los elementos de la bicicleta estática que puedan aportar valor al desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta que el chasis, el manillar, o otros elementos estructurales no son de importancia en estos momentos.

2.1.1 Volante de inercia

Figura 1. Volante de inercia

El volante de inercia es un disco circular que se utiliza en las bicicletas estáticas para producir la resistencia al pedal. Se diferencian básicamente por su peso que suele estar entre 13 y 25kg, dependiendo del tipo de bicicleta y el uso al que esté destinado. Este peso repercute en la fuerza que debe aplicarse en el pedal para arrancar y mantener el movimiento del pedaleo. A mayor peso más dificultad para arrancar y mantener el pedaleo, por lo tanto permite la aplicación de mayor fuerza y velocidad.

2.1.2 Freno

Un factor de gran importancia es el sistema de frenos que utilizará la bicicleta estática, ya que este define la fuerza que deberá aplicar la persona en el pedal para iniciar el movimiento. A continuación se describen los diferentes sistemas de freno utilizados.

2.1.2.1 *Sistema mecánico*

Estos sistemas están compuestos por unas estructuras comúnmente denominadas zapatas, que ejercen presión sobre la superficie del volante de inercia pudiendo llevarlo a la detención completa. Esta presión se ejerce de forma vertical sobre el volante y se regula con una rosca como se puede ver en la imagen que hay a continuación. Para controlar el aumento o disminución de la fricción de la zapata la persona se orienta mediante unos números situados en la pieza que permite girar la rosca.

Figura 2. Freno de tapón que crea una presión vertical

En algunos casos debido a un volante de inercia con una masa a partir de 29 kilogramos aproximadamente, se requiere de un sistema que contenga el volante por los dos lados, para garantizar la detención y regular el esfuerzo de una forma más precisa. Este sistema se denomina como "sistema a patín" y es el mismo que se utiliza en algunas bicicletas.

Figura 3. Sistema a patín

2.1.2.1.1 *Ventajas del sistema mecánico*

- Económico
- Permite aplicar gran resistencia

2.1.2.1.2 *Inconvenientes del sistema mecánico*

- Mantenimiento del freno, ya que debe cambiarse el material de fricción por desgaste.
- Poca precisión en la frenada, teniendo en cuenta que el usuario aplica mayor o menos resistencia mediante el giro de un eje, guiándose mediante posiciones determinadas por números.

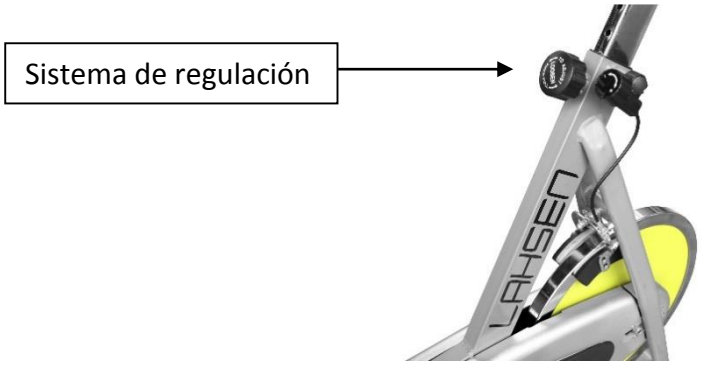


Figura 4. Sistema mecánico

- A causa del desgaste una bicicleta con el mismo número de resistencia aplicada comparada con otra no frenaran igual.
- Pedaleo irregular: puede ocurrir que la superficie de la zapata únicamente se desgaste por algunas zonas causando un pedaleo incomodo e irregular.
- Ruido: a causa de tener una fricción constante el sistema es ruidoso.

2.1.2.2 *Sistema magnético*

El sistema magnético se compone principalmente por dos imanes situados en lados opuestos del volante de inercia. Estos se encargan de crear un campo magnético en el que girará la rueda de inercia, actuando ésta como material conductor en un circuito cerrado. Cuando la rueda de inercia comienza a girar, se genera una corriente eléctrica en oposición al movimiento de la rueda de inercia, por lo que ésta reduce su velocidad de giro.

Figura 5. Sistema magnético

2.1.2.2.1 *Ventajas del sistema magnético*

- Al evitar cualquier contacto directo no hay desgaste por fricción de este modo se reduce el mantenimiento, el ruido y se obtiene un pedaleo uniforme.

2.1.2.2.2 *Inconvenientes del sistema magnético*

- Coste superior al sistema mecánico

2.1.2.3 *Magnético mediante control eléctrico*

Este sistema frena el volante de inercia como en el caso del sistema magnético sin embargo el acercamiento de los imanes funciona eléctricamente y se dirige mediante un display.

Figura 6. Display de control

2.1.2.3.1 *Ventajas*

- Mayor comodidad en la aplicación de la resistencia mediante el display.
- Conocer datos mediante el display como potencia o cadencia.
- Bajo mantenimiento.

2.1.2.3.2 *Desventajas*

- Coste superior por los componentes que requiere como el display y el sistema eléctrico que aleja y aproxima los imanes.

2.1.3 Transmisión

Figura 7. Transmisión

Es la que permite transferir la fuerza que realiza el usuario en el pedal a través del plato y mediante una correa o cadena al piñón del volante de inercia.

- Relación de transmisión

En función de la cantidad de dientes que se utilizan en el plato y en el piñón se obtiene una relación diferente disminuyendo y aumentando la fuerza o a la inversa. Por ejemplo en el caso de tener 40 dientes en el plato y 10 en el piñón, la fuerza aplicada en el pedal disminuiría 4 veces y en cambio la velocidad aumentara 4 veces.

- Transmisión por correa

Está transmisión es silenciosa pero puede sufrir desgaste si se realizan ejercicios en los que se aplica mucha fuerza o velocidad, por eso suelen ser utilizadas en bicicletas estática que se realizan ejercicios de una intensidad poco elevada.

- Transmisión por cadena

Transmisión ruidosa pero con una larga vida y sin degaste como en el caso de la correa, por eso son utilizadas en bicicletas estáticas en las que se aplica una fuerza y velocidad elevada.

- Transmisión mediante piñón fijo

En este caso el pedal queda fijado al plato de la bici y aunque deje de pedalearse el pedal sigue girando con el volante de inercia.

- Transmisión mediante piñón libre

El pedal se embraga con el plato en el momento que la persona pedalea, de este modo si no se realiza fuerza en el pedal este se detiene.

2.1.4 Display

Figura 8. Display

El display es una interficie gráfica de comunicación con el usuario, dotado de un procesador, que incorporan algunas bicicletas estáticas y permite tener un mayor control del ejercicio que se está realizando con datos como, velocidad de pedaleo, potencia o frecuencia cardiaca.

2.2 Estado del arte

En este apartado se estudiarán las bicicletas que se encuentran en el mercado para observar su comportamiento, que características tienen, cuál es su funcionamiento habitual y que inconvenientes podemos encontrar.

2.2.1 Primeras bicicletas estáticas

A continuación podemos ver una de las primeras bicicletas estáticas desarrolladas que se encontraban en el mercado antiguamente.

Figura 9. Bicicleta estática antigua

En cuanto a estructura es muy similar a una bicicleta de calle, sin embargo está se apoya por cuatro puntos y la rueda trasera queda eliminada. La transmisión se realiza mediante la rueda delantera y el piñón de su eje y los platos situados en el eje central donde se sitúan los pedales. De esta forma cuando la rueda delantera se frena mediante un sistema de fricción la persona debe realizar una fuerza mayor en el pedal.

Figura 10. Izquierda: Sistema de freno. Derecha: Regulación de la resistencia.

El elemento que provoca la fricción es una rueda situada sobre la rueda delantera como puede verse en la figura 10. Para conseguir aplicar una mayor resistencia al usuario se regula la maneta que se observa en la figura 11 así la rueda ejercerá una mayor presión sobre la rueda.

A medida que han ido evolucionando las bicicletas, los usos de las bicicletas y la tecnología se han ido desarrollando nuevos modelos para diferentes usos, teniendo en cuenta otros materiales, elementos mecánicos y la inclusión de sistemas eléctricos.

2.2.2 Bicicleta estática vertical

Las bicicletas estáticas verticales surgen del primer modelo mostrado anteriormente. En este tipo de bicicleta se realizan ejercicios de bajo impacto con el fin de perder peso, realizar ejercicios de rehabilitación o ejercicios cardiovasculares. La posición de la persona es sentada y trabaja el tren inferior. Estas son diseñadas para su uso en el hogar o en gimnasios. Además el control del ejercicio que se realiza es muy preciso gracias a un display que proporciona información y el freno electromagnético que utilizan. A continuación se analizan un seguido de bicicletas encontradas en el mercado para detallar los aspectos más significativos de cara al desarrollo del proyecto de la bicicleta estática vertical, ya que los detalles de chasis o elementos añadidos no son relevantes en estos momentos.

2.2.2.1 *Bicicletas del mercado*

- Tecnovita By BH YF91 Back Fit

Es un modelo de bicicleta estática vertical diseñado para el hogar ya que permite ser plegada para ocupar un espacio reducido. Además es una bicicleta de 159 euros un coste bajo.

Figura 11. Bicicleta estática Tecnovita

Tecnovita	
Display	Proporciona información de velocidad, distancia recorrida, tiempo transcurrido, calorías y permite regular la resistencia del freno.
Transmisión	Piñón libre.
Peso del volante de inercia	8 kg.
Material del volante de inercia	Acero inoxidable
Freno	Magnético

Tabla 1. Características bicicleta estática Tecnovita

- GX 3.1 Nordictrack

Bicicleta diseñada para realizar ejercicios cardiovasculares de bajo impacto, controlando en todo momento al usuario que padezca problemas del corazón.

Figura 12. Bicicleta estática Nordictrack

Nordictrack	
Display	Proporciona información de la velocidad, distancia, tiempo, calorías, frecuencia cardiaca, posibilidad de escoger programas de entrenamiento o regular la intensidad del freno.
Transmisión	Piñón libre.
Peso del volante de inercia	10 kg.
Material del volante de inercia	Acero inoxidable
Peso máximo del usuario	130 kg.
Freno	Magnético

Tabla 2. Características bicicleta estática Nordictrack

- Life Fitness C1 Go

Bicicleta diseñada para su uso en el hogar de manera silenciosa, permitiendo leer, escuchar música o ver la tele, ya que incluye transmisión mediante correa, más silenciosa que la cadena.

Figura 13. Bicicleta estática Life Fitness

Life Fitness	
Display	Permite la realización de diferentes programas, entrenamientos clásicos, avanzados, basados en objetivos o controlando la frecuencia cardiaca. Además señala el nivel, tiempo, velocidad, distancia, ritmo cardiaco y calorías. Pudiendo siempre seleccionar la intensidad deseada.
Transmisión	Piñón libre.
Peso del volante de inercia	10 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio
Peso máximo del usuario	135 kg.
Freno	Magnético

Tabla 3. Características bicicleta estática Life Fitness

- Techness SB 800 MP3

Bicicleta estática con un diseño robusto que permite realizar entrenamientos intensos a causa de la incorporación de un volante de inercia de 14 kg.

Figura 14. Bicicleta estática Techness

Techness SB	
Display	Posibilidad de escoger diferentes programas de entrenamiento, tiempo transcurrido, velocidad de pedaleo, distancia recorrida, calorías, potencia en vatios, pulsaciones cardiacas, tiempo de recuperación, temperatura y calendario.
Transmisión	Piñón libre.
Peso del volante de inercia	14 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio
Peso máximo del usuario	150 kg.
Freno	Magnético

Tabla 4. Características bicicleta estática Techness

2.2.2.2 *Observaciones*

Se puede ver cómo la tendencia desde la bicicleta más sencilla a la más compleja va aumentando las características de cada una proporcionando un mayor control de los entrenamientos que se realizan sobre todo para bajar de peso teniendo en cuenta las opciones que proporciona el display. También se tiene en consideración que la transmisión funcione con piñón libre para que al parar de pedalear el pedal pare y no siga girando a causa de la inercia del volante, por este motivo es utilizado para tratamientos de rehabilitación teniendo en cuenta que no provocara un tirón en la pierna como en otros bicicletas con piñón fijo. También se tiene en cuenta el destino final de la bicicleta. Como se ha podido ver algunas son plegables y otras utilizan transmisión mediante correa ya que son más silenciosas que las transmisiones por cadena, considerando que puedan utilizarse viendo la tele o leyendo. Los pesos del volante de inercia se sitúan entre 8 y 14 kg. No son pesos muy elevados ya que no están destinadas a realizar un ejercicio de gran intensidad.

2.2.3 Bicicleta estática reclinada

Como en el caso de la bicicleta estática vertical estas también son utilizadas para la pérdida de peso o para la realización de ejercicios cardiovasculares, sin embargo no son aconsejables para algunos tratamientos de rehabilitación ya que perjudican la zona de la cadera debido a que la posición en la bicicleta. El asiento en este caso permite apoyar la espalda, evitando que esta sea trabajada y que los brazos, las muñecas y los hombros carguen peso del cuerpo. De esta forma permite realizar un ejercicio de tren inferior con bajo impacto para las rodillas a personas con problemas de espalda.

La resistencia que incorporan estas bicicletas estáticas es magnética, permiten la regulación de la resistencia mediante la consola, que también muestra la velocidad, el tiempo que se lleva pedaleando, la distancia y las calorías quemadas.
Las personas que suelen utilizar este tipo de bicicletas son usuarios que desean realizar un ejercicio cardiovascular, usuarios en proceso de rehabilitación o usuarios que desean bajar de peso.

A continuación se analizan un seguido de bicicletas encontradas en el mercado para detallar los aspectos más significativos de cara al desarrollo del proyecto de la bicicleta estática vertical, ya que los detalles de chasis o elementos añadidos no son relevantes en estos momentos.

- Giro R Kettler

Bicicleta diseñada para un uso doméstico, con transmisión mediante correa para disminuir el ruido al pedalear.

Figura 15. Bicicleta estática Giro R

Giro R	
Display	Proporciona velocidad, distancia, tiempo, calorías, frecuencia cardiaca y posibilidad de escoger diferentes programas de entrenamiento.
Transmisión	Piñón libre.
Peso del volante de inercia	8 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio
Peso máximo del usuario	130 kg.
Freno	Magnético

Tabla 5. Características bicicleta estática Giro R

- DD VCM 901R

Bicicleta estática reclinable de uso doméstico que permite ser plegada para ocupar menos espacio.

Figura 16. Bicicleta estática DD VCM 901R

DD VCM 901 R	
Display	Proporciona velocidad, distancia, tiempo, calorías, frecuencia cardiaca, ritmo del pedaleo y ajuste de la resistencia.
Transmisión	Piñón libre.
Peso del volante de inercia	8 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio
Peso máximo del usuario	119 kg.
Freno	Magnético

Tabla 6. Características bicicleta estática DD VCM 901 R

- HIPOWER - SK9900

Bicicleta estática reclinable destinada a su uso en gimnasios.

Figura 17. Bicicleta estática Hipower

Hipower	
Display	Marca duración, distancia, velocidad, rpm, vatios, calorías, pulsaciones y permite aplicar programas automáticos de velocidad e inclinación con varios niveles.
Transmisión	Piñón libre
Peso del volante de inercia	16 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio
Peso máximo del usuario	190 kg.
Freno	Magnético

Tabla 7. Características bicicleta estática Hipower

- VISION - R70

Bicicleta reclinable con un chasis robusto para realizar entrenamiento de gran intensidad.

Figura 18. Bicicleta estática Visión R70

VISION R70	
Display	Marca duración, distancia, velocidad, rpm, vatios, calorías, pulsaciones y permite aplicar programas automáticos de velocidad e inclinación con varios niveles.
Transmisión	Piñón libre
Peso del volante de inercia	12 kg.
Material del volante de inercia	Acero inoxidable
Peso máximo del usuario	190 kg.
Freno	Magnético

Tabla 8. Características bicicleta estática VISION R70

2.2.3.1 *Observaciones*

Al igual que en las bicicletas verticales hay una tendencia a controlar el entrenamiento que se realiza además de las pulsaciones cardiacas, ya que son bicicletas utilizadas frecuentemente por personas mayores. En algunos casos se puede ver que se utilizan frenos magnéticos, estos sistemas son capaces de hacer funcionar el display mediante el pedaleo que realiza el usuario. El peso del volante de inercia se encuentra entre 8 y 16 kg similar a la bicicleta vertical. También en algunos tienen en cuenta que la bicicleta sea silenciosa y utilizan transmisión mediante correa.

2.2.4 Bicicletas estáticas con freno magnético

Como se ha podido observar en el estudio de mercado de la bicicleta estática vertical y reclinada, todas ellas utilizan frenos electromagnéticos, por este motivo se considera interesante profundizar en el análisis de este tipo de freno para poder determinar algunas características interesantes para el diseño del motor como:

- Comportamiento del freno en relación a la variación de intensidad del ejercicio realizado.
- Potencias, cadencias y par que permite realizar.
- Alimentación.

2.2.4.1 *Datos de fábrica*

Mediante la empresa Technogim se han podido conseguir las fichas técnicas de dos bicicletas estáticas, una vertical y una reclinada que han proporcionado información sobre alimentación y consumo eléctrico del display.

- Alimentación

De 100 a 230 V a 50/60 Hz o algunas inalámbricas, ya que con el propio pedaleo se genera la energía necesaria para el funcionamiento del sistema.

- Consumo eléctrico del display

50 VA en el caso de las que son alimentas.

2.2.4.2 *Pruebas físicas*

También se ha conseguido realizar unas pruebas físicamente en la bicicleta, en la que se utilizaban diferentes niveles de resistencia ya fijados y se aumentaba la cadencia para determinar potencias, cadencias y par que proporciona la bicicleta. Además de comprobar cómo es el comportamiento de freno, si aumenta su intensidad al pedalear más rápido.

Todas las gráficas que se presentarán surgen de las tablas del anexo [A1].

- Perfil del usuario que realiza la prueba

Perfil	
Sexo	Hombre
Edad	26
Peso	84 kg.
Experiencia	Poca experiencia en el ciclismo, sin embargo 7 años practicando fitness. Por lo tanto se puede considerar que tiene una gran fuerza en las piernas.

Tabla 9. Perfil del usuario

- Potencias

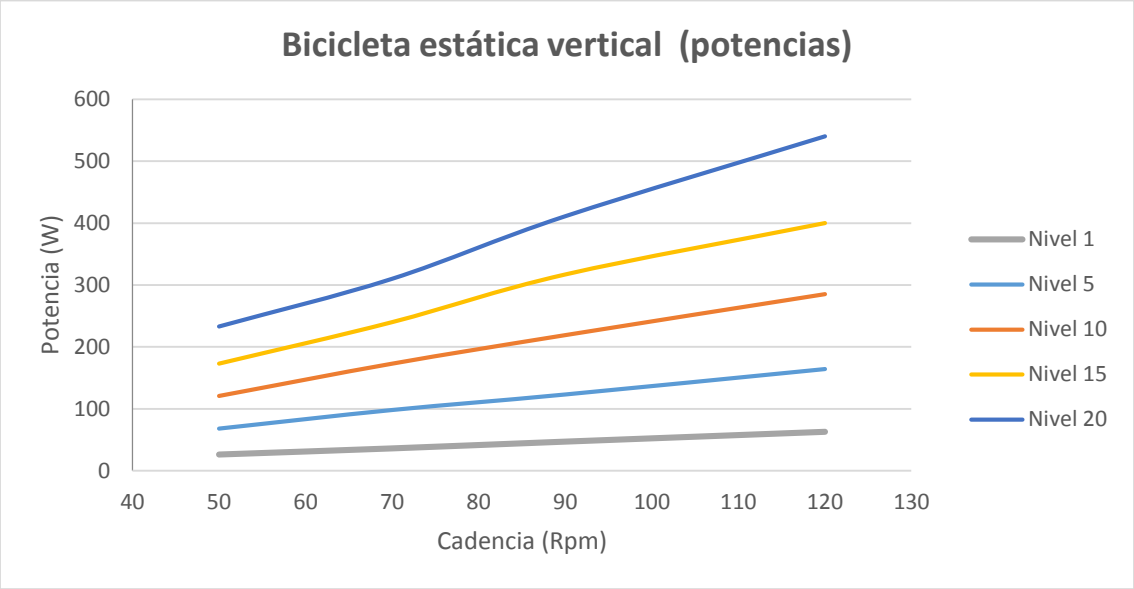


Figura 19. Potencia y cadencia

Potencias	
Potencia mínima	26 W
Velocidad mínima	50 rpm
Potencia máxima	540 W
Velocidad máxima	120 rpm

Tabla 10. Potencia máxima y mínima

- Par y velocidad

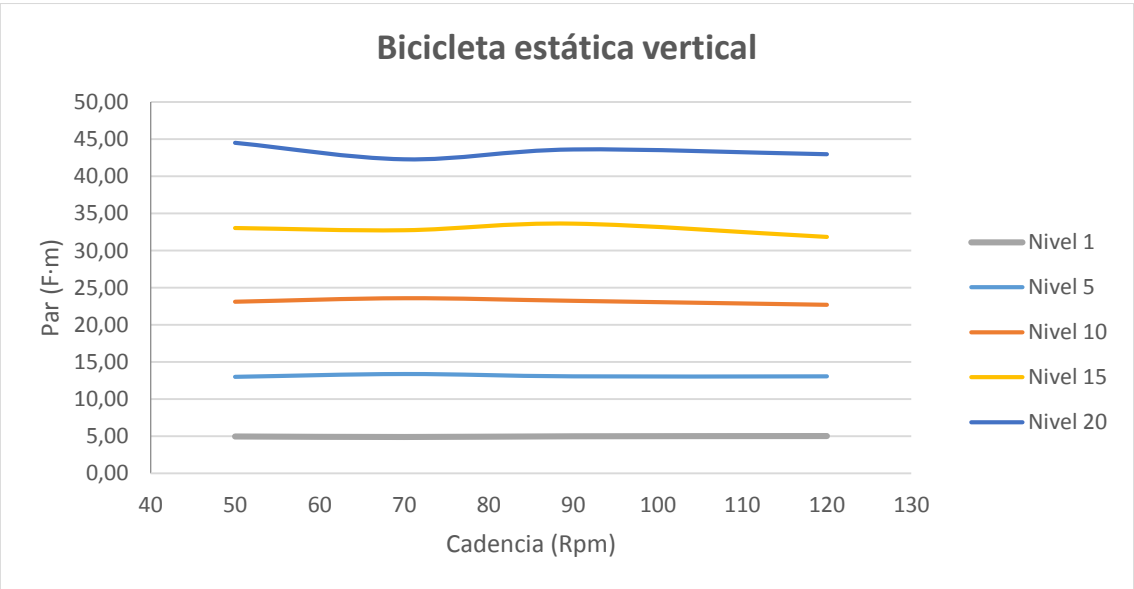


Figura 20. Par y cadencia

Par y velocidad	
Par mínimo	5 N·m
Velocidad mínima	50 rpm
Par máximo	60 N·m
Velocidad máxima	120 rpm

Tabla 11. Valores máximos y mínimos de par y velocidad.

Par máximo no se encuentra en el gráfico ya que se obtuvo en el nivel máximo donde únicamente pudo realizarse a una cadencia de 50 rpm. Este se encuentra en el anexo [A1].

- Observaciones

A medida que se aumenta la velocidad de pedaleo no aumenta el par progresivamente como en un caso real. Además no se mantiene de forma constante.

2.2.5 Ciclismo Indoor

Dentro del Ciclismo Indoor se puede determinar dos formas diferentes de utilizar este tipo de bicicletas estáticas, de forma individual o colectiva mediante la práctica del Spinning.

2.2.5.1 *Spinning*

El spinning es una actividad física colectica realizada sobre una bicicleta estática al ritmo de la música, donde se realiza un trabajo básicamente cardiovascular de alta intensidad con la intervención de los grupos musculares del tren inferior. La clase es dirigida por un instructor que es el responsable de conducir la sesión hacia los objetivos que ha establecido previamente.
En comparación con las bicicletas estática vertical y reclinada, el tipo de bicicleta utilizada en el estatica se asemeja mucho más a una bicicleta de calle, ya que el diseño estructural posiciona al usuario de la misma forma, permitiendo también realizar el ejercicio de pie simulando una subida. Por este motivo es utilizada por una gran cantidad de gente que practica ciclismo, además de un gran número de personas que desean bajar de peso ya que es un ejercicio intenso, con una duración de la sesión aproximadamente de 50 minutos. Estos 50 minutos son repartidos en de la siguiente forma:

- Calentamiento: Tiene una duración mínima entre 5 y 10 minutos. Su función es subir el ritmo cardíaco, a la vez que se estiran y se preparan los músculos que se verán sometidos a la tonificación.
- Parte principal: Es el intervalo intermedio, comprendido entre 30 y 40 minutos. El ejercicio que se realiza en este intervalo depende del profesor, ya que algunos trabajan de forma cardiovascular y otros incluyen en mayor medida ejercicios de fuerza.

- Vuelta a la calma: La duración de este intervalo dependerá de la intensidad a la cual se haya realizado la sesión. Aproximadamente entre 5 y 10 minutos.

Durante la realización de la sesión se simulan diferentes situaciones que se encuentra un ciclista en la carretera como las siguientes:

- Terreno plano sentado
- Escalada sentado
- Terreno plano de pie (para simular el sprint)
- Escalada de pie

2.2.5.2 *Bicicleta de spinning*

En este apartado analizaremos algunos detalles relevantes para el proyecto de las bicicletas que se encuentran en el mercado.

- SCHWINN IC PRO

Bicicleta de Ciclismo Indoor destinada para su uso en gimnasios o en el hogar.

Figura 21. Bicicleta estática Schwinn Ic Pro

Schwinn Ic Pro	
Display	Sin display
Transmisión	Mediante cadena con piñón fijo
Peso del volante de inercia	19 kg.
Material del volante de inercia	Acero inoxidable
Peso máximo del usuario	120 kg.
Freno	Mecánico

Tabla 12. Características bicicleta estática Schwinn

- BH SB3 Magnetic

Bicicleta de Ciclismo Indoor destinada para su uso en gimnasios o en el hogar.

Figura 22. Bicicleta estática BH

BH SB3 Magnetic	
Display	Posibilidad de adaptar una consola que proporciona información de la velocidad, rpm, tiempo en la bicicleta, calorías, distancia y pulso.
Transmisión	Mediante correa con piñón fijo.
Peso del volante de inercia	18 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio
Peso máximo del usuario	150 kg.
Freno	Magnético

Tabla 13. Características bicicleta estática BH

- Keiser M3

Bicicleta de Ciclismo Indoor destinada para su uso en gimnasios o en el hogar.

Figura 23. Bicicleta estática Keiser M3

Keiser M3	
Display	Consola incorporada que proporciona información de rpm, calorías gastadas, frecuencia cardiaca, tiempo de pedaleo y la distancia recorrida, además controla la evolución.
Transmisión	Mediante correa con piñón fijo.
Peso del volante de inercia	18 kg.
Material del volante de inercia	Aluminio 6061 T6
Peso máximo del usuario	150 kg.
Freno	Magnético

Tabla 14. Características bicicleta estática Keiser M3

- Bodytone Eolox Ciclo Indoor

Bicicleta de Ciclismo Indoor destinada para su uso en gimnasios o en el hogar.

Figura 24. Bicicleta estática Bodytone

Bodytone	
Display	Sin display
Transmisión	Cadena con piñón fijo.
Peso del volante de inercia	20 kg.
Material del volante de inercia	PVC
Peso máximo del usuario	150 kg.
Freno	Mecánico de doble zapata

Tabla 15. Características bicicleta estática Bodytone

2.2.5.2.1 *Observaciones del estudio de mercado*

A diferencia de las bicicletas analizadas anteriormente no se suele encontrar un display, de este modo no se obtiene gran información del entrenamiento que se realiza, impidiendo un seguimiento exhaustivo del mismo. Los frenos utilizados son mecánicos y magnéticos con volantes de inercia entre 18 y 20 kg, un peso mayor al de las bicicletas verticales y declinadas, permitiendo entrenamientos de mayor intensidad. Con respecto a los materiales que utilizan los volantes de inercia se encuentra PVC, aluminio y acero inoxidable. Estos materiales son utilizados teniendo en cuenta que caerá una gran cantidad de sudor sobre él y debe evitarse la oxidación. También se puede detectar el uso de piñón fijo, de este modo el usuario no deja de pedalear en ningún momento, evitando que disminuyan sus pulsaciones, un factor importante en el desarrollo del ejercicio. En cuanto a la transmisión podemos encontrar correa o cadena.

2.2.5.2.2 *Pruebas*

Con el fin de profundizar en las características que representan el Spinning se han realizado las siguientes pruebas.

2.2.5.2.2.1 *Clase de spinning*

Realización de una clase de spinning en el centro Parc Esportiu Llobregat, donde se pudieron probar las bicicletas y mantener un dialogo con el profesor. La bicicleta utilizada en la sesión fue la siguiente.

- Bicicleta utilizada

Figura 25. Bicicleta estática Spinner Pro

Spinner Pro	
Display	Sin display
Transmisión	Cadena con piñón fijo.
Peso del volante de inercia	19,5 kg.
Freno	Mecánico

Tabla 16. Características bicicleta estática Spinner Pro

A continuación se describen las impresiones encontradas.

- Control del esfuerzo

La aplicación de la resistencia funciona mediante una maneta con dos flechas pintadas en su superficie que indican más o menos resistencia, de este modo el profesor anuncia media vuelta más, media vuelta menos o la cantidad de vueltas que el considere necesarias para el momento de la sesión que se esté realizando. Cuando la fatiga comienza a aflorar es complicado recordar cuantas vueltas de resistencia se llevan, además de ser muy complicado comparar la resistencia que has aplicado en una sesión con respecto a otra. De este modo no puede mantenerse un estudio de la progresión de los entrenamientos en el caso que se realicen asiduamente. También debe destacarse comentarios de los monitores con respecto a los frenos magnéticos y mecánicos que dicen pueden haber diferencias entre las diferentes bicicletas en la intensidad de frenada aplicando el mismo nivel de resistencia.

- Inexperiencia

A pesar de la inexperiencia en esta práctica y el monitor conocer el escaso conocimiento en la práctica del spinning, la realización de la sesión fue exactamente igual a la de los otros usuarios que se encontraban en la misma sesión. Esto provoco no seguir las indicaciones del monitor en el momento que se llega a una gran fatiga.

- Display

La bici no disponía de ninguna información como cadencia, potencia o frecuencia cardíaca que permitiera hacer un entrenamiento controlado.

- Transmisión

Figura 26. Transmisión bicicleta Spinning

La transmisión se realizaba mediante cadena y era bastante ruidosa. Por otro lado se encuentra que los pedales funcionan con piñón fijo, esto provoca algunos tirones en la pierna cuando se lleva una cadencia muy elevada y se quiere disminuir esta cadencia, ya que los pedales siguen girando solidarios con la inercia que lleva el volante de inercia.

2.2.5.2.2.2 *Keiser M3*

Figura 27. Bicicleta estática Keiser M3

Esta bicicleta es utilizada en algunos gimnasios que se han conocido durante el transcurso de la investigación para la práctica del Spinning, por esto se consideró de interés realizar pruebas físicas con ella con el fin de extraer datos relevantes para el proyecto además de poder experimentar sensaciones. Primero de todo se describirán alguno de los elementos más interesantes para comprender el funcionamiento del sistema.

- Display

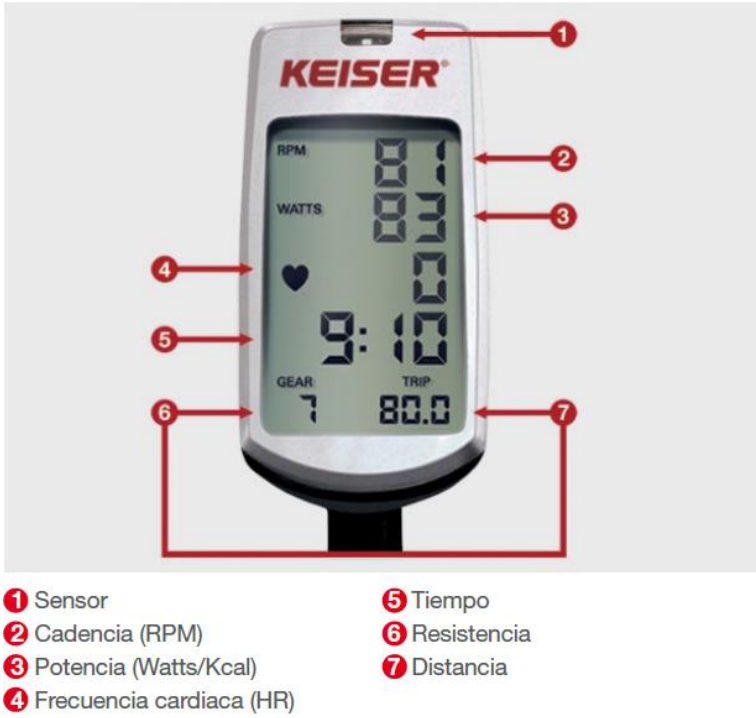


Figura 28. Display bicicleta estática Keiser M3

El pequeño ordenador que lleva la bicicleta proporciona una gran cantidad de información como se ve en la imagen anterior que permite orientar al usuario durante el entrenamiento, y poder realizar un seguimiento con los diferentes entrenamientos, ya que al parar de pedalear proporciona la potencia media obtenida de todo el entrenamiento realizado.

- Freno

La bicicleta incorpora un freno magnético en el volante de inercia trasero, este producía unas buenas sensaciones en el momento de pedalear además de ser más silencioso que el freno mecánico.

- Transmisión

La transmisión que utiliza la bicicleta es 1 a 9, mientras que el pedal da una vuelta el volante de inercia realiza 9. Esto quiere decir que el volante de inercia va a una velocidad 9 veces superior que el pedal pero que se aplica una fuerza 9 veces inferior, de este modo no es necesario que el freno magnético sea tan potente ahorrando costes de material.
También se comprobó que el pedal funcionaba mediante piñón fijo, esto provocaba que en cadencias superiores a 110 rpm al parar de pedalear la inercia del volante hiciera que el pedal continuara girando y provocara tirones en la pierna, que pueden provocar lesiones.

2.2.5.2.2.3 *Pruebas físicas*

También se realizaron pruebas con la bicicleta estática con el fin de obtener datos relevantes para el proyecto. Estas pruebas consistían en utilizar diferentes niveles de resistencia y aumentar la cadencia en cada una de ellas, así observar el comportamiento y la cantidad de resistencia que ofrece el freno, además de la potencia máxima que se puede obtener.

Todas las gráficas que se presentarán surgen de las tablas del anexo [A2].

- Perfil del usuario que realiza la prueba

Perfil	
Sexo	Hombre
Edad	26
Peso	84
Experiencia	Poca experiencia en el ciclismo, sin embargo 7 años practicando fitness. Por lo tanto se puede considerar que tiene una gran fuerza en las piernas.

Tabla 17. Perfil del usuario de la prueba

- Comportamiento del freno

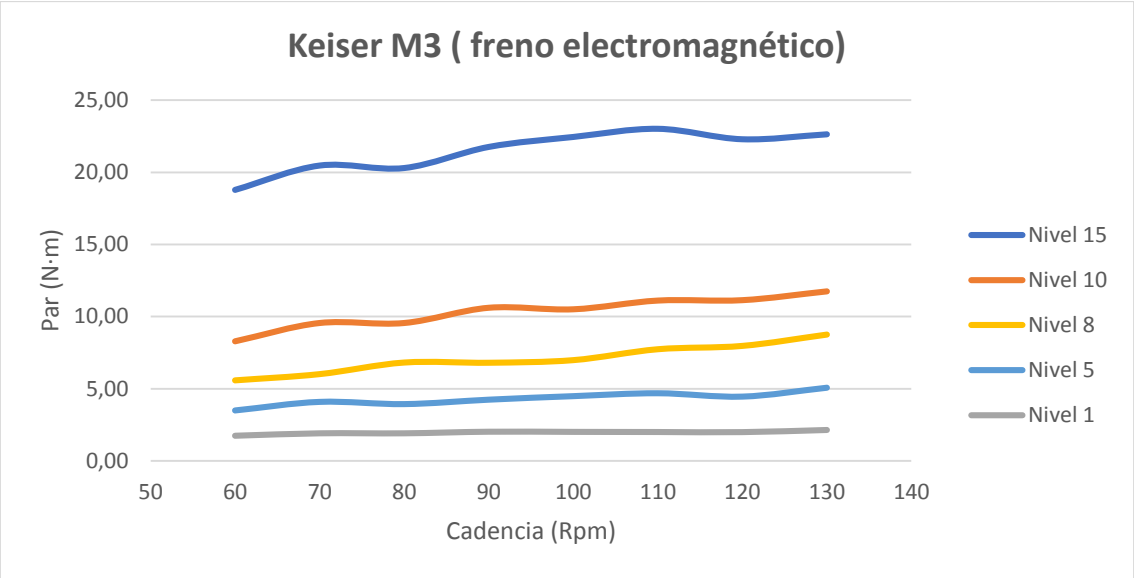


Figura 29. Comportamiento del freno magnético

Puede observarse como la resistencia del freno magnético aumenta a medida que se consigue una cadencia de pedaleo más elevado pero de forma irregular.

- Potencias

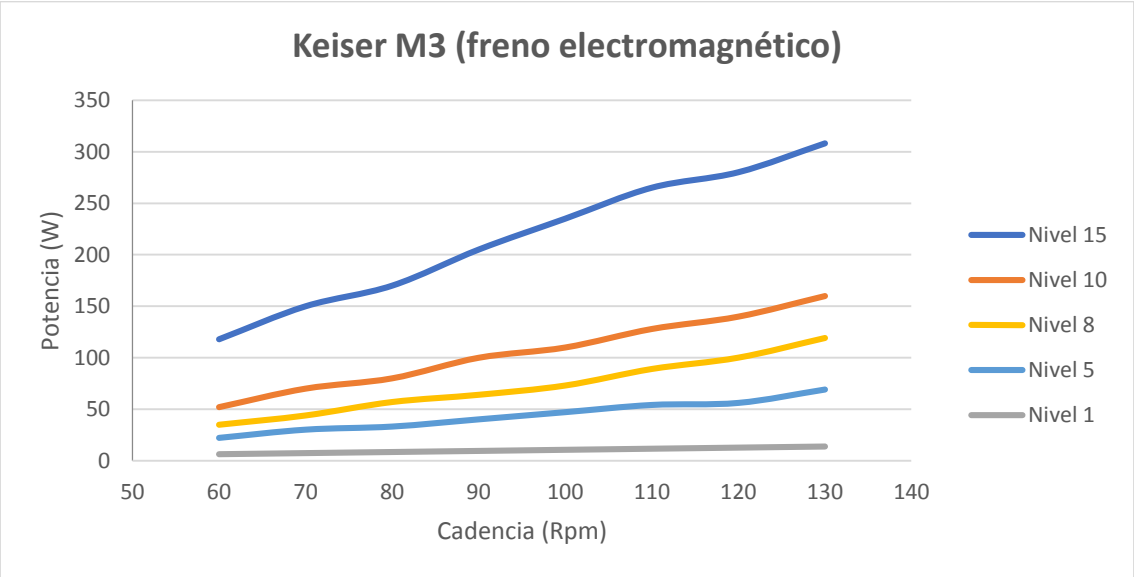


Figura 30. Potencia y cadencia de la bicicleta estática

Potencias	
Potencia mínima	11 W
Velocidad mínima	60 rpm
Potencia máxima	308 W
Velocidad máxima	130 rpm

Tabla 18. Potencias y velocidades (valor máximo y mínimo)

- Par

Nivel	Rpm	P (W)	rad/s	F·m	
1	60	11	6,28	1,75	Par mínimo
24	40	252	4,19	60,16	Par máximo

Tabla 19. Par mínimo y máximo

- Observaciones:

  - Hasta no pedalear a una cadencia de 60 rpm no se realiza un pedaleo adecuado.
  - A partir del nivel 17 es complicado mantener la cadencia a causa de la gran resistencia que ofrece el freno.
  - En el nivel 20 es complicado vencer la resistencia del freno.
  - En el nivel 24 es muy difícil vencer la resistencia del freno.
  - La potencia máxima no se obtiene en el nivel máximo, ya que no permite una velocidad muy elevada.
  - El par máximo que ha ofrecido el freno magnético en el pedal es de 60 N·m.

2.2.5.3 *Bicicletas de ciclismo indoor*

En este caso vamos a estudiar bicicletas de ciclismo indoor que generalmente son utilizadas individualmente, probablemente porque tienen un coste superior a las que se encuentran en las clases de spinning. Estas normalmente proporcionan una mayor información para que el propio usuario pueda controlar sus entrenamientos, esta información es de gran valor para el proyecto y por este motivo se han analizado y probado físicamente.

2.2.5.3.1 *Wattbike*

Figura 31. Bicicleta estática Wattbike

Este tipo de bicicleta está diseñada para ser utilizada por ciclistas profesionales ya que proporciona una gran información de los entrenamientos, sin embargo también puede ser utilizada por cualquier otra persona.
Teniendo en cuenta que esta bicicleta se diferenciaba de las habituales del mercado y que es utilizada por ciclistas profesionales se decidió contactar con la empresa que permitió el acceso a un gimnasio donde se pudo probar.

- Display

Este proporciona información de la cadencia, potencia, velocidad, fuerza y un gráfico polar que muestra la fuerza que se realiza con cada pierna, pudiendo observar si el pedaleo es adecuada o si se realiza más fuerza con una pierna que otra.

Figura 32. Display de la Wattbike

En la imagen anterior se puede visualizar el display con los datos comentados, en la zona inferior izquierda se encuentra el gráfico polar divido por un eje vertical que diferencia la pierna izquierda de la derecha. Este gráfico muestra la fuerza que se aplica en cada pierna en cada revolución, teniendo en cuenta los 180 grados de giro que realiza cada pierna. La cantidad de fuerza puede describirse dependiendo de lo alejados que estén los puntos que realizan la circunferencia del eje central vertical, de este modo se puede ver que a los 90 grados se encuentran la mayor fuerza que aplica el ciclista. A continuación se presenta otra imagen donde se representa como es el pedaleo dependiendo de la experiencia del ciclista.

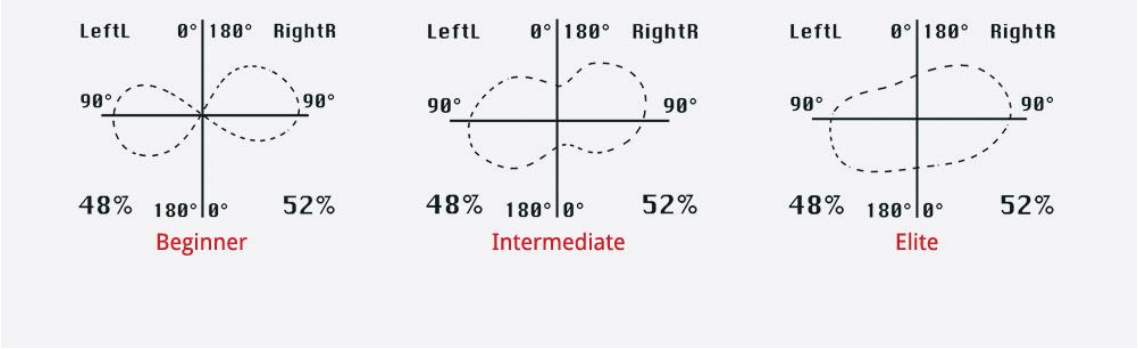


Figura 33. Formas de pedaleo según la experiencia

La imagen anterior muestra como con una mayor experiencia se pasa de una forma de ocho a una forma en la que las partes centrales del ocho se amplían. Esta forma de pedaleo se denomina pedaleo redondo y es más eficiente, ya que el ciclista consigue un mayor rendimiento y tarda más tiempo en agotarse. Este tipo de pedaleo será analizado en el transcurso del proyecto. Finalmente toda esta información puede ser almacenada en la memoria de la bicicleta para realizar un seguimiento de los entrenos y poder marcarse objetivos.

- Software

La compañía ofrece un software gratuito que se instala en el ordenador y este puede ser conectado a la bicicleta, de este modo se pueden almacenar todos los datos comentados en el apartado anterior "display". Además este software permite competir de forma online con otros usuarios que dispongan de la bicicleta, así el usuario obtiene una mayor motivación.

- Freno

La resistencia que utiliza esta bicicleta es una combinación entre un freno magnético y un ventilador. La empresa ofrece este sistema como una aproximación a la realidad en la forma del pedaleo y en la simulación de un cambio de marchas, en las pruebas realizadas no se apreciaron sensaciones distintas a una bicicleta habitual de ciclismo indoor con cualidades óptimas. Si se pudo comprobar que la combinación de ambos sistemas proporcionaba una mejor adaptación del usuario a la resistencia que se desea utilizar. Por ejemplo con la aplicación de un nivel 4 en la resistencia del freno magnético se pueden utilizar diferentes entradas de aire para producir mayor o menor esfuerzo. Debe destacarte que para combinar estas dos resistencias es muy complicado, ya que cada una se encuentra en una posición diferente, además prácticamente debes dejar de pedalear para cambiar una u otra.

Figura 34. Bicicleta estática Wattbike

En la imagen anterior se puede comprobar que tan lejos queda del alcance de la mano el cambio de las resistencias.

La resistencia de aire funciona de la siguiente manera. En el interior de la bici hay una serie de aspas que giran solidarias al volante de inercia, cuando se mueve la palanca de cambio se abre más o menos una entrada que permite el paso del aire y de este modo ofrece una mayor resistencia al usuario.

2.2.5.3.1.1 *Pruebas realizadas*

También se realizaron pruebas con el fin de extraer datos relevantes para el diseño del motor.
Todas las gráficas que se presentarán surgen de las tablas del anexo [A3].

- Perfil del usuario que realizó la prueba:

Perfil	
Sexo	Hombre
Edad	40
Peso	87
Experiencia	Práctica regularmente ciclismo

Tabla 20. Perfil del usuario que realiza la prueba

- Comportamiento del freno

Se tomaron diferentes combinaciones de niveles entre el freno magnético y el de aire, y en cada combinación se pedaleaba a cadencias de 50, 80 y 110, para comprobar si la resistencia aumentaba progresivamente o no. Las cadencias escogidas para la prueba abarcan el intervalo habitual que se utiliza en una bicicleta de carretera.

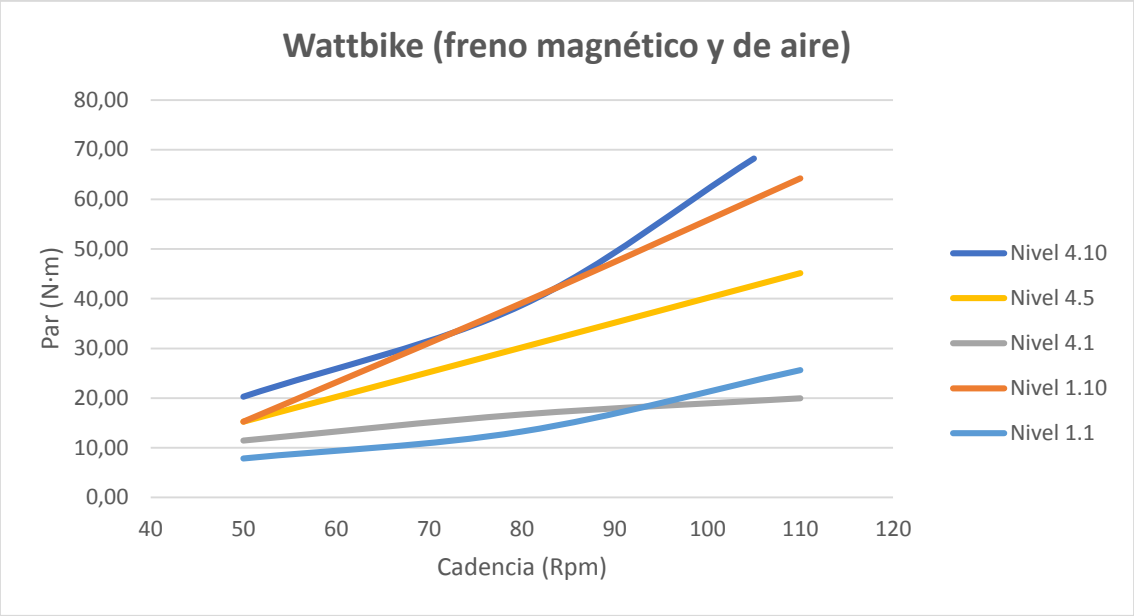


Figura 35. Análisis del freno

Con las curvas representadas en la gráfica se puede observar que en algunos casos el aumento de la resistencia aumenta de forma constante pero en otros no. Se podría decir que no se encuentra un patrón regular del crecimiento del par a medida que se aumenta la cadencia, por lo tanto aunque es un modelo útil porque al incrementar la resistencia se observa como la potencia de salida aumenta se puede decir que no preciso.

- Par máximo

En este caso se buscó la combinación de resistencias para obtener el mayor y el menor par que pudiera ser aplicado en la bicicleta.

Nivel magnético	Nivel Aire	Rpm	P (W)	rad/s	F·m	
1	1	50	41	5,23	7,83	Par mínimo
7	0	70	727	7,33	99,20	Par máximo

Tabla 21. Par máximo y mínimo

- Potencia máxima

En este caso se buscó la combinación de resistencias para obtener la mayor potencia que pudiera ser aplicada en la bicicleta. Se obtuvo con un nivel 5 del freno magnético y la entrada del aire abierta al máximo nivel.

Nivel magnético	Nivel Aire	Rpm	P (W)	rad/s	F·m
5	10	120	1036	12,56	82,48

Tabla 22. Potencia máxima

- Transmisión

La transmisión que utiliza la bicicleta es de 1 a 11, mientras que el pedal da una vuelta el volante de inercia da 11. Esto quiere decir que el volante de inercia va a una velocidad 11 veces más rápida que el pedal pero que se aplica una fuerza 11 veces inferior, de este modo no es necesario que el freno magnético sea tan potente ahorrando costes de material.

A diferencia de las bicicletas de ciclismo utilizadas habitualmente en las clases de Spinning en este caso al parar de pedalear el pedal paraba de moverse, esto es debido a que es de piñón libre.

- Observaciones

Como se consigue una potencia elevada esta bicicleta es útil para profesionales de velódromo que no utilizan cambios de marchas, ya que si se desea recrear el comportamiento de una bicicleta de calle, se ha observado que cambiar el nivel de las resistencias es muy complicado hacerlo sin parar de pedalear.

2.2.6 Datos extraídos del estudio de mercado

Este apartado se presentara de forma resumida los datos del estudio de mercado y comparación teniendo en cuenta los diferentes sistemas que se utilizan.

2.2.6.1 *Volante de inercia y materiales*

Tipo de bicicleta estática	Material del volante	Peso del volante	Intensidad del ejercicio
Estática vertical	Acero inoxidable, aluminio.	8 - 14 kg	Baja
Reclinada	Acero inoxidable, aluminio.	8 - 16 kg	Baja
Ciclismo indoor	Aluminio, Acero inoxidable o PVC.	18 - 20 kg	Elevada

Tabla 23. Características del volante de inercia

La tabla muestra cómo debe tenerse en cuenta el peso del volante de inercia en función de la intensidad del ejercicio que se desea realizar. También se ha detectado en las pruebas realizadas que un peso mayor favorece un pedaleo uniforme.

2.2.6.2 *Tendencias*

Se observa una tendencia hacia desarrollar bicicletas estáticas cada vez mayor equipadas para la realización de entrenos más efectivos y controlados, con precios aproximadamente de 3000 euros las mejor preparadas. Estos equipos cada vez mejor preparados abren un mercado hacia los ciclistas mejor preparados como profesionales o aficionados que lo practican regularmente. Además dar la posibilidad de realizar un

control exhaustivo del entreno al usuario lo motiva a superar sus propias marcas o a competir frente a otros mediante una conexión online como se ha visto en la bicicleta wattbike.

2.2.6.3 *Transmisión*

Únicamente se han podido extraer datos concretos de las transmisiones que utilizadas en el ciclismo indoor ya que las bicicletas estáticas verticales o reclinadas cubren el volante de inercia y no permitía que fueran detectadas.

Tipo de bicicleta	Transmisión
Wattbike	1-11
Keiser M3	1-9

Tabla 24. Transmisiones utilizadas

También deberá tenerse en cuenta en el nuevo sistema si el pedal debe pararse cuando se deja de pedalear o no teniendo en cuenta las cuestiones de la tabla mostrada a continuación que muestra las ventajas y los inconvenientes de los sistemas encontrados en las bicicletas estáticas actuales.

Sistema	Ventajas	Inconvenientes
Piñón libre	- Comodidad - Sistema utilizado en las bicicletas de calle, por lo tanto es más realista.	- Dificultad para recuperar la velocidad con la que se pedaleaba si se para.
Piñón fijo	- Ayuda a mantener el ritmo del pedaleo ayudado por la inercia del volante de inercia.	- Puede provocar lesiones. - Dificultad para detener el pedal.

Tabla 25. Características del piñón libre o fijo

2.2.6.4 *Frenos*

Se comparan los datos extraídos de las diferentes pruebas físicas realizadas en las bicicletas estáticas.

- Par máximo en las diferentes bicicletas analizadas

Freno	Potencia (W)	Cadencia (rpm)	Par (N·m)	Tipo de bici
Magnético y aire	727	70	99,20	Ciclismo indoor
Magnético	252	40	60,16	Spinning
Electromagnético	252	70	68,21	Bicicleta estática vertical

Tabla 26. Par máximo que permiten las bicicletas estáticas

El par máximo que se ha obtenido en la realización de las pruebas físicas ha sido de 99,20 N·m en una bicicleta de ciclismo indoor, sin embargo las bicicletas habituales utilizadas en el gimnasio no se han superado los 69 N·m.

- Par mínimo

Freno	Potencia (W)	Cadencia (rpm)	Par (N·m)	Tipo de bici
Magnético y aire	41	50	7,83	Ciclismo indoor
Magnético	11	60	1,75	Spinning
Electromagnético	26	50	4,96	Bicicleta estática vertical

Tabla 27. Par mínimo de las bicicletas estáticas

El par mínimo extraído se encuentra en la bicicleta de spinning a una cadencia de 60 rpm siendo 1,75 N·m.

- Potencia máxima

Freno	Potencia (W)	Cadencia (rpm)	Par (N·m)	Tipo de bici
Magnético y aire	1036	120	82,48	Ciclismo indoor
Magnético	308	130	22,62	Spinning
Electromagnético	540	120	42,97	Bicicleta estática vertical

Tabla 28. Potencia máxima de las bicicletas estáticas

La potencia máxima que se obtiene es de 1036W a una cadencia de 120 rpm, sin embargo debe tenerse en cuenta que la bicicleta que permite este trabajo está enfocado a un uso profesional. Muestra de ellos son las bicicletas estáticas que encontramos habitualmente en los gimnasios como las que se contemplan en las pruebas físicas en las que no se superaron los 540 W.

- Potencia mínima

Freno	Potencia (W)	Cadencia (rpm)	Par (N·m)	Tipo de bici
Magnético y aire	41	50	7,83	Ciclismo indoor
Magnético	11	60	1,75	Spinning
Electromagnético	26	50	4,96	Bicicleta estática vertical

Tabla 29. Potencia mínima de los frenos

- Observaciones

Se ha detectado que estos frenos suelen ser muy inexactos y tienen grandes variaciones en función del mantenimiento que se le realiza y del uso que suele ser muy intenso. Además el comportamiento de estos no es lineal con la cadencia, de forma que las estimaciones que se realizan mediante sensores de velocidad no son reales y se pueden mostrar en los displays datos incorrectos.

2.2.6.5 *Observaciones generales*

- Se ha observado que los frenos tienen poca precisión ya que la resistencia aumenta de forma irregular. Además se pueden encontrar diferencias de una bicicleta a otra.
- En el uso de bicicletas de Ciclismo Indoor la aplicación del freno mediante regulación manual no permite una gran precisión. Además no permite realizar un entrenamiento intenso de forma cómoda ya que debes parar de pedalear para manipular la maneta que regula el freno.
- Las clases de spinning no diferencian la experiencia de los diferentes usuarios que acuden, por consiguiente los iniciados podrían realizar el ejercicio de forma poco adecuada y acarrear algún tipo de lesión. También permiten poco control del entrenamiento realizado en el mismo momento.
- Como se ha observado en la bicicleta de Ciclismo Indoor Wattbike se le da una gran importancia a la forma correcta de pedaleo, denominada como pedaleo redondo, por este motivo deberá tenerse en cuenta.
- No se usan medidores de par ni de potencia, sino que esta medida se realiza por estimación indirecta a través de la medida de velocidad y de la cantidad inexacta de freno (mecánico o magnético) utilizado.

3 Usuarios

Hay una gran cantidad de usuarios que utilizan las bicicletas estáticas como se ha podido observar en el estudio inicial. En este apartado se analizarán sus intereses y en qué modo trabajan, así poder determinar que requerimientos deberá tener en cuenta el futuro sistema. Como la potencia y la velocidad a la que debería funcionar el motor teniendo en cuenta las zonas de trabajo habituales.

3.1 Uso general

En la práctica de la bicicleta estática encontramos gran mayoría de usuarios que las utilizan con los siguientes objetivos:

- Realizar ejercicio cardiovascular

El objetivo de este tipo de usuarios de realizar un ejercicio cardiovascular puede ser fortalecer el corazón, incrementar la capacidad pulmonar, mejorar el sueño y reducir el estrés. Utiliza los tres tipos de bicicletas estáticas y selecciona una u otra en función de la comodidad e intensidad del ejercicio que se desea realizar.

- Persona que desea bajar de peso

En este caso lo importante para el usuario es bajar de peso sin tener en cuenta la mejora de su rendimiento. Selecciona el tipo de bicicleta en función de la comodidad e intensidad.

- Tonificación muscular

Principalmente el objetivo de la persona es mejorar la estética consiguiendo fortalecer la musculatura. Para conseguir este objetivo deben de realizarse ejercicios con una resistencia elevada para exigir al usuario un tipo de ejercicio anaeróbico.

Como se ha observado en las pruebas físicas que las bicicletas estáticas utilizadas por estos usuarios no eran muy dispares en cuanto al par y potencia que proporcionaban se considera que se pueden abarcar en un mismo grupo para determinar un intervalo de trabajo que debería realizar el motor.

3.1.1 Trabajo que realizan

Se ha podido observar como en la bicicleta Wattbike se pudo obtener una potencia muy elevada, sin embargo este grupo de usuarios utiliza generalmente bicicletas de spinning o estáticas como en las que se han realizado pruebas físicas. Por este motivo se ha tomado los máximos y mínimos de zona de trabajo obtenidos en ellas para determinar el de estos.

Uso general	
Potencia mínima	11 W a 60 rpm
Potencia máxima	540 a 120 rpm
Par mínimo	2 N·m a 60 rpm
Par máximo	69 N·m a 70 rpm

Tabla 30. Zona de trabajo para uso general

3.2 Profesional

En el caso del profesional busca mejorar su rendimiento al máximo, además de realizar entrenamientos lo más similares posibles a la realidad, como pueden ser la preparación de una contrarreloj, etapas de puertos, montañas y carreras en velódromos.
En el ámbito profesional del ciclismo podemos encontrar una gran cantidad de segmentos, pero los que utilizan de forma más asidua la bicicleta estática son los profesionales de carretera y en algunos casos los profesionales de velódromo como hemos podido observar durante el análisis de las bicicletas. Esto puede ser porque la bicicleta se aproxima más a la realidad en comparación con la disciplina BMX que es el ciclismo que se práctica en montaña. Por estos motivos se han analizado estos dos tipos de ciclistas. En ambos se investigarán datos relevantes para el desarrollo del proyecto.

3.2.1 Professional carretera

Este tipo de usuario realiza la práctica del ciclismo sobre asfalto en ciudades o carreteras, y la gran mayoría de miembros forman parte de un equipo. Las diferentes tipos de prueba que realiza son los siguientes:

- Prueba en línea de un día.
- Prueba por etapas. Estas se disputan en un mínimo de dos días con una clasificación por tiempo. La finalidad es acabar todas las etapas con el mínimo tiempo posible.
- Critérium: prueba que se lleva a cabo en un circuito urbano cortado al tránsito.
- Prueba contrarreloj individual.
- Prueba contrarreloj por equipos.

3.2.1.1 *Análisis de etapas*

En este apartado se analizan etapas realizadas en el Tour de Francia 2012 realizadas por tres ciclistas profesionales que quedaron en los primeros puestos. El objetivo de este análisis es obtener las zonas de trabajo habituales de potencia y cadencia de los ciclistas profesionales.

El motivo de la elección de analizar etapas es debido a que son las pruebas realizadas con mayor frecuencia y por tanto mayor facilidad de obtener datos precisos.

Primero de todo se analizaran los datos obtenidos de las carreras del Tour de Francia 2012, y finalmente los datos extraídos serán contrastados con un estudio de Vogt et all del 2007 donde contempla las potencias de salida de 15 ciclistas que participaron en el Tour de Francia del 2005 y quedaron entre la posición 40 y 70. [16]

3.2.1.1.1 *Descripción del análisis*

La realización del análisis se basa en las observaciones de los gráficos que son extraídos mediante sistemas que se incorporan en las bicicletas.

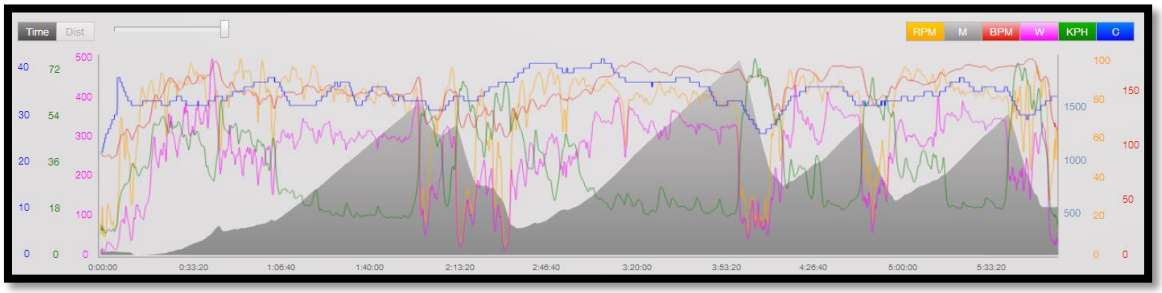


Figura 36. Gráfico del análisis

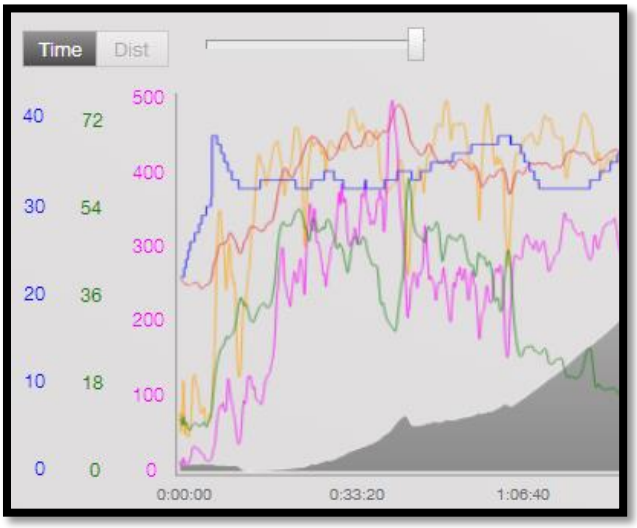


Figura 37. Gráfico del análisis ampliado

Los datos que se muestran en la coordenada "y" con respecto al tiempo situado en la coordenada "X", son los siguientes:

Datos del gráfico	
RPM	Revoluciones por minuto en color amarillo.
M	Metros de altura en color gris.
BPM	Pulsaciones en color rojo.
W	Watios en color rosa.
KPH	Quilómetros hora en color verde.
Tiempo	En la zona inferior reflejando horas, minutos y segundos.
Inclinación del terreno	El fondo del gráfico muestra las subidas que se realizan.

Tabla 31. Datos del gráfico anterior.

3.2.1.1.2 *Greg Henderson*

El análisis de Greg Henderson es realizado en la etapa número 4, "Abbeville To Rouen" de 214.5 km. La posición final que obtuvo es la número 11.

3.2.1.1.2.1 *Resumen de la etapa*

Figura 38. Resumen de la etapa

Esta tabla muestra el resumen de la etapa realizada. Donde se concreta la duración total de la etapa de 6 horas, 6 minutos y 57 segundos, y la altura máxima de 256 m. En cuanto a la potencia media ha conseguido 177 W, con un pico de 1052 W, obteniendo una cadencia máxima de 149 rpm y una media de 79. A continuación se analizaran estos datos en la etapa de forma detallada, para poder detectar en qué puntos se obtienen.

3.2.1.1.2.2 *Análisis de las potencias máximas*

En este análisis se tomarán cuatro puntos de la etapa en intervalos de 1,5 horas aproximadamente considerando que el total de la etapa es de unas 6 horas. En estos intervalos se extraerá la potencia máxima, teniendo en cuenta que uno de los cuatro intervalos escogidos refleje la potencia máxima de la tabla resumen del apartado anterior.

3.2.1.1.2.3 *Puntos escogidos*

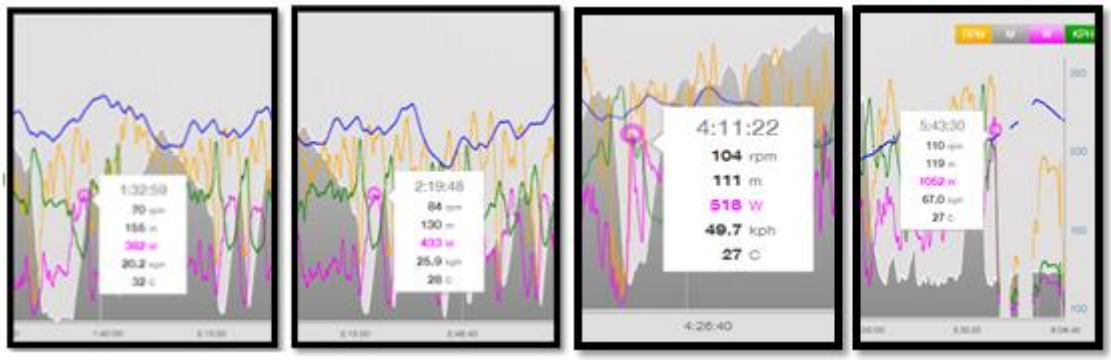


Figura 39. De izquierda a derecha: primero, segundo, tercer y cuarto punto seleccionado en la etapa.

Con los puntos extraídos se ha realizado la siguiente tabla.

Tiempo	Potencia	Cadencia	Zona
1:32:59	382 W	70 rpm	Ascenso
2:19:48	433 W	84 rpm	Ascenso
4:11:22	518 W	104 rpm	Ascenso
5:43:30	1052 W	110 rpm	Llano

Tabla 32. Valores extraídos de la etapa

- Observaciones

La mayor potencia que se obtiene es 1052 W a 110 rpm únicamente en un momento concreto del final de la etapa en el que el corredor realiza un sprint para finalizar en una zona llana. El resto de potencias que se consideran elevadas en el intervalo que han sido extraídas suceden en un ascenso y no superan los 433 W hasta pasadas 4 horas de la etapa. Estos resultados pueden ser a causa de que algunos equipos facilitan el trabajo de un miembro durante la etapa poniéndose delante del, y en la parte final este realiza un sprint con la energía que ha guardado para intentar ganar la etapa.

3.2.1.1.2.4 *Análisis de potencias sostenidas*

En este punto se escogen puntos de la etapa donde se observa en el gráfico que la potencia queda sostenida durante un intervalo de tiempo considerable para tenerlo en cuenta. De modo que se extrae un valor de ese intervalo para aproximar la potencia sostenida y poder determinar finalmente la zona de trabajo habitual.

3.2.1.1.2.5 *Puntos escogidos*

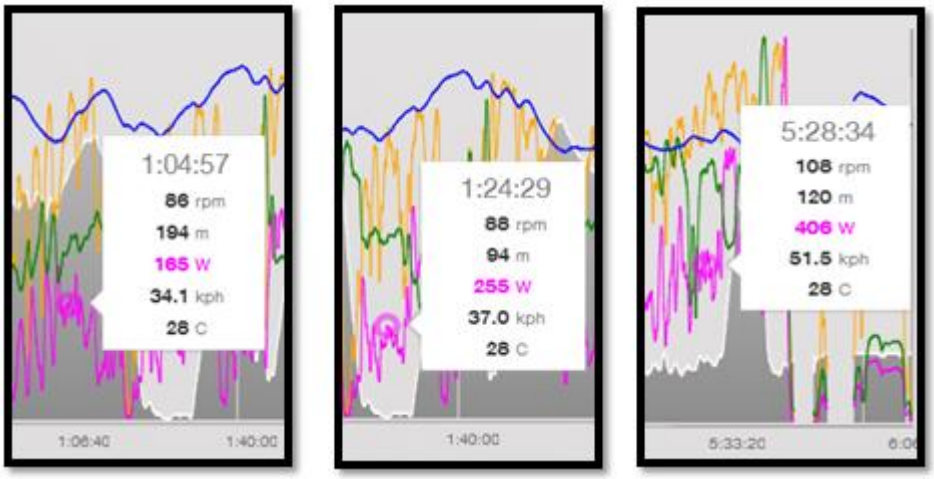


Figura 40. De izquierda a derecha: Primer, segundo y tercer punto seleccionado.

Tiempo	Potencia	Cadencia	Zona
1:04:57	165 W	86 rpm	Ascenso
1:24:29	255 W	88 rpm	Llano
5:28:34	406 W	108 rpm	Llano

Tabla 33. Valores extraídos de la etapa

- Observaciones

El momento de menor potencia y menor cadencia es en la subida, en cambio en las zonas llanas consigue aumentar el ritmo. También se puede ver como las potencias que es capaz de sostener no supera los 400W.

3.2.1.1.3 *Chris Anker Sorensen*

En este apartado se analiza la etapa 16 del Tour de Francia 2012 realizada por Chris Anker Sorensen que quedo en un segundo puesto.

3.2.1.1.3.1 *Resumen de la etapa*

En la siguiente imagen, se especifica los datos registrados durante la etapa que realiza el ciclista.

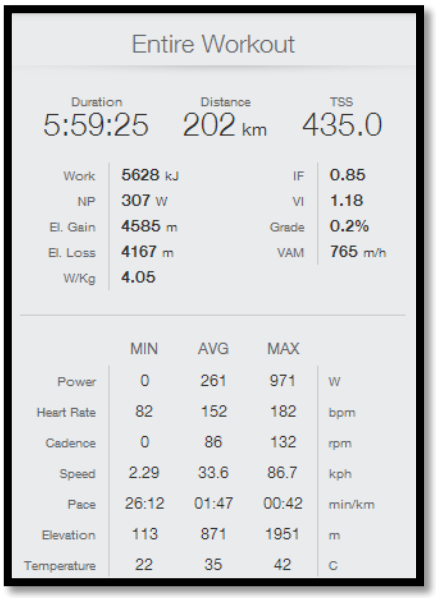


Figura 41. Resumen de la etapa

En esta tabla se puede observar la información de la etapa realizada. Donde podemos observar la duración total de la etapa de 5 horas, 59 minutos y 25 segundos con una distancia del recorrido de 202 km. y una altura máxima de 1951 m. En cuanto a la potencia media que ha conseguido es de 261 W, con un pico de 971 W, obteniendo una cadencia máxima de 132 rpm y una media de 86 rpm. A continuación se analizaran estos datos en la etapa de forma detallada, para poder detectar en qué puntos se obtienen.

3.2.1.1.3.2 *Análisis de los picos de potencia*

En este análisis se toman cuatro puntos de la etapa en intervalos de 1,5 horas aproximadamente de los cuales se extraen la potencia máxima que se consigue y se realiza una tabla con los datos obtenidos. Teniendo en cuenta que en las cuatro potencias extraídas una de ellas refleje la potencia máxima obtenida.

3.2.1.1.3.3 *Puntos escogidos*

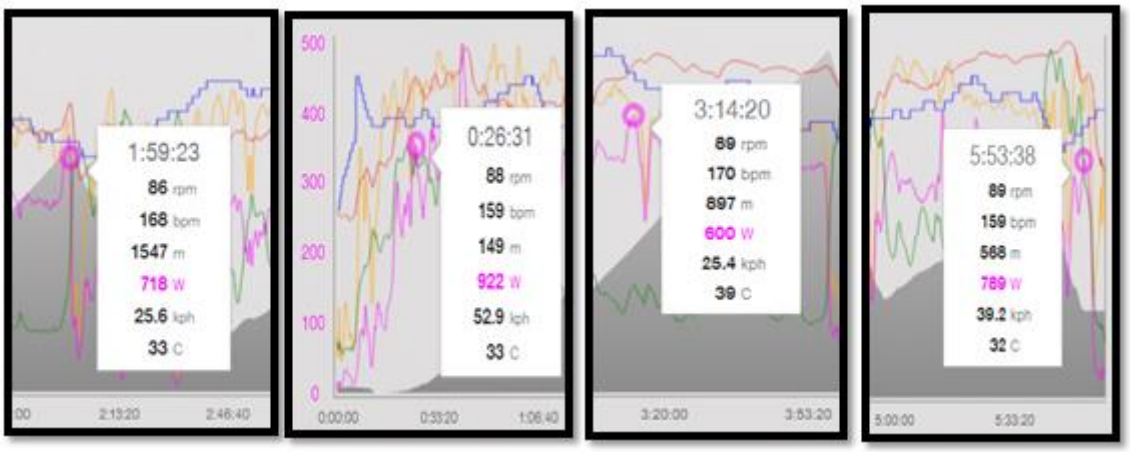


Figura 42. De izquierda a derecha: Primer, segundo, tercer y cuarto punto seleccionado.

Tiempo	Potencia	Cadencia	Zona
0:26:31	922 W	88 rpm	Llano
1:59:23	718 W	86 rpm	Ascenso
3:14:20	600 W	89 rpm	Ascenso
5:53:38	789 W	89 rpm	Llano

Tabla 34. Valores extraídos de la etapa

- Observaciones

En este caso el pico de potencia máxima se ha encontrado en el inicio de la etapa, donde seguramente el corredor realizo una escapada del pelotón, a partir de esta escapada encontramos que los picos máximos no superan los 789 watios que produce en la finalización de la etapa. También se puede ver que todas estas potencias han sido obtenidas a una cadencia entre los 86 y 89 rpm, una cadencia habitual cuando se realiza los sprint en posición de pie.

Debe añadirse que estos son los picos máximos encontrado, que son potencias que consiguen sostenerse por pocos segundos y que ocurren pocas veces durante la etapa.

3.2.1.1.3.4 *Análisis de potencias sostenidas*

En este caso se ha podido observar algunos tramos en los que se sostenía la potencia durante un tiempo considerable en comparación con los picos que se observan en algunas zonas. De este modo se ha extraído un valor del tramo para aproximar la potencia que se llevaba.

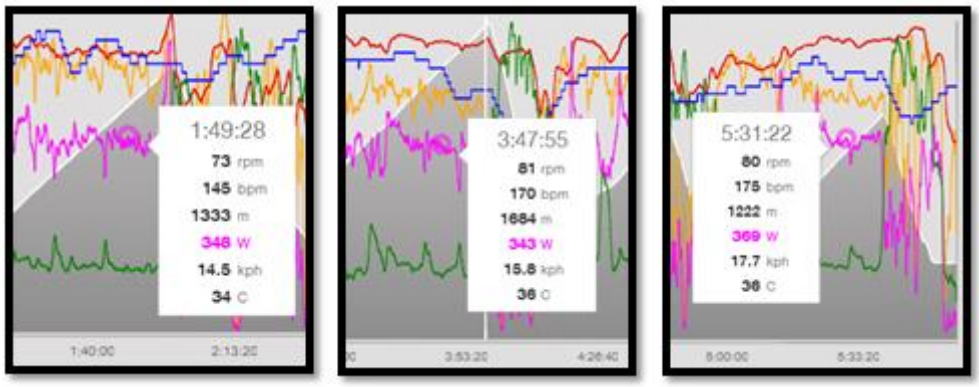


Figura 43. De izquierda a derecha: primer, segundo y tercer punto seleccionado

Tiempo	Potencia	Cadencia	Zona
1:49:28	348 W	73 rpm	Ascenso
3:47:55	343 W	81 rpm	Ascenso
5:31:22	369 W	80 rpm	Ascenso

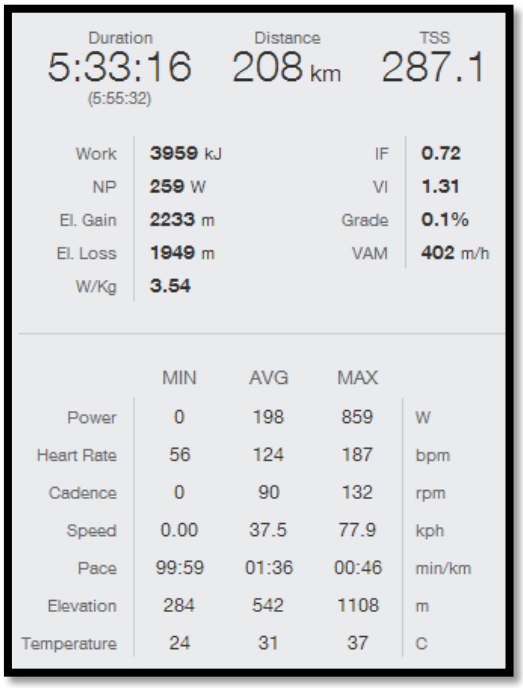
Tabla 35. Valores extraídos de potencias sostenidas

Como se puede observar los tres casos suceden en ascenso y las potencias y cadencias son muy similares en ambos, esto demuestra que es un una potencia y cadencia habitual en las subidas.

3.2.1.1.4 *Janez Brajkovic*

En este apartado se analiza la etapa 7 del Tour de Francia 2012 realizada por Janez Brajkovic que quedo en séptimo puesto.

3.2.1.1.4.1 *Resumen de la etapa*



Duration	Distance	TSS
5:33:16 (5:55:32)	208 km	287.1

Work	3959 kJ	IF	0.72
NP	259 W	VI	1.31
El. Gain	2233 m	Grade	0.1%
El. Loss	1949 m	VAM	402 m/h
W/Kg	3.54		

	MIN	AVG	MAX	
Power	0	198	859	W
Heart Rate	56	124	187	bpm
Cadence	0	90	132	rpm
Speed	0.00	37.5	77.9	kph
Pace	99:59	01:36	00:46	min/km
Elevation	284	542	1108	m
Temperature	24	31	37	C

Figura 44. Resumen de la etapa

La tabla anterior muestra información extraída de la etapa realizada por el ciclista. De ella se pueden extraer algunos datos de interés como la duración total de 5 horas, 33 minutos y 16 segundos, una distancia recorrida de 208 km., altura máxima conseguida de 1108 m, potencia media de 198 W, pico de potencia máximo de 859 W, cadencia media de 90 rpm, y cadencia máxima de 132 rpm. Estos datos serán observados de forma más detallada en el análisis que se realiza en el siguiente apartado.

3.2.1.1.4.2 *Análisis de los picos de potencia*

En este análisis se toman cuatro puntos de la etapa en intervalos de 1,5 horas aproximadamente de los cuales se extraen la potencia máxima que se consigue y se realiza una tabla con los datos obtenidos. Teniendo en cuenta que en las cuatro potencias extraídas una de ellas refleje la potencia máxima obtenida.

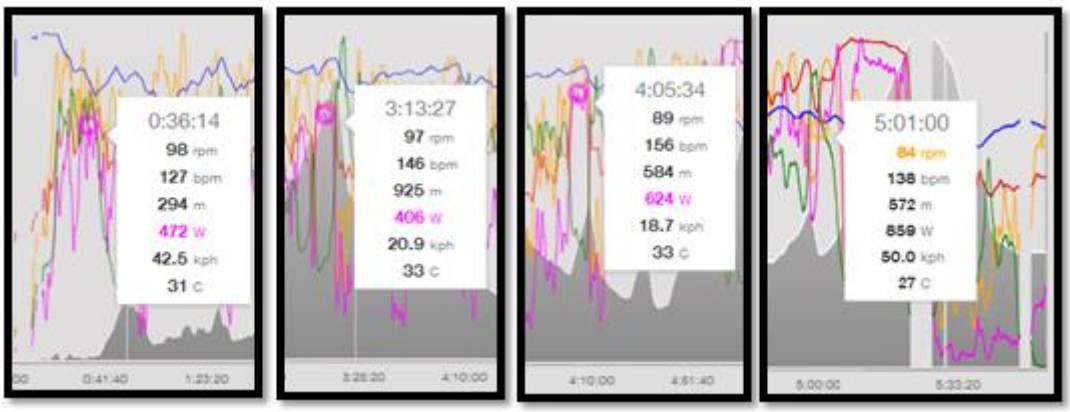


Figura 45. De izquierda a derecha: primer, segundo y tercer punto seleccionado

Tiempo	Potencia	Cadencia	Zona
0:36:14	472 W	98 rpm	Llano
3:13:27	406 W	97 rpm	Ascenso
4:05:34	624 W	89 rpm	Ascenso
5:01:00	859 W	84 rpm	Bajada

Tabla 36. Valores extraídos del análisis

3.2.1.1.4.3 *Análisis potencias sostenidas*

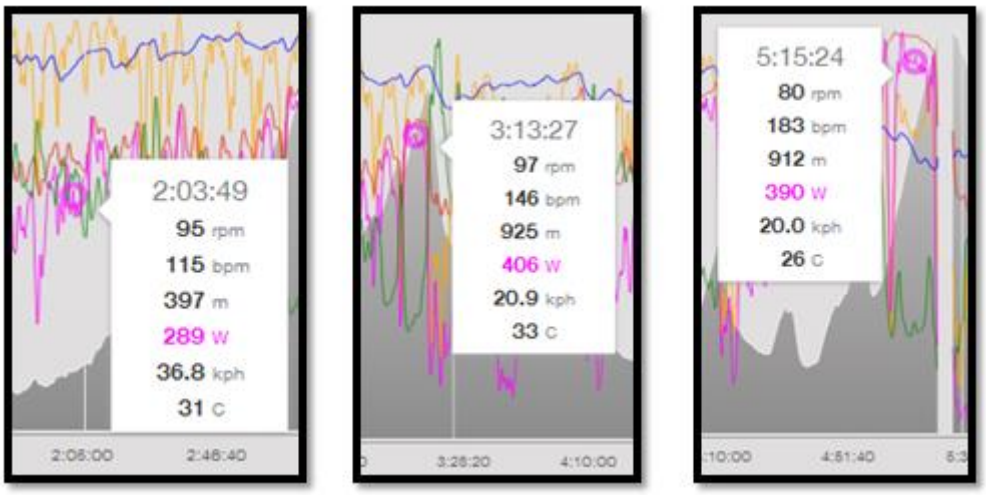


Figura 46. De izquierda a derecha: primer, segundo y tercer punto seleccionado

Tiempo	Potencia	Cadencia	Zona
2:03:09	289 W	95 rpm	Llano
3:31:27	406 W	97 rpm	Ascenso
5:15:24	390 W	80 rpm	Ascenso

Tabla 37. Valores extraídos de la etapa

3.2.1.1.5 *Comparaciones*

En este punto se ponen en común los datos de los tres corredores para observar las semejanzas y las diferencias entre ellos.

3.2.1.1.5.1 *Picos de potencia*

- Greg Henderson onceavo puesto

Momento de la etapa	Potencia	Cadencia	Zona
1:32:59	382 W	70 rpm	Ascenso
2:19:48	433 W	84 rpm	Ascenso
4:11:22	620 W	121 rpm	Ascenso
5:43:30	1052 W	110 rpm	Llano

Tabla 38. Picos de potencia de Greg Henderson

- Chris Anker Sorensen segundo puesto

Momento de la etapa	Potencia	Cadencia	Zona
0:26:31	922 W	88 rpm	Llano
1:59:23	718 W	86 rpm	Ascenso
3:14:20	600 W	89 rpm	Ascenso
5:53:38	789 W	89 rpm	Llano

Tabla 39. Picos de potencia de Chris Anker

- Janez Brajkovic séptimo puesto

Momento de la etapa	Potencia	Cadencia	Zona
0:36:14	472 W	98 rpm	Llano
3:13:27	406 W	97 rpm	Ascenso
4:05:34	624 W	89 rpm	Ascenso
5:01:00	859 W	84 rpm	Llano

Tabla 40. Picos de potencia Janez Brajkovic

En la etapa de cada uno de los corredores encontramos un pico diferenciador del resto de resultados, en el caso de Greg Henderson y Janez Brajkovic ocurre al final de la etapa, en cambio Chris Anker realiza su pico máximo al principio. Estos picos máximos únicamente ocurren una vez en la etapa como hemos podido observar. A continuación se presenta una tabla con los picos máximos obtenidos.

Corredor	Posición final	Potencia	Cadencia
Greg Henderson	11	1052 W	110 rpm
Chris Anker	2	922 W	88 rpm
Janez Brajkovic	7	859 W	84 rpm

Tabla 41. Picos de potencia destacados

Con estos datos obtenidos podríamos delimitar una zona de trabajo poco común que se realiza en momentos de sprint, para finalizar la etapa, para atacar o para no perder al pelotón.

Picos de potencia máximos en pocos segundos	
Mínimo	800 W
Máximo	1100 W
Cadencias	80 - 120 rpm

Tabla 42. Picos de potencia máximos

También se puede considerar otro intervalo de trabajo poco habitual entre los 400W y 800W donde ocurren picos de potencia más habituales que en el caso anterior.

Zona de trabajo poco habitual			
Corredor	Potencia	Cadencia	Zona
Greg Henderson	433 W	84 rpm	Ascenso
Greg Henderson	620 W	121 rpm	Ascenso

Chris Anker	718 W	86 rpm	Ascenso
Chris Anker	600 W	89 rpm	Ascenso
Chris Anker	789 W	89 rpm	Llano
Janez Brajkovic	472 W	98 rpm	Llano
Janez Brajkovic	406 W	97 rpm	Ascenso
Janez Brajkovic	624 W	89 rpm	Ascenso

Tabla 43. Valores de potencia poco habituales

Este intervalo de picos frecuentes debe tenerse en cuenta ya que Chris Anker que quedó en segundo puesto ha llegado a realizar tres en toda la etapa con una potencia muy elevada. A continuación podemos observar la tabla con los límites establecidos.

Zona de trabajo poco frecuente	
Mínimo	400 W
Máximo	800 W
Cadencias	80 - 125 rpm

Tabla 44. Zona de potencias poco habituales

3.2.1.1.5.2 *Potencias sostenidas*

Potencias habituales durante el transcurso de toda la etapa.

- Greg Henderson puesto número once

Momento de la etapa	Potencia	Cadencia	Zona
1:04:57	165 W	86 rpm	Ascenso
1:24:29	255 W	88 rpm	Llano
5:28:34	406 W	108 rpm	Llano

Tabla 45. Potencias sostenidas de Greg Henderson

- Chris Anker Sorensen segundo puesto

Momento de la etapa	Potencia	Cadencia	Zona
1:49:28	348 W	73 rpm	Ascenso
3:47:55	343 W	81 rpm	Ascenso
5:31:22	369 W	80 rpm	Ascenso

Tabla 46. Potencias sostenidas de Chris Anker

- Janez Brajkovic séptimo puesto

Momento de la etapa	Potencia	Cadencia	Zona
2:03:09	289 W	95 rpm	Llano
3:31:27	406 W	97 rpm	Ascenso
5:15:24	390 W	80 rpm	Ascenso

Tabla 47. Potencias sostenidas de Janez Brajkovic

Con estas tablas se puede observar y definir cuál es el intervalo de trabajo que ocurre con mayor frecuencia.

Zona de trabajo habitual	
Mínimo	150 W
Máximo	400 W
Cadencias	70 - 110 rpm

Tabla 48. Potencias y cadencias habituales

Como se puede ver en la tabla se aumentan un poco los intervalos con respecto a los datos registrados para conseguir un cierto margen.

3.2.1.1.6 *Estudio Vogt et all 2007*

Con los resultados obtenidos se realiza la comparación con un estudio realizado en el 2007 por en el que contempla las potencias de salida de 15 ciclistas que participaron en el Tour de Francia y quedaron entre la posición 40 y 70. [15]
En primer lugar se presentan y se explican los datos que proporciona el estudio y posteriormente se comparan con los datos obtenidos.

3.2.1.1.6.1 *Estudio*

Figura 47. Potencia media en diferentes etapas

En esta ilustración se puede observar la potencia media de salida que consiguen en las diferentes etapas. Observando que en la montaña es el momento donde se consigue una mayor potencia, teniendo en cuenta que en una etapa llana los ciclistas se refugian en el pelotón. Sin embargo si observamos estas etapas en intervalos de tiempo más cortos podemos observar unas potencias mayores como muestra la imagen siguiente

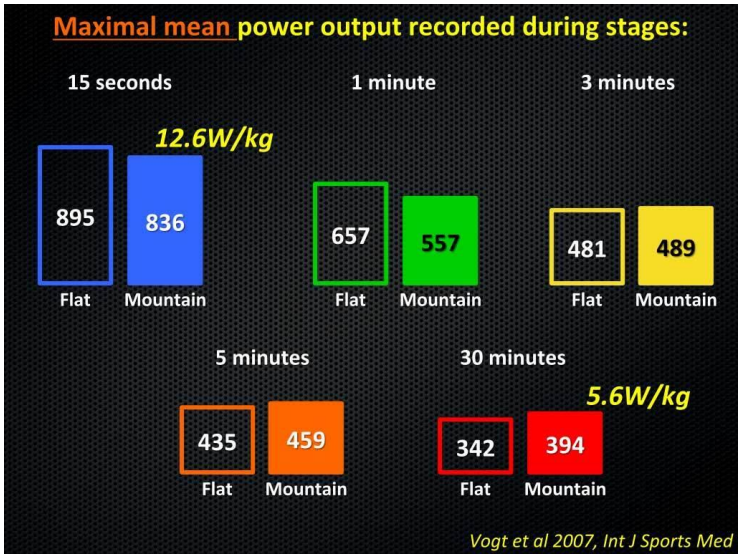


Figura 48. Media de potencia máxima

Se puede observar como en los intervalos más cortos la potencia es mayor en las etapas llanas, esto es debido a los esfuerzos intensos que realizan los ciclistas para realizar o responder a un ataque, o para terminar la etapa con un sprint.

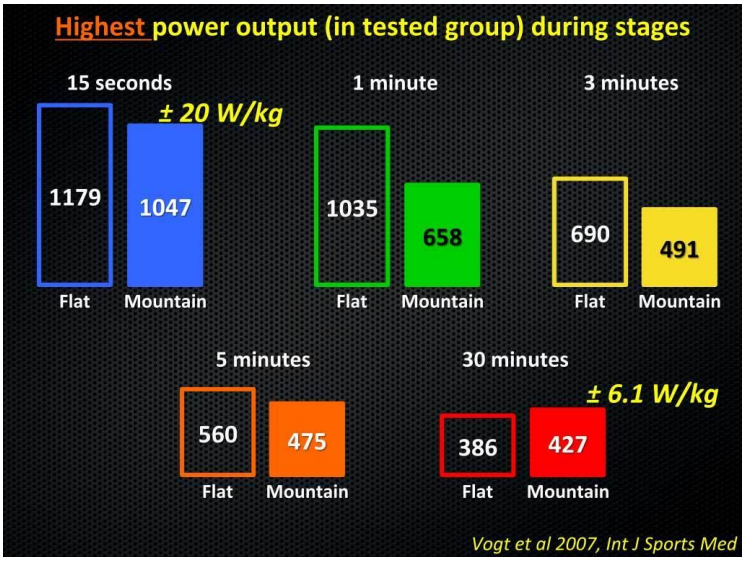


Figura 49. Picos máximos de potencia

En este otro caso podemos ver los picos de potencia extraídos durante un intervalo de tiempo. Esto quiere decir que en un instante de ese intervalo de tiempo consiguen llegar a ese máximo.

3.2.1.1.6.2 *Comparación*

Ahora se muestran los datos extraídos del análisis y se comparan con el estudio.

3.2.1.1.6.3 *Picos de potencia poco habituales*

Comparación de la potencia máxima que únicamente ocurre una vez en la etapa.

Picos de potencia máximos en pocos segundos	
Mínimo	800 W
Máximo	1100 W
Cadencias	80 - 120 rpm

Tabla 49. Picos de potencia máximos

Vemos como los datos obtenidos en el análisis se aproximan de forma considerable a los datos del estudio. Ya que como se ha determinado el intervalo de la tabla ocurre en pocos segundos y también en el estudio. De este modo podemos aproximar el tiempo que durara la realización de estos intervalos, reflejándolo en la siguiente tabla.

Picos de potencia máximos		
Mínimo	800 W	1 min.
Máximo	1100 W	1 seg.
Cadencias	80 - 120 rpm	

Tabla 50. Picos de potencia máximos en intervalos de tiempo

Aunque el estudio contemple que se encuentran casos de una potencia superior a 1100 W, se considera que no es necesario una potencia superior porque los tres corredores analizados han quedado en mejores posiciones que el estudio.

3.2.1.1.6.4 *Picos de potencia frecuentes*

Zonas de trabajo poco frecuente		
Mínimo	400 W	30 min.
Máximo	800 W	1 min.
Cadencias	80 - 125 rpm	

Tabla 51. Zonas de trabajo poco frecuentes

Comparando la tabla extraída anteriormente con el estudio de la imagen "Maximal mean", el intervalo fijado en el análisis podría ocurrir de un minuto a treinta minutos, por lo tanto se puede entender que puedan trabajar en estas zonas de forma más frecuente que en la realización de picos máximos.

3.2.1.1.6.5 *Zona de trabajo habitual*

Zona de trabajo habitual	
Mínimo	150 W
Máximo	400 W
Cadencias	85 - 110 rpm

Tabla 52. Potencias y cadencias en la zona de trabajo habitual

Si analizamos la media del intervalo que se ha fijado en tabla de la zona de trabajo habitual quedan 275 W, superior a la que marca el estudio de la “figura 50”, pero debe tenerse en cuenta que los corredores del análisis quedaron en los primeros puestos, en

cambio los corredores del estudio quedaron entre la posición 40 y la 70, por lo tanto los datos pueden considerarse correctos.

Figura 50. Potencia media en diferentes etapas

3.2.1.2 *Conclusiones generales*

- Es importante mantener una media alta durante toda la etapa, combinando una buena resistencia y la realización de sprint de potencias elevadas.
- La cadencia máxima que se puede encontrar es de 149 rpm.
- La cadencia habitual se encuentra entre los 70 y 125 rpm.
- La zona de trabajo habitual del ciclista no supera los 400 W.
- La potencia media en las montañas es más elevada.

3.2.1.3 *Transmisión*

El tipo de transmisión utilizada en las bicicletas de carretera es de piñón libre y se utilizan marchas. Estas marchas son las que permiten al ciclista adaptarse a una zona llana o un ascenso para agotarse lo menos posible aplicando una fuerza inferior y aumentando la velocidad. En cuanto a marchas pueden considerarse largas o cortas:

- Marchas largas

Utilizadas para aumentar la velocidad y disminuir la fuerza.

- Marchas cortas

Utilizadas para disminuir la velocidad y aumentar la fuerza

3.3 Profesional de pista

El profesional de pista se caracteriza por practicar el ciclismo en un velódromo, que es una pista artificial con forma de ovalo, con los extremos redondeados y peraltados. Se disputan diferentes modalidades: velocidad individual, velocidad por equipo, quilómetro contrarreloj, persecución individual, persecución por equipos, carrera por puntos, Keirin, Scratch, Madison, carrera de eliminación i Omnium.

3.3.1.1 *Análisis de trabajo*

Para determinar cuáles deberían ser las características del motor en cuanto a potencia y velocidad destinadas a este tipo de profesional se analizará el trabajo que realiza en alguna de las pruebas de competición que se realizan como los 200 m y los 1000 m. La elección del estudio de estas dos es porque son las pruebas que menos tiempo duran y por tanto donde encontraremos el máximo esfuerzo.

3.3.1.1.1 *Prueba de los 200 metros.*

En este tipo de prueba arrancan parados y realizan un esfuerzo máximo de pie para acelerar lo más rápido posible hasta obtener la velocidad necesaria y es entonces cuando adoptan la posición sentada.

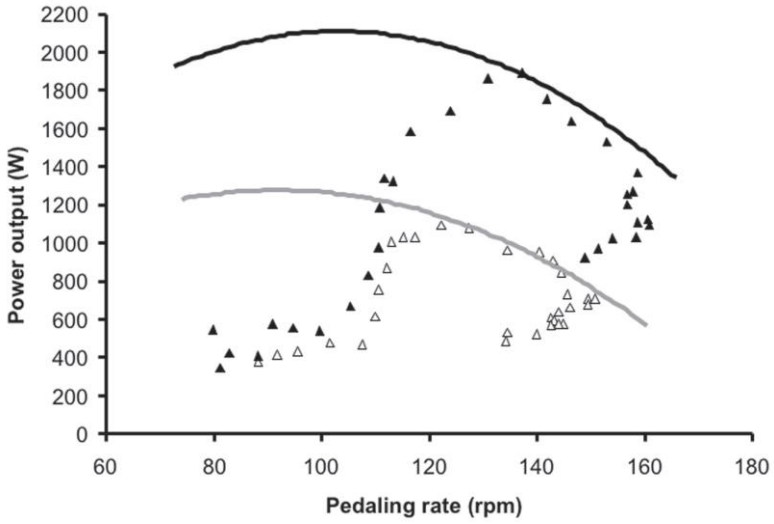


Figura 51. Potencia y cadencia en una prueba de 200 metros.

En este gráfico se puede observar la potencia media producida cada segundo por un hombre (representado con una línea de color negro) y una mujer (representada con una línea de color gris) con la correspondiente cadencia. Los ciclistas aceleran gradualmente en los primeros 5-7 segundos y entonces inician la máxima aceleración. Las curvas parabólicas representan la predicción de la potencia máxima de salida (basada en el torque lineal-progresión del pedaleo) que puede ser producida en el rango de pedaleo entre 75 y 170 rpm si los atletas se encuentran exentos de fatiga. Los puntos situados debajo de la curva parabólica representan la fatiga.
La potencia máxima de salida que se puede observar es aproximadamente de 2100 W a una cadencia de 100 rpm en el caso del hombre.

3.3.1.1.2 *Prueba de los 1000 metros.*

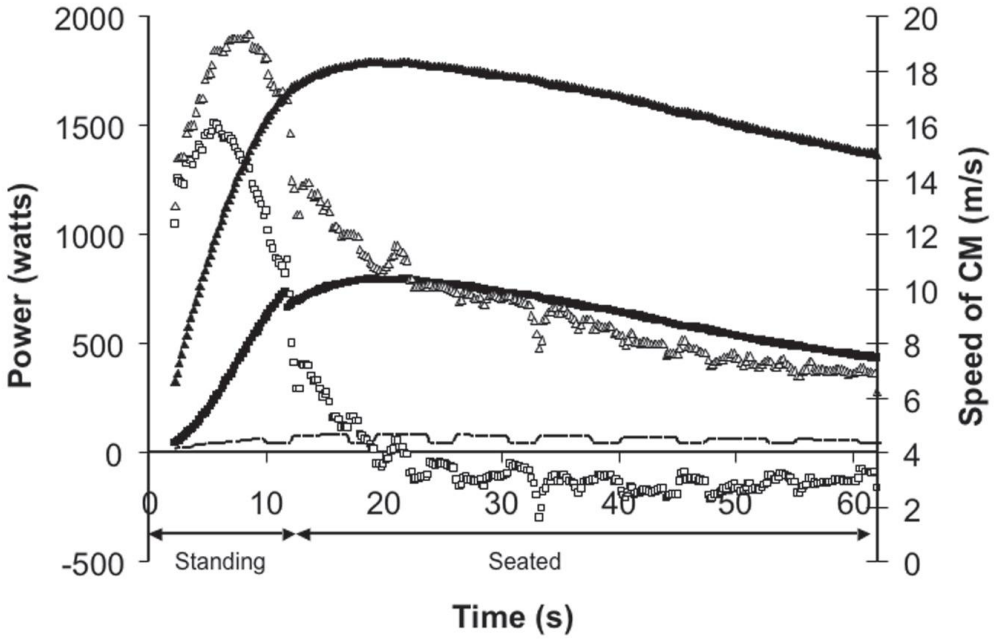


Figura 52. Potencia con respecto al tiempo en una prueba de los 1000 metros.

El gráfico muestra potencia, resistencia y los cambios de energía durante la prueba de 1000 metros realizada por un campeón del mundo. En el eje "y" se representa la velocidad del centro de masa que no varía en los giros como lo hace la velocidad de la rueda. En los primeros segundos la potencia aumenta (representada con un triángulo en el gráfico) muy rápidamente con la posición de pie y a continuación comienza a disminuir con la posición del ciclista sentado. Los cambios en la energía cinética (representada con el cuadrado) muestran cómo se requiere la mayor parte de la energía en los primeros 12 segundos. La potencia máxima que se registra en este caso es de aproximadamente 1750 W, un poco inferior que en la prueba de los 200 m.

3.3.1.2 *Transmisión*

En este caso las bicicletas no disponen de cambio ni frenos, haciendo que la transmisión sea de piñón fijo como en el caso de las bicicletas de spinning, consiguiendo frenar haciendo fuerza en el sentido contrario del pedaleo. Siempre escogen relaciones de transmisión pequeñas para optimizar la potencia durante la aceleración. Es una decisión importante para determinar la aceleración y la velocidad máxima.

3.4 Amateur

En el caso del amateur consideramos personas aficionadas al ciclismo que practican regularmente y por lo tanto tienen un gran interés. Cuando utilizan bicicletas estáticas generalmente utilizan bicicletas de ciclismo indoor en el hogar o en el gimnasio y en muchos casos realizan clases de spinning. El objetivo de este perfil es conseguir una buena forma física para realizar recorridos largos.

Respecto a la transmisión utilizada en las bicicletas que utilizan es de piñón libre y se utilizan marchas. Estas marchas son las que permiten al ciclista adaptarse a una zona llana o un ascenso para agotarse lo menos posible aplicando una fuerza inferior y aumentando la velocidad. En cuanto a marchas pueden considerarse largas o cortas:

- Marchas largas

Utilizadas para aumentar la velocidad y disminuir la fuerza.

- Marchas cortas

Utilizadas para disminuir la velocidad y aumentar la fuerza

3.4.1 Zonas de trabajo

Para determinar las zonas de trabajo del perfil amateur se van a contemplar las pruebas físicas que se realizaron y el análisis de un estudio.

3.4.1.1 *Pruebas físicas*

Las pruebas realizadas físicamente contemplan la potencia máxima que se pudo extraer en una bicicleta de ciclismo indoor profesional teniendo en cuenta un usuario amateur. El resultado fue el siguiente:

Nivel magnético	Nivel Aire	Rpm	P (W)	rad/s	F·m
5	10	120	1036	12,56	82,48

Tabla 53. Máxima potencia en las pruebas físicas

Las potencia, la velocidad, y el par obtenido fueron elevados sin embargo las sensaciones posteriores después de obtener esta marca fueron de un agotamiento excesivo.

3.4.1.2 *Estudio de amateurs*

El estudio analizado realiza pruebas con aficionados del ciclismo para comprobar si el uso de un nuevo plato con una forma diferente al redondo habitual permite obtener potencias más elevadas [Referencia del estudio]. Este es útil para observar el par máximo que pueden aplicar los ciclistas amateurs ya que en el momento del sprint es donde se extrae el mayor, teniendo en cuenta que en las subidas se utilizan marchas para disminuir la fuerza aplicada y aumentar la velocidad. [18]

Table 1 Maximal Power Output (m.p.o.; averaged) on the Circular Pedal Path and the Novel Pedal Path and Power Output Increase

pedal rate	m.p.o. on circular path	m.p.o. on novel pedal path	m.p.o. increase
100 rpm	949.8 W	998.4 W	5.1%
110 rpm	980.5 W	1032.4 W	5.3%
120 rpm	986.5 W	1037.5 W	5.2%
130 rpm	956.9 W	1006.3 W	5.2%

Tabla 54. Potencias máximas de la primera prueba

En la tabla debe tenerse en cuenta el plato circular ya que es el habitual. Por lo tanto podemos encontrar una potencia máxima de 986.5 W. Sin embargo 15 minutos después se realiza otra prueba y la potencia baja considerablemente como se puede ver a continuación.

	series	pedal path	power output
first test day	first second	novel circular	675 W 535 W
second test day	first second	circular novel	583 W 648 W
average values		circular novel	559 W 661.5 W

Tabla 55. Potencias máximas de la segunda prueba

La potencia máxima extraída en la segunda prueba con el plato habitual es de 559 W de media. A pesar de descansar 15 minutos el rendimiento baja en gran medida, por lo tanto el objetivo principal de realizar recorridos largos no se cumplirá realizando un ejercicio a 1000 W de potencia como en la primera prueba.

3.4.1.3 *Conclusiones*

La obtención de datos para este perfil de usuario ha sido complicada ya que los sistemas que utilizan los profesionales para registrar las etapas que realizan como se ha presentado en su propio apartado son de un coste muy elevado. Por lo tanto para aproximar un intervalo de trabajo adecuado para amateur se ha considerado tener en cuenta la zona de trabajo habitual del profesional y ampliarla en cierta medida para obtener un margen amplio.

Potencia habitual del profesional	
Mínimo	150 W
Máximo	400 W
Cadencias	70 - 110 rpm

Tabla 56. Potencias y cadencias del profesional

Zona de trabajo determinada para el amateur	
Mínimo	100 W
Máximo	600 W
Cadencias	50 - 120 rpm

Tabla 57. Potencias y cadencias del amateur

Debe tenerse en cuenta que la cadencia determinada en el usuario amateur es muy inferior al profesional porque se determina toda la zona de trabajo, en cambio la tabla del profesional únicamente define un intervalo de trabajo. Esto quiere decir que la cadencia más baja del profesional no se encuentra en este intervalo al igual que las potencias también varían.

3.5 Rehabilitación

La utilización de la bicicleta estática se utiliza principalmente para la rehabilitación de rodilla después de una lesión o cirugía, ya que deben de fortalecerse los músculos que han perdido fuerza a causa del periodo de lesión que ha impedido el uso de los músculos de la pierna. El objetivo de fortalecer los músculos es conseguir la contracción de ellos para proporcionar estabilidad en la rodilla. También es importante el uso de la bicicleta estática porque se clasifica como un ejercicio cinético de cadena cerrada, porque permite apoyo de la pierna, evitando la libertad de movimiento en las direcciones transversales que podrían perjudicar la recuperación de la rodilla. Hay que tener en cuenta que este tipo de usuario suele utilizar bicicletas estáticas verticales por la comodidad y porque no realiza un ejercicio de gran intensidad como pueden aportar otros tipos de bicicletas estáticas. Sobre todo se encuentran una gran cantidad de lesiones en el ligamento cruzado anterior de la rodilla en personas que practican deportes como futbol, básquet o esquí. En estos casos se utiliza la bicicleta estática como un elemento más en la rehabilitación de esta lesión para fortalecer la musculatura como se ha comentado anteriormente. El objetivo en estos casos es fortalecer los cuádriceps y los isquiotibiales.
Sobre este tipo de usuarios no hay mucha información y es posible que después de los resultados obtenidos en la validación, se pueda considerar contactar con fisioterapeutas que proporcionen datos y necesidades concretas.

3.5.1 Zonas de trabajo

Para determinar las zonas de trabajo de un usuario en rehabilitación se ha considerado las pruebas físicas realizadas en la bicicleta estática vertical ya que se conoce que utilizan estas como hemos comentado anteriormente.

Nivel	Rpm	P (W)	w(rad/s)	M(Nm)
1	50	26	5,23	4,96
1	70	36	7,33	4,915
1	90	47	9,42	4,98
1	120	63	12,56	5,01
5	50	68	5,23	12,98
5	70	98	7,33	13,36
5	90	123	9,42	13,05
5	120	164	12,56	13,05
10	50	121	5,23	23,11
10	70	173	7,33	23,60
10	90	219	9,42	23,23
10	120	285	12,56	22,679
15	50	173	5,23	33,04
15	70	240	7,33	32,74
15	90	317	9,42	33,63
15	120	400	12,56	31,83
20	50	233	5,23	44,49
20	70	310	7,33	42,28
20	90	411	9,42	43,60
20	120	540	12,56	42,97
25	50	310	5,23	59,20

Tabla 58. Datos extraídos en las pruebas físicas

La tabla 58 muestra los valores obtenidos en las pruebas físicas realizadas en diferentes niveles de entrenamiento. A partir del nivel 20 teniendo en cuenta que este ejercicio siempre se realiza sentado se encuentra dificultad para pedalear por este motivo se considera suficiente determinar el nivel 15 para un usuario en estado de rehabilitación de este modo la zona de trabajado quedaría de la siguiente manera.

Nivel	Rpm	P (W)	w(rad/s)	M(Nm)
1	50	26	5,24	4,96
15	120	400	12,56	31,83

Tabla 59. Valores de las pruebas físicas

Zona de trabajo de rehabilitación	
Mínimo	26 W
Máximo	400 W
Cadencias	40 - 120 rpm

Tabla 60. Zona de trabajo de una persona en rehabilitación

4 Entrenamientos

En los casos de usuarios amateur y profesionales se encuentra que realizan entrenamientos para mejorar su rendimiento. A continuación se describen estos. [32]

4.1 Definiciones

Previamente debe describirse que es el umbral anaeróbico a fin de comprender adecuadamente algunos de los entrenamientos que se presentará.

- Umbral anaeróbico:

Es el momento que determina la zona de trabajo del ciclista en la que sus músculos no son capaces de asimilar la glucosa adecuadamente. Si trabaja de forma prolongada en esta zona su rendimiento ira decayendo, y si la supera decaerá rápidamente.

4.2 Tipos de entrenamiento

4.2.1 Resistencia aeróbica

Una mayor parte del entrenamiento se asienta en la resistencia aeróbica ya que de todas las cualidades físicas, la resistencia es sobre la que se asientan el resto de cualidades. La insistencia del entrenamiento en esta zona durante la base, es la que va a conceder unas ganancias fisiológicas a nivel muscular, metabólico y del sistema cardiovascular.

4.2.2 Resistencia anaeróbica

Entrenar de forma anaeróbica no suele ser habitual y ha de realizar en momentos puntuales, dependiendo del ciclista y sus competiciones. Durante la etapa de acondicionamiento es mejor no realizar este tipo de entrenamiento. Se realiza cuando se ha adquirido una buena capacidad aeróbica y es difícil superar el umbral anaeróbico. La mayor parte del entrenamiento se realiza en terreno llano, pero en algunos casos donde sea difícil alcanzar el umbral se realiza en subidas poco inclinadas.

4.2.3 Resistencia anaeróbica láctica

La realización de entrenamientos para conseguir resistencia anaeróbica láctica está destinados a momentos muy puntuales, como es el esfuerzo desarrollado en una llegada masiva al sprint. En estas situaciones se llega al límite de la frecuencia cardiaca máxima, entre el 95% y el 100%.

4.2.4 Resistencia anaeróbica aláctica

- Potencia Anaeróbica láctica

Con este tipo de entrenamiento se enseña al cuerpo a trabajar en momentos de alta intensidad en los que tiene falta de oxígeno, para que el metabolismo aproveche al máximo la glucosa de los alimentos ingeridos y poder conseguir un buen rendimiento y una rápida recuperación.

- Capacidad anaeróbica láctica

Se realiza para acostumbrar al músculo a que pueda alimentarse en condiciones críticas como en la realización de una aceleración para conseguir alcanzar al grupo de delante que se está escapando.

4.2.5 Fuerza

La fuerza se entrena para conseguir aumentar la potencia de salida del ciclista y mejorar así su rendimiento. Los entrenamientos de fuerza se pueden realizar en el gimnasio y en la bicicleta después de finalizar el periodo de acondicionamiento general que se explicara más adelante.

- Fuerza resistencia

Este tipo de fuerza se entrena para evitar la fatiga del músculo en carreras muy largas y conseguir un buen rendimiento a lo largo de toda la carrera.

4.2.6 Velocidad resistencia

El principal objetivo es este tipo de entrenamiento es conseguir mantener una velocidad constante y muy elevada durante bastante tiempo.

4.3 Preparación de la temporada

Como debe prepararse la temporada teniendo en cuenta una serie de intervalos.

4.3.1 Periodo preparatorio

El periodo preparatorio consiste en la realización de dos fases de entrenamiento denominadas acondicionamientos generales y preparatorios específicos descritos en este apartado.

4.3.1.1 *Acondicionamiento general.*

Este periodo consta de 8 a 12 semanas y los objetivos que se pretenden conseguir son los siguientes:

- Perder peso de forma progresiva.
- Automatización del pedaleo redondo y adquisición de agilidad en la pedalada.
- Acostumbrar al músculo a consumir grasas de forma eficiente. En especial, para ciclistas que participen en pruebas de larga duración y de carácter predominantemente aeróbico.
- Aumentar la capacidad aeróbica, potencia aeróbica y consumo máximo de oxígeno.
- Adaptación del sistema cardiovascular: aumento del tamaño del corazón, adaptación pulmonar y circulación sanguínea más eficiente, tanto para desarrollar potencia como a la hora de la recuperación (en gran parte debido al aumento de capilares a nivel muscular).
- Aumento de las fuerzas máximas (más eficiente si se realiza por medio de pesas en el gimnasio).
- Aumento del número de mitocondrias musculares y enzimas más eficientes. Aclaración del lactato.

4.3.1.1.1 *Cualidades físicas a entrenar*

Para conseguir estos objetivos se dividen las 12 semanas en tres grupos.

Semana 1ª a 4ª
○ Resistencia aeróbica extensiva al 65% - 70% de la frecuencia cardiaca máxima e intervalos en las dos últimas del 70% - 75%. ○ Tonificación muscular en el gimnasio. ○ Rodar en llano y con agilidad a más de 85 pedaladas por minuto.

Semana 5ª a 8ª
○ Resistencia aeróbica extensiva al 70% - 75% de la frecuencia cardiaca máxima e intervalos en las dos últimas semanas del 75% al 80% ○ Fuerza resistencia en el gimnasio. ○ Cadencia superior a 90 pedaladas por minuto.

Semana 5ª a 8ª
○ Resistencia aeróbica extensiva al 70% - 75% de la frecuencia cardiaca máxima e intervalos en las dos últimas semanas del 75% al 80%. ○ Fuerza resistencia en el gimnasio. ○ Incluir alguna subida prolongada. ○ Cadencia superior a 90 pedaladas.

Tabla 61. Período de entrenamiento

4.3.1.2 *Preparatorio específico*

Este periodo está comprendido entre 6 y 8 semanas y los objetivos que desean conseguirse son los siguientes:

- Mejora de las enzimas glucolíticas (encargadas de transformar el glucógeno muscular en sustancia comestible para la célula) trabajando en acidosis muscular. Esto quiere decir que cuando estés es un momento de alta intensidad en el que no puedes hablar, tus músculos puedan alimentarse.
- Aproximar el umbral anaeróbico al VO2máx.
- Mejorar el metabolismo cuando pedaleas en anaeróbico (cuando se trabaja sin oxígeno).
- Desarrollo y mantenimiento de la fuerza y la velocidad.

4.3.1.2.1 *Cualidades físicas a entrenar*

Resistencia
Resistencia Aérobica Extensiva o Trabajar a una frecuencia cardiaca de crucero entre 60% y el 80% durante toda la sesión.
Resistencia Aeróbica Intensiva o Uno o dos días a la semana. o Frecuencia cardiaca comprendida entre 80 y 85% de la frecuencia cardiaca máxima. o No sobrepasar la hora y media de duración. o En los primeros entrenamientos fraccionar la hora y media en intervalos de 3x15 minutos o 2x30 minutos.
Resistencia Anaeróbica Aláctica o Realización solo para ciclistas de competición. o Entrenar un día a la semana. o Realización en terreno llano. o 95% - 100% de la máxima intensidad que se pueda desarrollar. o Se realizan de 10 a 30 repeticiones dividas en 4 o 5 series. El tiempo de cada repetición estará comprendido entre 5 y 15 segundos. o Recuperación de 4 minutos entre repeticiones y de 6 a 10 minutos entre series. Sin dejar de pedalear una vez realizado el sprint a máxima potencia, a un ritmo del 60% de la frecuencia cardiaca.
Potencia Anaeróbica láctica o Terreno llano o Intensidad entre 90% y 95%. o Realización entre 8 y 20 repeticiones, divididas de 2 a 4 series. Las repeticiones tendrán una duración de 20 a 90 segundos. o Recuperación de 2 a 5 minutos entre repeticiones
Capacidad Anaeróbica Láctica

- Terreno entre 2% y 5%.
- Intensidad entre 80% y 90% de la frecuencia cardiaca máxima.
- Realización de 6 a 10 repeticiones divididas entre 2 y 3 series. La duración de las repeticiones será de 2 a 8 minutos cada una.
- Recuperación entre series de 10 a 15 minutos.
- Recuperación entre repeticiones el doble de la repetición en el caso de una intensidad entre 85% y el 90%. En el caso de una repetición entre 80% y 85% el tiempo será el mismo que el realizado en la repetición.
- Cadencia de 50 a 60 pedaladas por minuto.

Fuerza

Fuerza resistencia en terreno llano

- Ejecutar el entrenamiento entre el 80% y el 85% de la frecuencia cardiaca máxima y sin llegar al umbral anaeróbico.
- Alcanzar las pulsaciones progresivamente.
- Series que se pueden realizar:

  - 4 repeticiones x 5 minutos, recuperación de 2 min. 30 sg., tiempo total de 20 minutos.
  - 2 repeticiones x 10 minutos, recuperación 5 minutos, tiempo total de 20 minutos.
  - 3 repeticiones x 10 minutos, recuperación 5 minutos, tiempo total de 30 minutos.
  - 3 repeticiones x 10 minutos, recuperación 5 minutos, tiempo total de 30 minutos.

- cadencia entre 50 y 60 rpm.
- Realización del ejercicio sentado.

Fuerza resistencia con pendiente

- Ejecutar el entrenamiento entre el 80% y el 85% de la frecuencia cardiaca máxima y sin llegar al umbral anaeróbico.
- Alcanzar las pulsaciones progresivamente.
- Pendiente de 4% y 6%
- series que se pueden realizar:

  - 3 repeticiones x 4 minutos, recuperación de 2 min. 30 sg., tiempo total de 12 min.
  - 5 repeticiones x 4 minutos, recuperación de 2 min. 30 sg., tiempo total de 20 minutos.
  - 2 series de 3 repeticiones x 6 minutos, recuperación 4 minutos, recuperación 4 minutos cada repetición y 12 minutos entre series, tiempo total de 36 minutos.

- 2 series de 4 repeticiones de 2 minutos x 4 minutos x 6 minutos x 8 minutos, recuperación de 1 min 30 seg., 2 min 30 seg., 4 min y 5 minutos, entre series recuperación de 20 minutos, tiempo total 40 minutos.

- Cadencia entre 50 y 60 rpm.
- Realización del ejercicio sentado.

Velocidad resistencia

- La distancia de entrenamiento podrá ser desde los 200 metros a 2 kilómetros.
- Cadencia superior a 100 rpm.
- Frecuencia cardiaca entre el 90% y el 95%.
- Realizar de 8 a 20 repeticiones, dividas en 2 o 3 series.
- Las recuperaciones se realizarán al 60% de la frecuencia cardiaca máxima, entre 3 y 10 minutos. Entre series serán de 10 a 15 minutos, y al finalizar la última serie se recuperará 30 segundos al 60% de la frecuencia cardiaca máxima.

Tabla 62. Cualidades físicas a entrenar

4.3.2 Periodo competitivo

Serán semanas con poco volumen e intensidad. Si se ha hecho un periodo de acondicionamiento inadecuado las distintas competiciones y pruebas serán las que irán moldeando y afinando para alcanzar la máxima forma.

4.3.3 Periodo de transición

Su finalidad es ir preparando al organismo de cara a la finalización de la temporada e ir perdiendo la forma de manera progresiva. O también se hará una transición en el caso de querer preparar un segundo pico de forma.

En el primer caso será cuestión de ir perdiendo la forma poco a poco y evitar no parar en seco antes de colgar la bici varias semanas y en el segundo caso no deberá ser tan acentuada la transición porque de lo contrario quizás no se llegue al segundo pico y si hay intercalado un descanso total, será mínimo.

4.4 Observaciones

Como describen los entrenamientos la parte más importante es la resistencia aeróbica ya que es donde se asientan el resto de cualidades, por tanto las zonas de trabajo habituales no requerirán de un potencia y par muy elevadas.

También se ha podido ver que muchos de estos entrenamientos se realizan con el seguimiento de la frecuencia cardíaca, pero también pueden realizarse en función de la potencia máxima que realiza el usuario y a partir de aquí mediante 100% determinar

qué porcentaje debe aplicarse en cada zona muy aproximado a los porcentajes de la frecuencia cardíaca. Un ejemplo de ello es la siguiente tabla que utilizan los usuarios de la bicicleta Wattbike que hemos analizado en el estado del arte el apartado de Ciclismo Indoor. En ella se describe el porcentaje de máximo ritmo cardíaco como "%MRC" y potencia máxima en un minuto como "%MMP".

Zona Entrenamiento	Propósito	% MRC	%MMP	RPE (1-10)/Cómo te sientes	Duración
Recuperación	Regeneración y Recuperación	< 60	< 35	1 Muy relajado. Capaz de mantener una conversación.	< 60'
1. Básico	Establecer resistencia base	60-65	35-45	2 Relajado. Capaz de mantener una conversación.	90'-360'
2. Básico	Mejorar la eficiencia	65-75	45-55	3 Trabajando. Te sientes más caliente. Ritmo cardíaco y respiración en aumento. Puede que sudes.	60'-240'
3. Intensivo	Mejorar potencia sostenible	75-82	55-65	5 Trabajo duro. Ritmo cardíaco y respiración en aumento. Acumulación de dióxido de carbono. Sudando. Respirando fuertemente.	45'-120'
4. Intensivo	Elevar el umbral	82-89	65-75	6 Agobiado. Jadeando. Sudando libremente.	30'-60'
5. Máximo	Sostener un elevado porcentaje de potencia máxima aeróbica	89-94	75-85	7 Muy agobiado. Sin aliento. Sudando mucho.	14'-40'
6. Máximo	Aumentar el máximo output de potencia	> 94	85-100	10 Super-agobiado. Sin aliento. Sudando mucho.	Intervalos 4'-10'
Supra-máximo	Aumentar el output de potencia sprint	N/A	> 100	10 Extremadamente agobiado. Sin aliento. Sudando mucho.	Intervalos cortos

Figura 53. Entrenamientos determinados para la bicicleta estática Wattbike

5 Propuesta del sistema

Como se ha observado, se encuentran algunas carencias en las bicicletas estáticas actuales, por este motivo se plantea una propuesta eléctrica que las pueda cubrir, además de proporcionar una serie beneficios a los usuarios.

5.1 Parámetros que deberá permitir el sistema

Seguidamente se describirán las funciones que deberá permitir el sistema de frenado eléctrico, teniendo en cuenta el análisis de los usuarios analizados.

5.1.1 Uso general

Este segmento utiliza la bicicleta estática a modo de conseguir una serie de objetivos como pérdida de peso, tonificación muscular o realizar un ejercicio cardiovascular. Se ha detectado que estos usuarios son motivados si se les permite ver las marcas que consiguen ya que desean superarlas. Por este motivo deberá permitirse la programación de entrenamientos por objetivos y un registro de ellos.

5.1.2 Amateur

Para este segmento, deberán permitirse una serie de parámetros con el fin de adaptarse a ellos. Por este motivo, convendrá simularse el cambio de marchas y el piñón libre con el fin de aproximándose al comportamiento real de la bicicleta de calle. Además de poder programar etapas, que representen situaciones encontradas en la realidad como zonas llanas, o de ascenso en la subida de una montaña, aparte de los entrenamientos que se han observado anteriormente. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que muestran un gran interés por conocer las marcas que consiguen, así que conviene ofrecer un sistema preciso que registre estas. De este modo podrán tener un registro y motivarse para superar sus objetivos. Asimismo se ha detectado que el pedaleo redondo es un factor importante para el rendimiento de los ciclistas, así que deberá estudiarse la posibilidad de entrenarse.

5.1.3 Profesional de carretera

En el caso del profesional se ha de tener en cuenta un pedaleo de piñón libre, cambio de marchas y entrenamientos con zonas llanas y en ascenso, de esta manera el sistema se aproximará de forma considerable a la realidad. Por otro lado, debería permitir la programación de entrenamientos para diferentes finalidades vistos anteriormente, así como el pedaleo redondo. También es muy importante en este caso una gran precisión y un control exhaustivo de estos entrenamientos. Del mismo modo que en el caso de los usuarios amateur, este segmento utiliza el pedaleo redondo para mejorar su rendimiento considerablemente, sin embargo en este perfil es de mayor importancia, porque requieren de un mayor esfuerzo ya que compiten profesionalmente.

5.1.4 Profesional de pista

El profesional de pista también realiza una gran cantidad de entrenamientos para mejorar el sprint que debe realizar en las competiciones, por este motivo, se permitirá la programación de entrenamientos, y un control preciso de ellos. Teniendo en cuenta que es interesante que estos sean registrados para ser analizados posteriormente. Por otro lado, el entrenamiento del pedaleo redondo, no es tan interesante como en los casos anteriores, ya que el sistema de piñón fijo que utilizan en sus bicicletas, ya les ayuda a ello. Sin embargo el sistema de piñón fijo si debe considerarse en el sistema.

5.1.5 Spinning

En el caso del Spinning el sistema debe permitir que los diferentes participantes tengan un perfil registrado en las bicicletas que utilizan, con el fin de que cada uno realice un entrenamiento acorde con sus cualidades físicas. Así se repercutirá en un entrenamiento óptimo, que a la vez pueda mejorar la comodidad del monitor que realiza la clase, ya que no tendrá que estar pendiente de que cada persona trabaje adecuadamente. Además la sesión que realiza el participante deberá quedar registrada, a modo que este pueda seguirla para motivarse, con la finalidad de superar objetivos marcados.

5.1.6 Rehabilitación

Como se ha visto en el estudio de mercado, las bicis utilizadas por personas en estado de rehabilitación, disponen de algunos programas de entrenamiento que permiten fijar una potencia máxima, en el caso de este sistema deberá permitirse definir un par máximo, a fin de que el usuario no sobrepase la fuerza considerada, y así evitar posibles daños en este. También hay que tener en cuenta que el sistema permita trabajar diferentes zonas de la pierna, ya que como se ha visto en algunos tratamientos es importante trabajar una zona muscular en mayor medida. Por otro lado deberá permitirse un pedaleo que simule el piñón libre para que el pedal pare de girar cuando no se pedalea y de este modo evitar posibles daños en la pierna.

5.2 Características del sistema

Teniendo en cuenta todas las aportaciones que se desea ofrecer a los usuarios, se propone un nuevo sistema de frenado eléctrico que pueda incorporarse adecuadamente a una bicicleta estática. Con esta finalidad se decide incorporar un accionamiento que permita:

- Un control exacto del par respecto a la posición.
- Un alto par que se asemeje a un caso real.
- Permitir el entrenamiento del pedaleo redondo.
- Simular etapas.
- Almacenamiento de datos de entrenamientos.

6 Pliego de condiciones

En este apartado no solo se definirán las características que debe tener el motor el cual se pretende diseñar, también se considerarán recomendaciones para el desarrollo del motor cuando se determine la viabilidad.

6.1 Propuesta de la zona de trabajo del accionamiento

Finalmente, después del estudio de usuarios se determina un intervalo de trabajo del freno en el que este debe trabajar. Este intervalo abarca todo el trabajo realizado por amateurs y profesionales de carretera, considerando que es un intervalo lo suficientemente grande para determinar, si también podría ser viable para otros usuarios. Además de haber podido precisar de una forma mayor el segmento de los profesionales de carretera frente al resto.

Por otro lado los profesionales de pista han sido descartados por el momento ya que aplican fuerzas y velocidades muy altas en el pedal y podría obtenerse un motor sobredimensionado.

El intervalo determinado es el siguiente.

Zona de trabajo	
Mínimo	100 W
Máximo	1100 W
Cadencias	50 - 125 rpm

Tabla 63. Requisitos del motor

6.2 Recomendaciones mecánicas

Estos son aspectos que deberán tenerse en cuenta cuando se determine la viabilidad del diseño del motor.

- Ruido

Se ha observado como en algunos casos se tiene en cuenta que la bicicleta no realice un ruido excesivo, será característica que debería tenerse en cuenta después de comprobar que el motor funciona correctamente.

- Volante de inercia

El volante deberá tener un peso aproximado de 20 kilogramos aproximadamente, ya que como se ha visto en el análisis inicial favorece un pedaleo uniforme y permite entrenamientos donde se puede aplicar mayor fuerza y velocidad en el pedal. También hay que contemplar la posibilidad de que el volante de inercia quede parcialmente descubierto, en este caso el material deberá ser inoxidable ya que el usuario desprende una gran cantidad de sudor.

6.3 Normativa

En la búsqueda de posible normativa que pudiera influenciar el desarrollo del motor se han encontrado algunos aspectos que deberán tenerse en cuenta en un futuro cuando se determine que el motor es viable y se empiece a diseñar todo el sistema.

6.3.1 UNE-EN 957. Sistema de bloqueo.

"Para impedir el uso incontrolado o el movimiento de cualquier pieza rotatoria el equipo por parte de terceras personas, especialmente niños."

6.3.2 UNE-EN 957. Sistema de emergencia.

"Debe detener el movimiento del equipo durante una vuelta completa de la biela en ambas direcciones."

7 Introducción al estudio mecánico.

Después de haber realizado los estudios de usuario, los tipos de entrenamiento existentes y las zonas de trabajo en las que trabajan los ciclistas, se va a proceder a estudiar en detalle el ciclo del pedaleo, las variables cinemáticas que afectan a dicho ciclo, ya sean referentes al cuerpo humano o a la mecánica de la bicicleta. Además se estudia las variables cinéticas referentes a todas las fuerzas existentes en el ciclismo (tanto las fuerzas propulsivas como las resistivas). Para comprobar cómo afectan estos parámetros, se ha llevado a cabo un estudio mecánico en donde se calcula el efecto que tienen las variables cinéticas en cada punto de la bicicleta. Gracias a la muestra de gráficos y a la simulación implementada en Matlab-Simulink, se pueden verificar y analizar los resultados obtenidos. Con el sistema realizado con este software, se pueden alterar los parámetros de entrada, para ver cómo afectan al sistema y en definitiva, al ciclista en sí.
Con esta simulación, se quiere hacer entender cómo funciona realmente la física de una bicicleta.

8 Estudio biomecánico

Para un mejor entendimiento del funcionamiento de la física del cuerpo humano durante el pedaleo es necesario conocer tanto el estudio del pedaleo, como las variables cinemáticas y cinéticas existentes en el ciclismo

8.1 Estudio del pedaleo.

Cuando se habla de biomecánica en el ciclismo [40], un factor muy importante a estudiar, es la técnica de pedaleo con la que se lleva a cabo la actividad física.
Se han realizado diferentes estudios, con el fin de poder mejorar la eficiencia de cada pedalada de los ciclistas profesionales para tener un mayor rendimiento en las competiciones. Aunque se trata de un movimiento bastante simple existen diferentes fases en el ciclo de pedaleo, las cuáles se explican en el punto siguiente.

8.1.1 Fases del pedaleo.

Durante el proceso en el que se realiza ejercicio, el ciclista está continuamente haciendo una rotación de 360º con los pedales. En este movimiento se pueden diferenciar diversas etapas:

- Empuje hacia adelante:

  Momento en el cual el pedal se sitúa en la parte superior de la rotación (0º), y en donde se empieza a aplicar fuerza en este.

- Empuje hacia abajo:

  Es la fase que pasa de los 10º a los 170º aproximadamente en esta rotación. Se ejerce la máxima fuerza posible sobre el pedal. Y por consiguiente, es en donde se obtiene la máxima potencia.
- Empuje hacia atrás:

  Es la etapa que pasa de los 170º a los 190º. El pedal retrocede siguiendo el movimiento circular. Se pierde la mayoría de la fuerza ejercida en la etapa anterior.

- Elevación:

  Es la última etapa (desde los 190º hasta 350º) antes de volver a iniciar el proceso. Esta fase es la que tiene un menor rendimiento en cuanto a eficiencia de la pedalada.

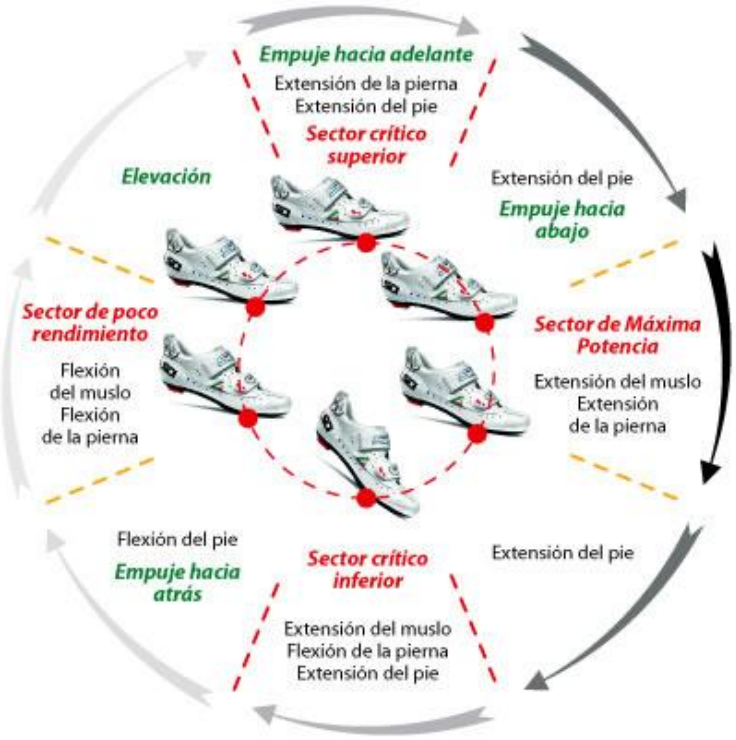


Figura 54. Fases existentes en el pedaleo

8.1.2 Tipos de pedaleo.

Aunque probablemente se piense que solo existe un tipo de pedaleo, los expertos aseguran que no es de este modo. Existen dos tipos de pedaleo: el pedaleo a pistón y el pedaleo redondo.

8.1.2.1 *Pedaleo a pistón.*

Se realiza cuando el ciclista ejerce fuerza únicamente en la fase descendente del pedaleo. En cambio en la fase ascendente no se ejerce fuerza. El pie sigue el movimiento

de la rotación hasta llegar al punto más alto del ciclo, en donde se vuelve a presionar el pedal para poder avanzar.
Esta forma de ir en bicicleta es la utilizada por la mayoría de los ciclistas.

8.1.2.2 *Pedaleo redondo.*

Se denomina de esta forma al que podría ser un pedaleo ideal, al cual se quiere llegar para poder tener la máxima eficiencia en las pedaladas.
Aunque no existe el pedaleo redondo en su plenitud, sí que podemos llegar a acercarnos a esta teoría.
A nivel profesional, se entrena a los ciclistas con diferentes técnicas de pedaleo para poder llegar a tener una similitud con el pedaleo redondo. No solo se les hace empujar el pedal hacia adelante sino que se tiene que arrastrar este cuando llega a la parte inferior de la rotación ejerciendo una pequeña fuerza. Esto ayuda a que con el otro pie no tengamos que hacer tanta fuerza para seguir con la mima velocidad. Por último, en la parte de recobro (como podemos observar en la imagen) no se ejerce fuerza para poder seguir el movimiento; pero sí que se tiende a levantar un poco el pie para que no sea una carga para el otro pedal hasta llegar al punto 12 (imagen inferior), en donde se vuelve a repetir el proceso.
En definitiva, podemos decir que el pedaleo redondo consta de cuatro fases, todas importantes, en donde en cada una de ellas se realiza las acciones comentadas anteriormente.

Estas cuatro fases son:

- Avance: empuje hacia adelante.
- Impulso: empuje hacia abajo.
- Arrastre: empuje hacia atrás.
- Recobro: Tirón hacia arriba.

Figura 55. Principales fases del pedaleo

8.1.3 Músculos utilizados en cada ciclo.

En este apartado se va explicar los diferentes músculos utilizados en cada ciclo del pedaleo. A la hora de realizar actividad física, se trabaja una u otra parte del cuerpo

dependiendo del deporte. En el caso del ciclismo se ejercitan diferentes músculos de las piernas y de la cadera. Estos se ejercitan más o menos, dependiendo de la etapa en la que se encuentre la pierna en el pedaleo.
En el inicio del ciclo, el pedal se encuentra en el punto más alto de la rotación, es decir, en el punto doce de la imagen inferior. En este punto se produce el avance del pedal para realizar el movimiento. Los músculos utilizados son los glúteos hasta llegar a haber rotado 90º.
En este segundo punto se ejercitan los cuádriceps, los cuáles al ser músculos flectores son los que mayor fuerza pueden realizar. A medida que el pedal va llegando al punto medio del ciclo (desde los 160ª los 180º), se ejercitan los gemelos, músculos flexores, los cuáles no llegan a aplicar una fuerza tan alta como los cuádriceps.
En la segunda mitad del pedaleo, se utilizan otros músculos.
Primeramente, se ejercitan los tibiales y peroneos, desde el momento en que finaliza el arrastre y empieza el recobro del pedaleo.
En segundo lugar, en la parte media del recobro se utilizan los abductores. Finalmente, la fase en la que el pedal pasa desde los 270º hasta los 360º se utilizan los flectores de la cadera.
Cuando el pedal llega al punto 12, se vuelve a repetir el proceso.

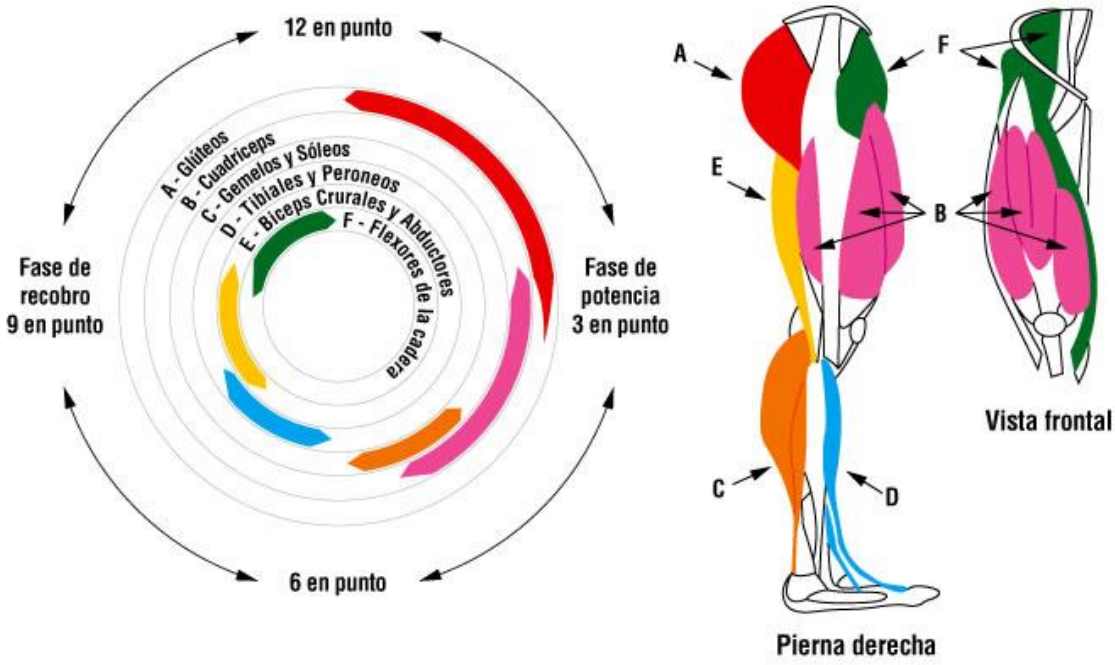


Figura 56. Músculos utilizados en el pedaleo

8.2 Variables cinemáticas existentes en el ciclismo.

Además de las distintas formas de pedaleo existentes y de las fases que tiene el ciclo de pedaleo, existen diversas variables que pueden perjudicar al ciclista a la hora de realizar ejercicio físico.
En este apartado se comentará la manera en la que influye la parte propulsora del sistema (pedal, tobillo, rodadura y cadera), es decir de qué forma influye la parte

humana al sistema. Y posteriormente, se realizará un análisis cinemático de la parte mecánica de la bicicleta.

8.2.1 Análisis cinemático de la pierna durante el pedaleo.

En este apartado, se va a comentar las variables cinemáticas que se encuentran en nuestro cuerpo físico, como son la cadera, la rodilla y el tobillo, junto con el pedal de la bicicleta.

8.2.1.1 *Análisis cinemático del pedal, tobillo, rodilla y cadera.*

Referente a las variables como son el pedal, el tobillo, la rodilla y la cadera, están expuestos a múltiples factores, los cuáles afectan directamente a los músculos y articulaciones del ciclista. Estos factores son principalmente la cadencia, la inclinación del deportista a la hora de pedalear y avanzar, las características de la bicicleta y la forma y diseño del pedal.

8.2.1.1.1 *Estudio desde un plano sagital.*

Para poder estudiar de forma adecuada todos estos factores, se suelen realizar experimentos en donde se recoge en un plano sagital, la forma en que el ciclista desarrolla su pedaleo. Existen diferentes formas de hacer este estudio. De una forma u otra, el objetivo de este, es llegar a obtener a raíz de los puntos escogidos, la figura cinemática compuesta por estos, y los ángulos que las rectas forman entre ellas.
En la siguiente imagen se puede observar la metodología comentada (plano sagital).

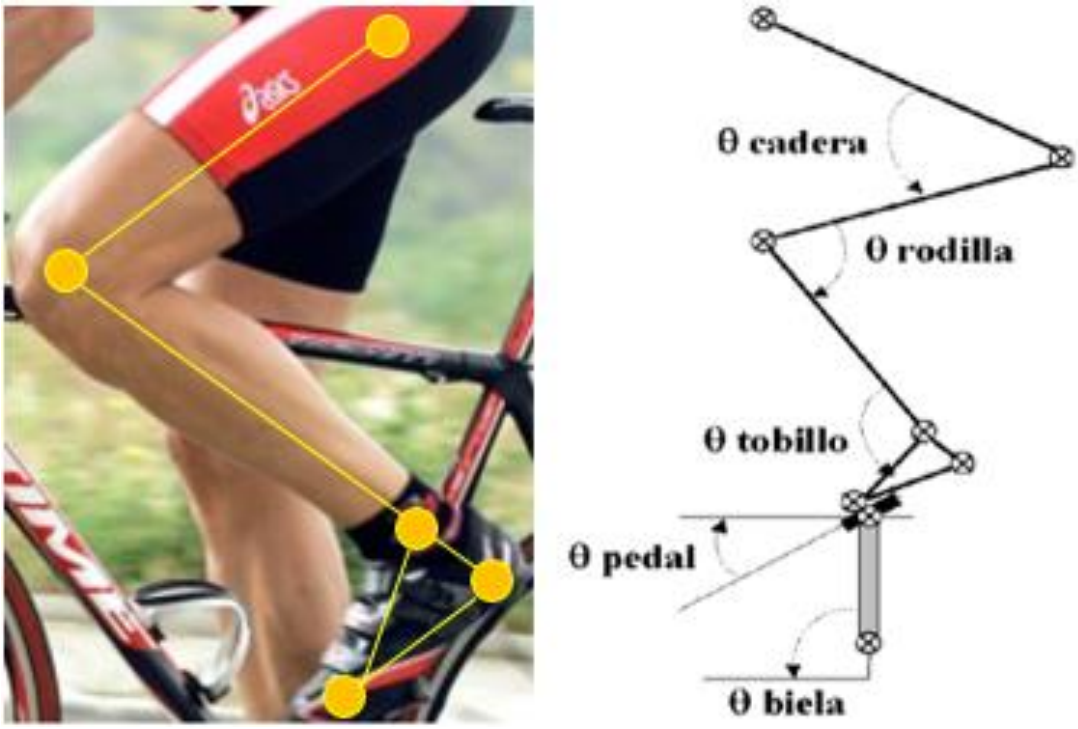


Figura 57. Estudio cinemático de la parte humano, desde un plano sagital

Como resultados de este experimento, estudios como los realizados por Cavanagh, Sanderson [37], Álvarez [25], y Bolouchi y Hull [36] coinciden en que durante la última fase del ciclo del pedaleo, se encontraban los mayores ángulos negativos. Aunque se creía que posicionando el pedal en ángulo positivo se encontraría una mayor eficiencia; por el contrario, resultó que no era lo más favorable ya que el pedal no era empujado por la pierna, sino que era arrastrado por esta.
En la siguiente tabla se muestra los valores máximos y mínimos de los ángulos que adopta el pedal a diferentes cadencias. En la tabla se hace referencia a tres estudios distintos.

	Bolourchi y Hull (1985) **			Cavanagh y Sanderson (1986) **	Álvarez (1995) *			Álvarez (1995) **		
rpm	63	80	100	90	75	85	95	75	85	95
θ máx	5	1	-4	21	7	5	5	15	14	11
θ mín	-38	-45	-48	-40	-35	-33	-33	-25	-28	-36

Tabla 64. Ángulos máximo del pedal obtenidos por diferentes autores a distintas cadencias (rpm); Ciclistas amateurs (*) y Ciclistas profesionales (**).

Referente a la cinemática relacionada con el tobillo, es una de las partes más difíciles de estudiar en cómo se puede mejorar la eficiencia del pedaleo, ya que como se ha explicado anteriormente, el análisis requiere una toma de puntos que pueden variar entre diferentes estudios. Cosa que hace muy complicada la comparación de los resultados. No obstante, se puede confirmar que el rango de movimiento del tobillo oscila en unos 20º. Este rango de movimiento es mayor para los ciclistas profesionales que para los amateurs.
En la siguiente imagen se muestra tres formas diferentes de cómo se puede calcular el ángulo adoptado por el tobillo.

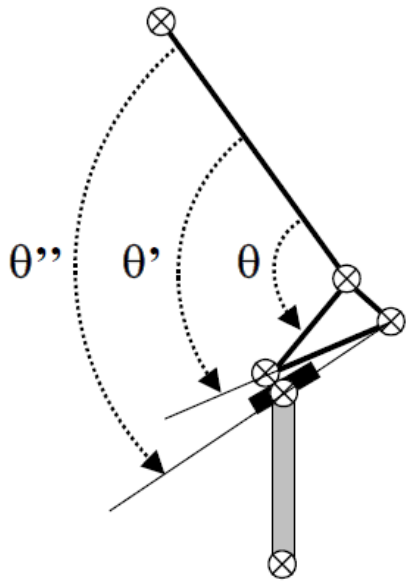


Figura 58. Rango del movimiento angular del tobillo

Otra articulación a estudiar es la rodilla. Esta es la parte de la pierna menos compleja para llevar a cabo un óptimo análisis y una mejor comparación entre resultados de distintos experimentos. El objetivo de todos ellos es conocer el rango de trabajo de la rodilla, es decir entre que valores angulares máximos y mínimos trabaja esta.
Con el fin de ampliar al máximo este rango, el ciclista debe adoptar la posición adecuada en su bicicleta. Uno de los factores más influyentes para ello es la posición idónea del sillín. En el caso de que este no se encuentre la posición idónea, el deportista puede padecer lesiones graves de rodilla como pueden ser tendinopatías (inflamación de los tendones), o la condromalacia rotuliana (degeneración de la superficie del cartílago constituyente de la cápsula posterior de la rótula). Estas lesiones suelen ser de larga duración.

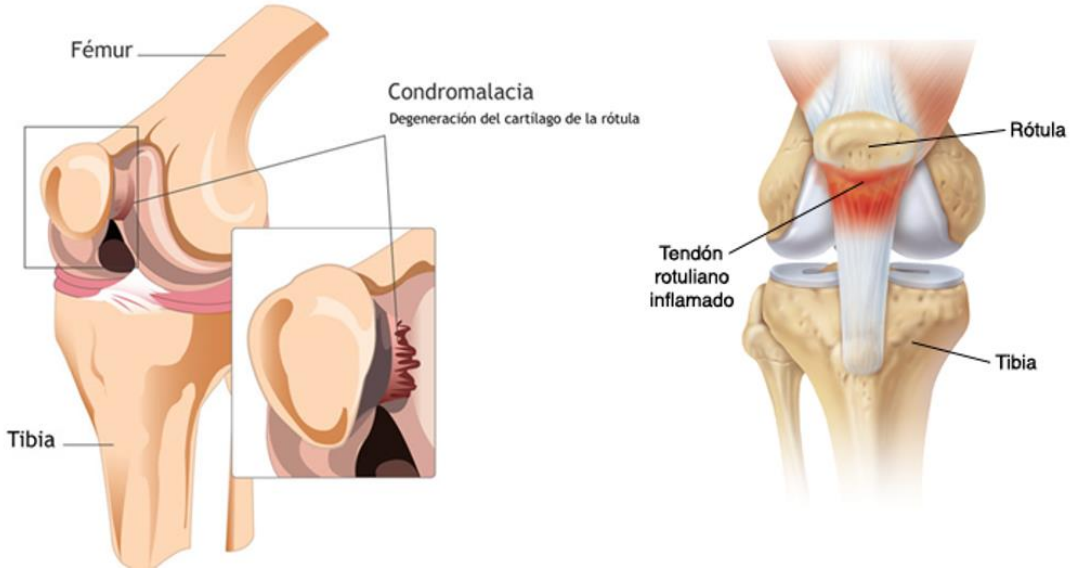


Figura 59. Posibles lesiones en la zona de la rodilla causadas por el mal posicionamiento del sillín

Para un buen posicionamiento del sillín de la bicicleta, se debe medir la distancia que hay desde el suelo hasta la entrepierna del ciclista. Esta distancia obtenida, se multiplica por 0,88 (88% de la distancia medida). El resultado de esta multiplicación es la distancia que tiene que ver desde el eje central de pedalier hasta el punto más alto del sillín. En el siguiente ejemplo se explica con mayor claridad.
Suponiendo que la distancia que se encuentra entre el suelo y la entrepierna del ciclista es de 80 cm.

$$ds = dc \cdot 88\% = 80 \cdot 0{,}88 = 70{,}4\ cm$$

Dónde:
ds: Distancia a la que debe estar el sillín.
dc: Distancia entre el suelo y la entrepierna del ciclista.

En el ejemplo se ha obtenido que la distancia que debe haber entre el eje central del pedalier y el punto más alto del sillín debe ser 70,4 cm. Este posicionamiento se debe realizar como se indica en la imagen inferior.

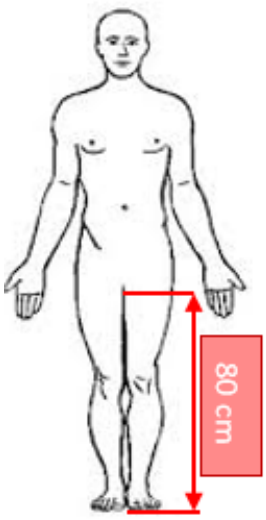


Figura 60. Medida para el posicionamiento del sillín.

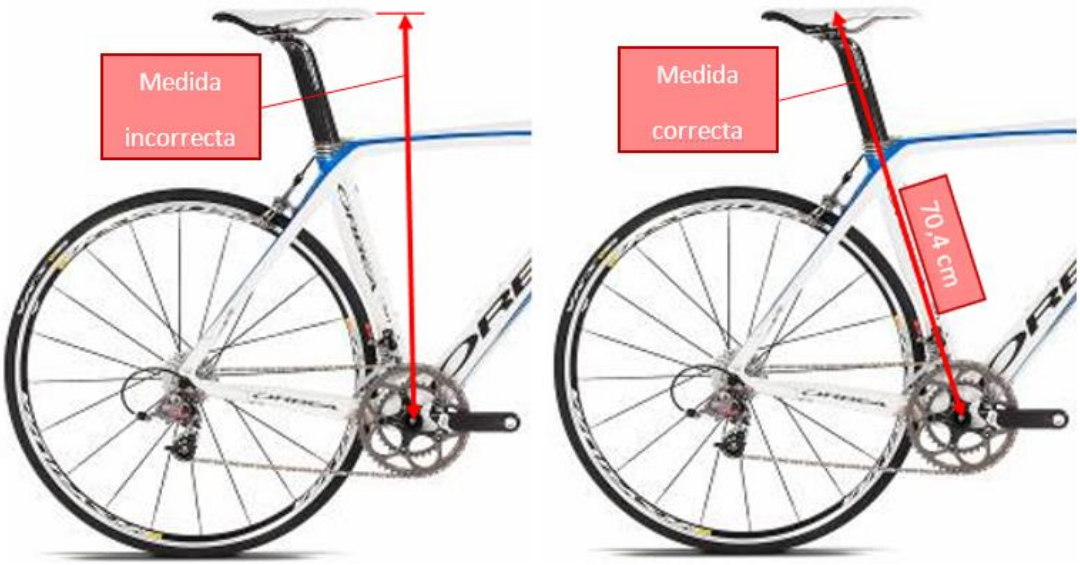


Figura 61. Explicación para el buen posicionamiento del sillín

Una vez la posición del sillín es la correcta, se puede obtener el máximo rango angular que adopta la rodilla. Esta, debe trabajar entre los 150º y los 60º. En la tabla siguiente se muestran diferentes estudios cinemáticos [25] [25] en donde se obtuvieron los ángulos máximos y mínimos que adopta la rodilla en el ciclo del pedaleo.

AUTOR	θ máx.	θ mín.	θ máx. - θ mín.
Nordeen (1977) **	141	68	73
Cavanagh y Sanderson (1986) **	143	69	74
Álvarez (1995). **	133	62	71
Álvarez (1995) *	124	55	69
García *et al* (2001) **	143	70	73
Media ciclistas profesionales **	140±1.8	70±1.4	73±0.5

Tabla 65. Ángulos máximos y mínimos adoptados por la rodilla

En última instancia, otra zona a estudiar, es la parte de la cadera. La posición que adopta esta, depende directamente de cómo esté de inclinado el ciclista, la posición del sillín y la del manillar. Sin embargo, la cadera es la articulación que menos se mueve durante el ciclo del pedaleo. No obstante, es una zona difícil de estudiar y por ello no existen tantos estudios realizados, aunque se debería analizar con más profundidad para saber cómo puede afectar la posición de la cadera en el rendimiento del ciclista.

8.2.1.1.2 *Estudio desde un plano frontal.*

Otra metodología para llevar estudios cinemáticos, es realizarlo desde un plano frontal. Cuando se realiza de esta forma, el experimento varia con respecto al anterior procedimiento. Este segundo caso consiste, en escoger tan sólo tres puntos de las extremidades inferiores del cuerpo (desde la cadera hasta la planta del pie). Se suelen escoger la parte interior de la rodilla, el tobillo y el pedal. Con estos tres puntos se obtienen dos rectas: la primera une los puntos del pedal y el tobillo, y la segunda se traza desde el punto referente al pliegue de la rodilla. De esta forma se obtienen dos ejes separados por una determinada distancia (la cual depende de cada ciclista). El fin de esta vista frontal es estudiar la inclinación que adopta la rodilla con respecto al eje del pedal, cosa bastante importante para no perjudicar al pedaleo.
En esta segunda imagen se observa la segunda metodología (plano frontal).

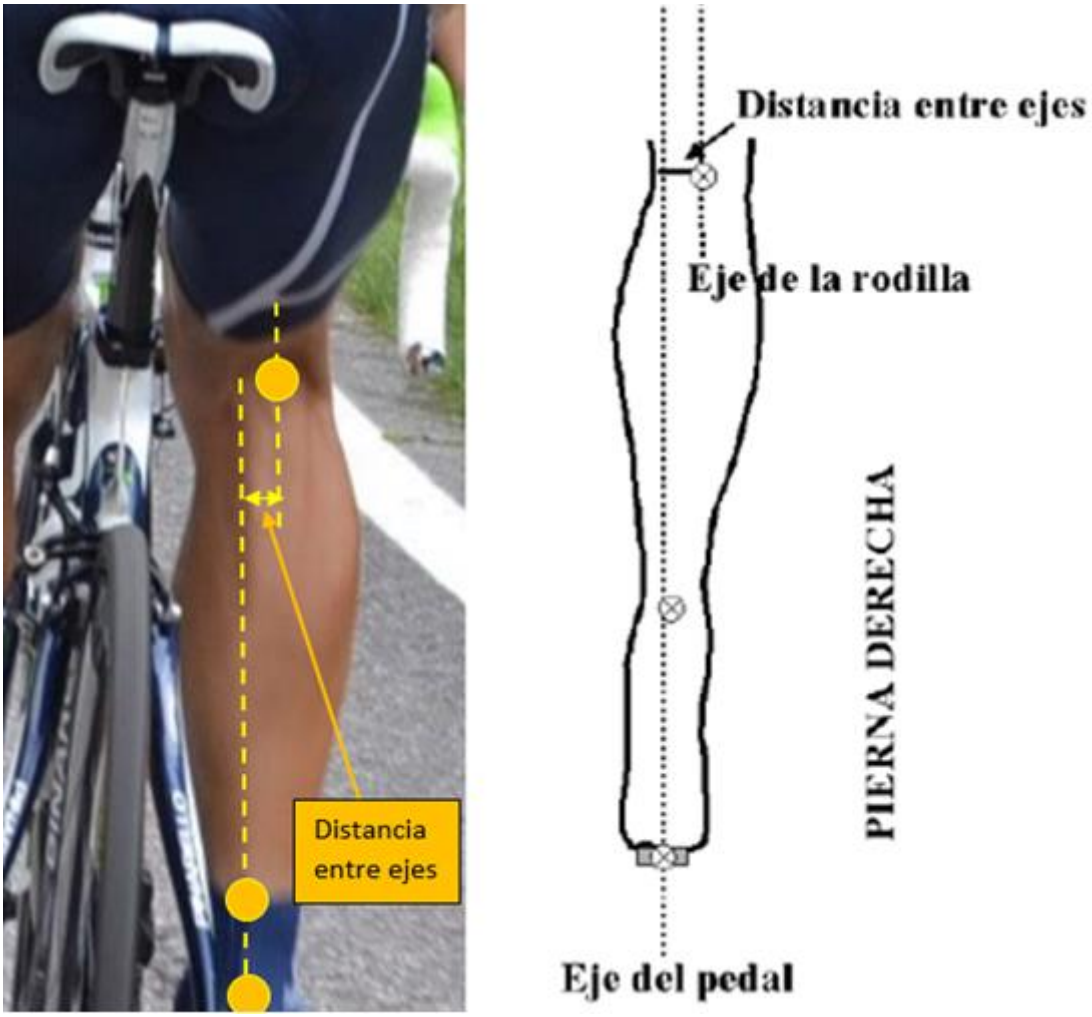


Figura 62. Estudio cinemático de la parte humano desde un plano frontal

8.2.1.2 *Fuerza de pedaleo de pie y sentado.*

Por último en este apartado se va a comentar la fuerza que ejerce un ciclista dependiendo de la posición que adopte.

Cuando se trata de una etapa de puerto de montaña, suelen haber pendientes bastante pronunciadas, difíciles de superar. Con estas fuerzas resistivas (contrarias al movimiento), el ciclista debe hacer más fuerza sobre el pedal. Por ello muchas veces adoptan una posición de pie sobre la bicicleta para que recaiga todo su peso sobre el pedal.

En el siguiente ejemplo se observa con mayor claridad como varia la cinemática de la pierna dependiendo de si el ciclista se encuentra sentado o de pie y cómo se realiza más fuerza en este segundo caso.

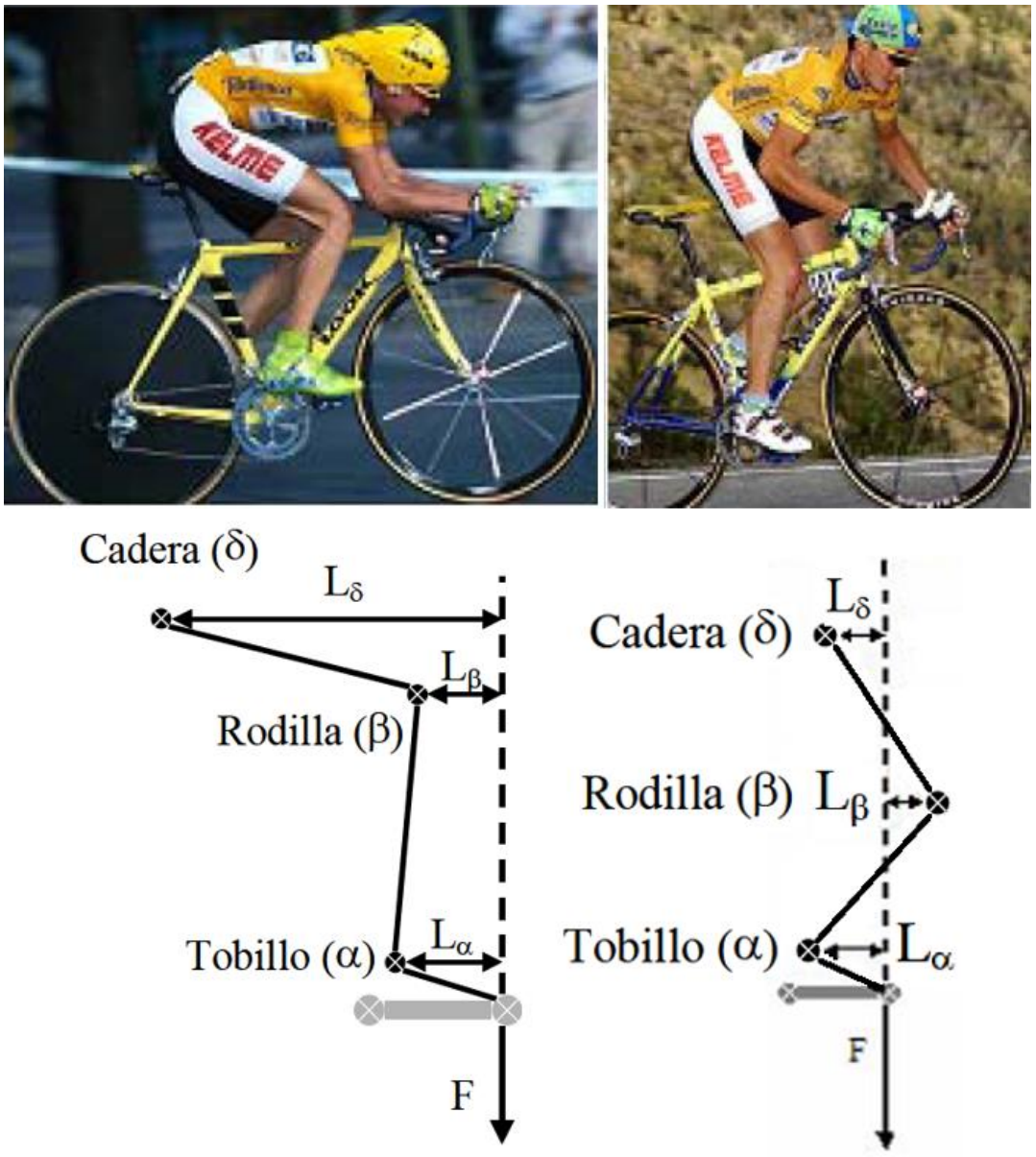


Figura 63. Posiciones que adoptan los ciclistas durante el pedaleo sentado y de pie. Modificación de los valores de fuerza aplicada a los pedales (F) y distancia hasta las articulaciones del tobillo (Lα), rodilla (Lβ) y cadera (Lδ), en el pedaleo sentado (L) y de pie (L').

8.2.1.3 *Nivel de rendimiento.*

En tercer lugar, se debe analizar el nivel de rendimiento de los ciclistas, ya que todos ellos tienen uno u otro estilo de pedalada. Los ciclistas profesionales tienden a tener un pedaleo más redondo en comparación a los amateurs. Esto significa, que éstos últimos, únicamente ejercen fuerza en la fase descendente del pedaleo.
Por el contrario, los profesionales, realizan una pequeña fuerza en la fase ascendente. Esta fuerza ejercida en la fase de arrastre del pedal, es realizada gracias al tipo de pedal que llevan las bicicletas de alta competición.
Tipos de pedales utilizados.
Las bicicletas normales tienen pedales simples, aunque pueden llevar algunos con una superficie dentada antideslizante para que el pie tenga un mejor agarre.

Figura 64. Pedal simple

Por otro lado, las bicicletas de competición han llevado hasta ahora unas piezas llamadas calapiés o rastrales. Estas piezas, ya sean metálicas o de plástico, se atornillan al pedal para que el ciclista deposite la parte delantera del pie en ella. Al estar el pie depositado en este sistema, la pierna tiene un muy buen agarre. De esta forma se puede arrastrar el pedal hacia atrás haciendo una pequeña fuerza ayudando así a realizar un pedaleo más redondo. Algunos rastrales disponen de un sistema de correa que hace que la parte trasera del pie quede sujeta.
En la siguiente imagen se pueden ver dos ejemplos de rastrales utilizados, en la parte izquierda: calapié metálico, fabricado con aluminio para que tengan un menor peso. En la parte derecha: de plástico, bastante simples en cuanto al sistema de agarre en comparación con el primero.

Figura 65. Rastrales metálicos y de plástico

Actualmente, los equipos profesionales de ciclismo, han sustituido los calapiés por pedales automáticos.
Los pedales automáticos son un sistema de pedales y calzado con calas especiales. Las calas se ajustan al pedal de igual forma que se hace con los calapiés; pero sin un sistema de correa para dicho ajuste. Con estos pedales, el pie nunca se separa del pedal y el ciclista puede realizar fuerza de arrastre. Otra ventaja a comentar con respecto a los calapiés, es que los pedales automáticos son muy fáciles de colocar y quitar de forma rápida.

Figura 66. Ejemplos de pedales automáticos

8.2.2 Análisis cinemático del conjunto de la bicicleta.

En este apartado se va a analizar otra variable cinemática como es el caso de la parte mecánica de la bicicleta. La cuál no depende de la persona, sino de las características de las partes que forman la bicicleta.

8.2.2.1 *Longitud de la biela.*

En primer lugar se va a comentar cómo influye la biela al movimiento y avance del sistema.
La biela es la encargada de transmitir la fuerza ejercida en el pedal, al eje central del pedalier. La longitud de esta, es uno de los primeros elementos a delimitar para obtener un mayor rendimiento. Aunque no se ha encontrado la forma exacta de optimizar la fuerza ejercida en el pedal, sí que se sigue la siguiente norma:
La longitud debe ser mayor o menor dependiendo de la altura del ciclista. A más altura, mayor longitud de la biela.
En la siguiente tabla se observa tres baremos de altura del ciclista con las respectivas longitudes de la biela.

Altura ciclista (m)	Longitud Biela (mm)
< 1,68	165
1,68 – 1,80	165
1,80 - 190	172,5

Figura 67. Medidas de la biela según la altura del ciclista.

La longitud de la biela es un factor importante a estudiar ya que a más longitud, se transmitirá más par al eje central del pedalier. Esto se demuestra con la siguiente ecuación:

$$M_{biela} = F_{pierna} \cdot L_{biela}$$

Dónde:

M_{biela}: Momento transmitido al eje del pedalier (N·m).
F_{pierna}: Fuerza ejercida por la pierna en el pedal (N).
L_{biela}: Longitud de la biela (m).

Con el fin de obtener un mayor par, los equipos profesionales empezaron a colocar bielas de mayor tamaño, siguiendo el baremo siguiente:

Altura ciclista (m)	Longitud Biela (mm)
< 1,52	160
1,52 – 1,68	165
1,68 – 1,83	170
1,83 – 1,89	172,5
1,89 – 1,95	175
> 1,95	180

Tabla 66. Longitud biela según la altura del ciclista

No obstante, una mayor dimensión de la biela puede portar aspectos negativos:

- Interferencia en la dirección: Cuando la biela se encuentra en posición horizontal, la punta del pie delantero puede llegar a rozar con la rueda si se gira la dirección. Hecho que puede provocar una caída.

- Trazado de curvas: El giro de la dirección se produce mayormente en el trazado de curvas. En este momento el ciclista tiende a inclinarse hacia el lado interior de la curva, para poder lograr mayor velocidad sin perder el equilibrio. Esta inclinación está limitada por la capacidad de rozamiento del neumático, pero también por la posición del pedal, el cual puede llegar a rozar con el asfalto si la biela es muy larga.

- Capacidad de aceleración: Otro factor negativo es la baja capacidad de aceleración a medida que la longitud de la biela aumenta.

8.2.2.2 *Cadencia óptima de pedaleo.*

En segundo lugar, se va a comentar otro de los parámetros más estudiados en el ciclismo: la velocidad de pedaleo a la que gira la biela. Esta velocidad es llamada cadencia.
Cuando se hace referencia a este factor, se está hablando de la puesta en marcha del pedaleo. Se considera que la velocidad angular en un mismo ciclo es constante. Es decir, no hay un gran cambio de velocidad en el tramo en que la biela recorre los 360°.
Según el estudio realizado por Burke [26], la cadencia puede variar entre dos ciclos consecutivos, pero aun así, se considera despreciable. En el siguiente ejemplo se muestra la poca variación de cadencia de cuatro ciclos consecutivos.

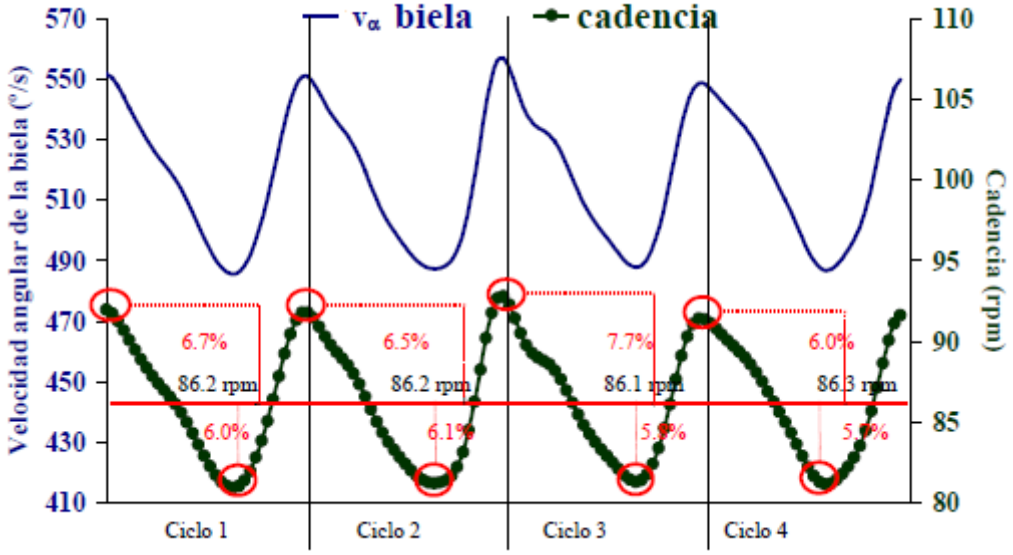


Tabla 67. Velocidad angular de la biela y cadencia del pedaleo en 4 ciclos de pedaleo a 86.2 rpm.

Durante los dos primeros ciclos se está trabajando a 86,2 rpm. En el tercer y cuarto ciclo existe una pequeña variación de tan solo 0,1 rpm. Es por ello que se considera que en estos cuatro ciclos ha habido una velocidad angular constante.
Por otro lado, durante una carrera los ciclistas sí que alteran su cadencia, ya sea por un cambio en la intensidad de pedaleo o por la relación de transmisión que se utilice.

Actualmente existen diferentes medidores de cadencia con el fin de ejecutar entrenamientos lo más óptimos posible. Gracias a estos medidores, el ciclista puede controlar su intensidad en la pedalada en todo momento.

Durante una carrera, los ciclistas suelen ir a una cadencia de entre 90 y 110 rpm cuando se trata de una etapa en llano (como puede ser una contrarreloj). Cuando se trata de una etapa de puerto de montaña, los ciclistas bajan su cadencia a unas 70 – 75 rpm, ya que no son capaces de mantener una velocidad tan alta cuando se están subiendo pendientes pronunciadas. En estas etapas, los ciclistas deben hacer más fuerza en el pedal para poder subir y seguir avanzando. Con este objetivo, en gran parte de la carrera suelen pedalear de pie, y de este modo hacer mucha más fuerza ya que recae sobre el pedal todo el peso del ciclista.

La velocidad del pedaleo ha sido uno de los parámetros más estudiados, ya que uno de los objetivos principales del ciclismo es llegar a conocer la cadencia ideal a la que debe pedalear el ciclista. Según diferentes estudios realizados anteriormente, se ha comprobado que existe una cadencia ideal para cada potencia, las cuales son proporcionales entre sí. Si se quiere obtener una mayor potencia de pedaleo, se debe pedalear a una mayor cadencia (la cual será la óptima para este segundo caso).

En el siguiente gráfico se muestran diferentes curvas de potencia, las cuáles vienen en función del par y la cadencia ejercidos por el ciclista; como se indica en la siguiente fórmula:

$$P = M \cdot w$$

Dónde:

P: Potencia (W).
M: Momento ejercido (N·m).
w: Velocidad angular (rad/s).

Según diversos estudios como los realizados por Faria o Coast y Welch, se estima que la cadencia ideal para una potencia de 200 W es de entre 60 – 65 rpm.

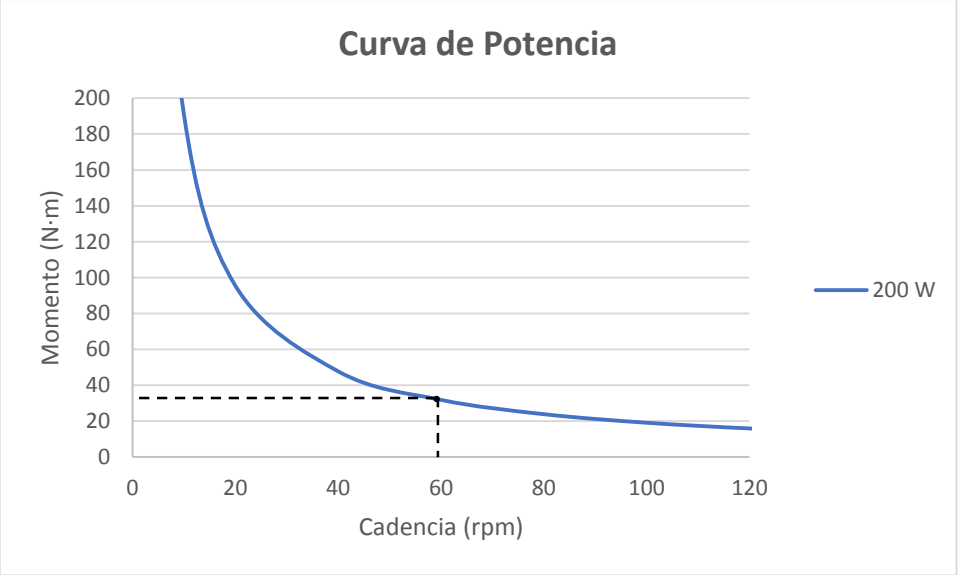


Tabla 68. Cadencia ideal para una potencia de 200 W

Cuando se está pedaleando a una cadencia de 60 rpm y la potencia que se quiere conseguir es de 450 W, se está realizando un par de 71,619 N·m. Si lo que se quiere es llegar a una potencia superior de 600 W se debe pedalear a una cadencia de 80 rpm. Y en el caso de obtener una potencia de 750 W se pedalea a 100 rpm.

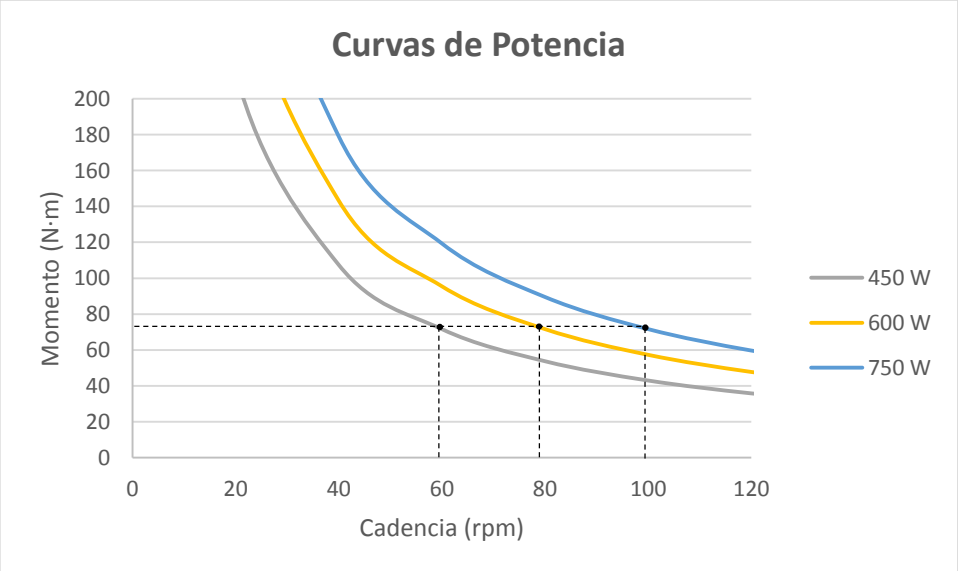


Tabla 69. Variación de la cadencia según la potencia que se quiera conseguir

8.3 Variables cinéticas existentes en el ciclismo.

En el ciclismo hay diferentes variables cinemáticas que intervienen en el pedaleo y hacen referencia a las fuerzas generadas. En este aparatado se explicará cómo es la fuerza que genera el ciclista en los pedales y cómo afecta al pedaleo.

8.3.1 Fuerzas aplicadas a los pedales

Las fuerzas aplicadas a los pedales son un foco de investigación biomecánica por la importancia que tiene. Se debe tener en cuenta que la fuerza que genera el ciclista es la única fuerza propulsiva que hay dentro del sistema para hacer avanzar a la bicicleta. Por lo tanto, su estudio y entendimiento es necesario para poder maximizar todo lo posible su potencia y efectos.
Para obtener las fuerzas aplicadas al pedal se utilizan sensores piezoeléctricos ya que son capaces de registrar las fuerzas de forma rápida y precisa. Estos sensores son capaces de detectar las fuerzas en los tres ejes, Fx, Fy y Fz. Sin embargo, una manera de simplificar el análisis es cuantificar sólo las fuerzas verticales, Fz, y horizontales, Fx, aplicadas al pedal, despreciando las laterales, Fy.

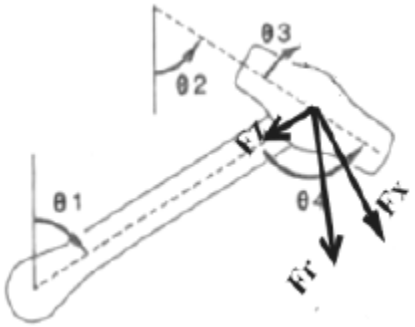


Tabla 70. Fuerzas normales (Fz), tangenciales o efectivas (Fx) y resultantes (Fr) aplicadas al pedal y a la biela.

Estas fuerzas verticales y horizontales aplicadas al pedal deben ser transformadas en fuerzas resultantes, Fr, verticales y horizontales aplicadas en la biela. Estas fuerzas horizontales suelen denominarse como fuerzas efectivas o tangenciales, ya que forman un ángulo de 90º con la biela, y son las fuerzas que finalmente más importan ya que son las que hacen avanzar directamente la bicicleta [25] [36] [37].

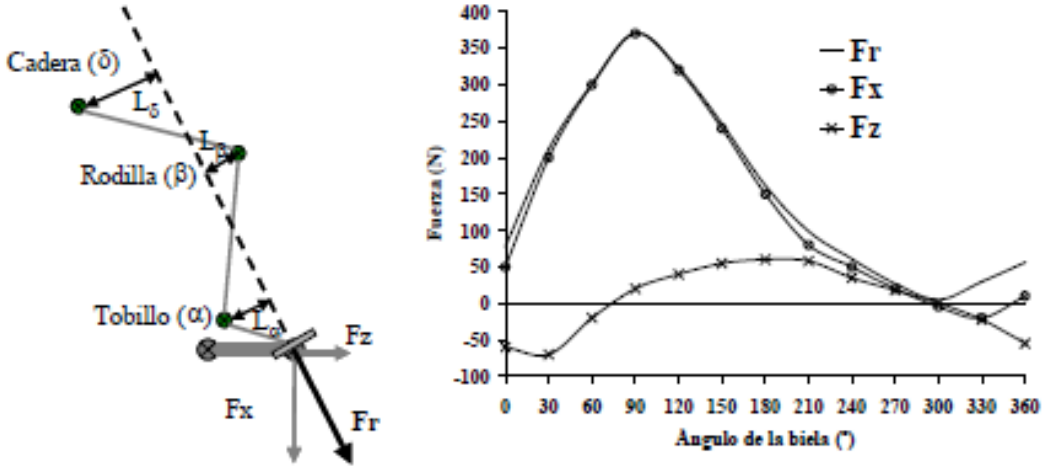


Figura 68.Inclinación del pedal y fuerzas generadas en la biela. Derecha: Fuerzas normal (Fz), tangencial o efectiva (Fx), y resultante (Fr) aplicadas a la biela.

En el análisis de la fuerza tangencial o efectiva aplicada a la biela, se identifica un impulso positivo (IP) que contribuye a la propulsión y un impulso negativo (IN) que disminuye la misma; ambas variables determinan el rendimiento mecánico del pedaleo. Por lo tanto, la fuerza tangencial o efectiva aplicada a la biela es la única variable sensible al nivel de práctica de los ciclistas. Para una misma potencia de pedaleo, los ciclistas profesionales, al contrario de los que hacen los amateurs, retrasan la aparición del impulso negativo a partir del punto muerto inferior (a partir de los 180º), y adelantan la aparición del impulso positivo antes del punto muerto superior (antes de los 360º). Este efecto se muestra a continuación [37]:

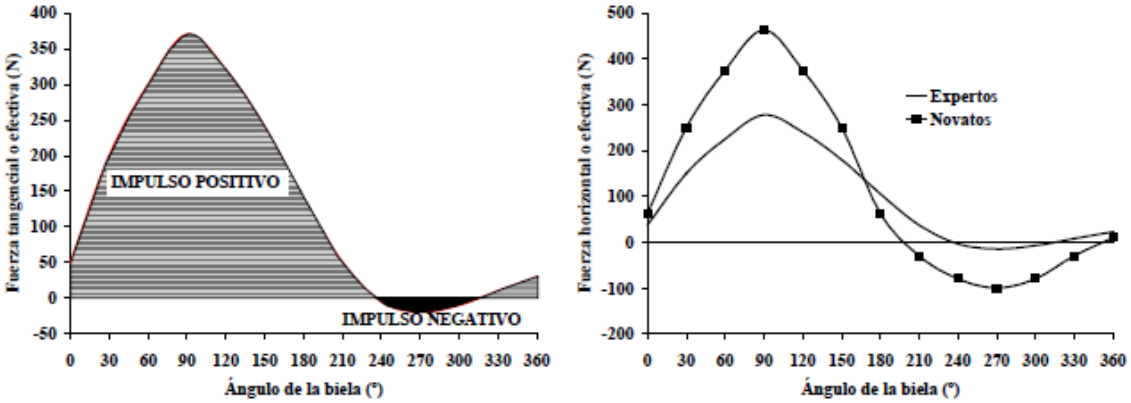


Figura 69. Impulsos positivo y negativo de fuerza efectiva a lo largo de un ciclo de pedaleo. Derecha: Diferencias en la fuerza efectiva aplicada por ciclistas profesional y amateurs para una misma potencia de pedaleo.

Hasta ahora solo se ha mostrado el trabajo de una sola pierna pero, hay que tener en cuenta que durante el pedaleo intervienen las dos piernas y siempre existe una de las dos con peor rendimiento. Este acontecimiento es mucho más notorio en ciclistas amateurs, donde una de las piernas aplica menos fuerza y, además, desfasada unos grados con respecto a la otra pierna, que en ciclistas profesionales, en los que esta diferencia es muy poca. Por lo tanto, el aporte entre las dos piernas tiene una pequeña variación en las entregas.

9 Cálculo del sistema mecánico de la bicicleta convencional.

9.1 Objetivo del estudio mecánico.

El estudio que se va a desarrollar a continuación, nos permite entender, analizar y relacionar los diferentes parámetros que intervienen en el funcionamiento de una bicicleta convencional.

9.2 Parámetros de entrada.

Como parámetros de entrada existen diferentes factores a tener en cuenta. Los únicos valores que permanecen fijos durante todo el estudio son la longitud de la biela y el radio de la rueda, los cuales son los siguientes:

- Longitud Biela (m): 0,1725
- Radio Rueda (m): 0,33

Por otro lado existen otros factores variables como son el caso de la fuerza, la cadencia y el juego de engranajes, explicados a continuación.

9.2.1 Fuerza

Se ha considerado la fuerza como parámetro de entrada ya que fue el primer dato obtenido en este estudio. A raíz de saber las fuerzas que ejercían tanto los ciclistas amateurs como los profesionales se ha podido desarrollar y complementar este estudio con más profundidad.

9.2.2 Cadencia

En el ciclismo, uno de los factores más importantes es la cadencia a la cual trabaja el ciclista. Dependiendo de este parámetro la bicicleta irá a una determinada velocidad y desarrollará una potencia u otra. A lo largo de una carrera, es un factor que varía según la etapa en la que se encuentre el deportista. Cuando se trata de tramos llanos, se trabaja a una cadencia mucho mayor que cuando se está en subida en una etapa de escalada.

9.2.3 Juego de engranajes

Por último destacar el juego de engranajes que tiene la bicicleta. Existen muchos modelos de bicicleta y cada uno de ellas utiliza unos determinados platos y piñones con diferentes características.

En este proyecto se ha hecho la simulación de la bicicleta utilizando una relación comprendida por tres platos y diez piñones, tomando ejemplos del mercado actual.
En la siguiente tabla se puede ver las características de cada uno de ellos.

PLATOS		PIÑONES	
Z: Nº de dientes	ø: Diámetro (mm)	Z: Nº de dientes	ø: Diámetro (mm)
53	159	29	87
39	117	27	81
30	90	25	75
		23	69
		21	63
		19	57
		17	51
		15	45
		13	39
		11	33

Tabla 71. Características de los platos y dientes utilizados

Dependiendo de qué plato y piñón se esté utilizando, se obtiene una u otra relación de transmisión [41]. En el caso de que se esté utilizando con el plato grande y el piñón pequeño se obtiene una relación de transmisión de 4,8181.

$$rt = \frac{Z1}{Z2} = \frac{53}{11} = 4{,}8181$$

En cambio si utilizamos el plato pequeño y el piñón grande, se obtiene una relación de transmisión de 1,0344.

$$rt = \frac{Z1}{Z2} = \frac{30}{29} = 1{,}0344$$

9.3 Estudio de fuerzas ejercida por los ciclistas en el pedaleo.

Después de comentar los parámetros de entrada se ha procedido a hacer el estudio mecánico de la bicicleta.

9.3.1 Fuerzas ejercidas en el pedal.

Primeramente se ha procedido a realizar un estudio con el fin de obtener las fuerzas que ejercen los ciclistas en los diferentes puntos del ciclo del pedaleo. Obviamente no se ejerce la misma fuerza siempre; por ello se han extraído todas las fuerzas que hace el ciclista en todos los puntos del ciclo, desde que el pedal se encuentra en la posición de 0º hasta los 359º.

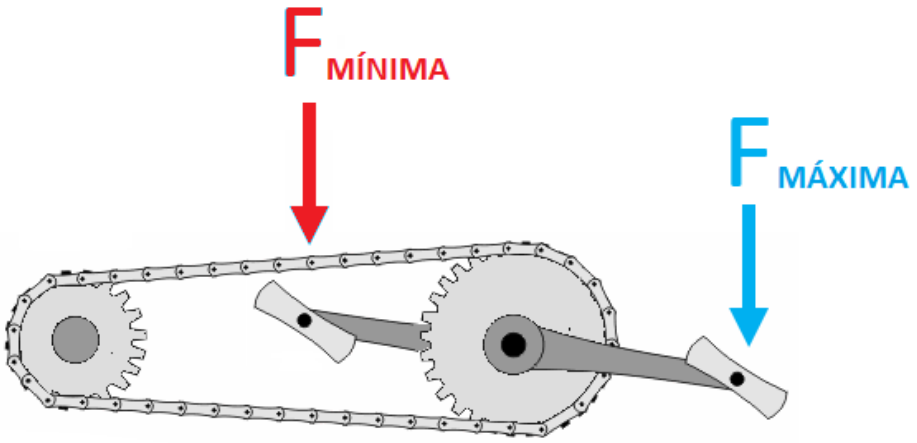


Figura 70. Fuerza máxima y mínima ejercidas en el pedal

En las siguientes tablas se muestra las fuerzas máximas, mínimas y medias que realizan los ciclistas amateurs en comparación a los profesionales.
En la primera tabla se obtienen estas fuerzas teniendo en cuenta tan solo una pierna.

Fuerza de 1 pierna	AMATEUR	PROFESIONAL
Fuerza máxima (N)	461.66	276.95
Fuerza mínimo (N)	-100.00	-16.76
Fuerza media (N)	127.64	102.95

Tabla 72. Fuerza máxima y mínima en el pedal con una sola pierna

Obviamente, las piernas se encuentran siempre en posición opuesta. Es decir, cuando un pedal está en la posición de máxima potencia, el otro pedal se encuentra en la de menor rendimiento. Si se mostrase la tabla de fuerzas de la otra pierna, se obtendrían los mismos valores.
En el momento en que la pierna derecha alcanza su máxima fuerza está situada aproximadamente en los 90º. Mientras que la izquierda se encuentra en los 270º realizando una fuerza negativa de 100 N. Al realizar la suma de fuerzas se obtiene la fuerza total que realiza el ciclista teniendo en cuenta las dos piernas.

$$Amateurs\colon\ F_T = F_{máx} + F_{min} = 461.66 + (-100.00) = 361.66\ N$$

$$Profesionales\colon\ F_T = F_{máx} + F_{min} = 276.94 + (-16.74) = 260.2\ N$$

Fuerza de 2 piernas	AMATEUR	PROFESIONAL
Fuerza máxima (N)	361.66	260.2
Fuerza mínimo (N)	119.24	134.53
Fuerza media (N)	255.26	205.72

Tabla 73. Fuerza máxima y mínima en el pedal con las dos piernas

A continuación se muestra una gráfica, obtenida con todos los valores de la fuerza realizada con cada pierna en todos los grados del ciclo. Se muestra los valores de la fuerza de la pierna izquierda, de la derecha y la suma de ambas. El sumatorio de estas fuerzas da un resultado claramente positivo, si esto no ocurriese no sería posible el avance de la bicicleta.

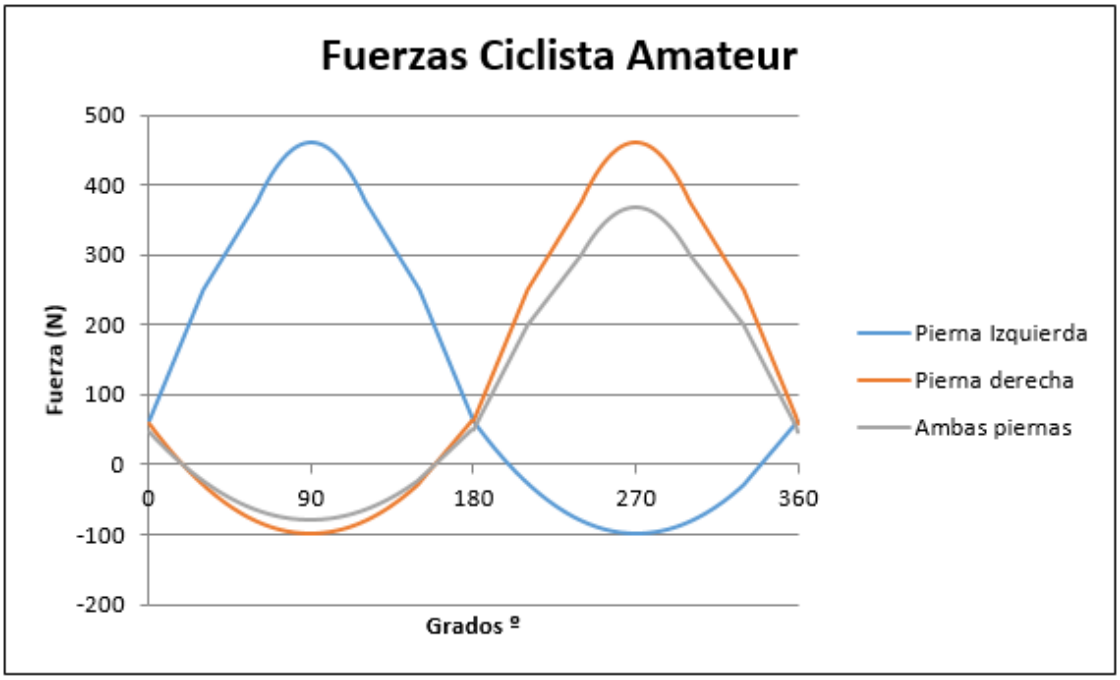


Figura 71. Fuerzas ejercidas por ciclista Amateur

Como se puede observar la fuerza total tiene su máximo en el mismo punto, el cual también corresponde a la fuerza máxima de una de las dos piernas. El valor mínimo total tiene valor positivo, ya que la pierna que se encuentra en la fase descendente ejerce siempre más fuerza que la pierna opuesta la cual se encuentra en la fase ascendente. Este valor mínimo tiene lugar cada 180 º que es el cambio de trayectoria de los pedales.

9.3.1.1 *Comparativa de las fuerzas aplicadas al pedaleo entre ciclistas amateurs y profesionales.*

En este apartado se quiere hacer una comparación entre los ciclistas amateurs y profesionales en cuanto a la fuerza que ejercen a la hora de pedalear. En la gráfica siguiente se observa la diferencia de la fuerza total resultante de las dos piernas entre amateurs y profesionales.

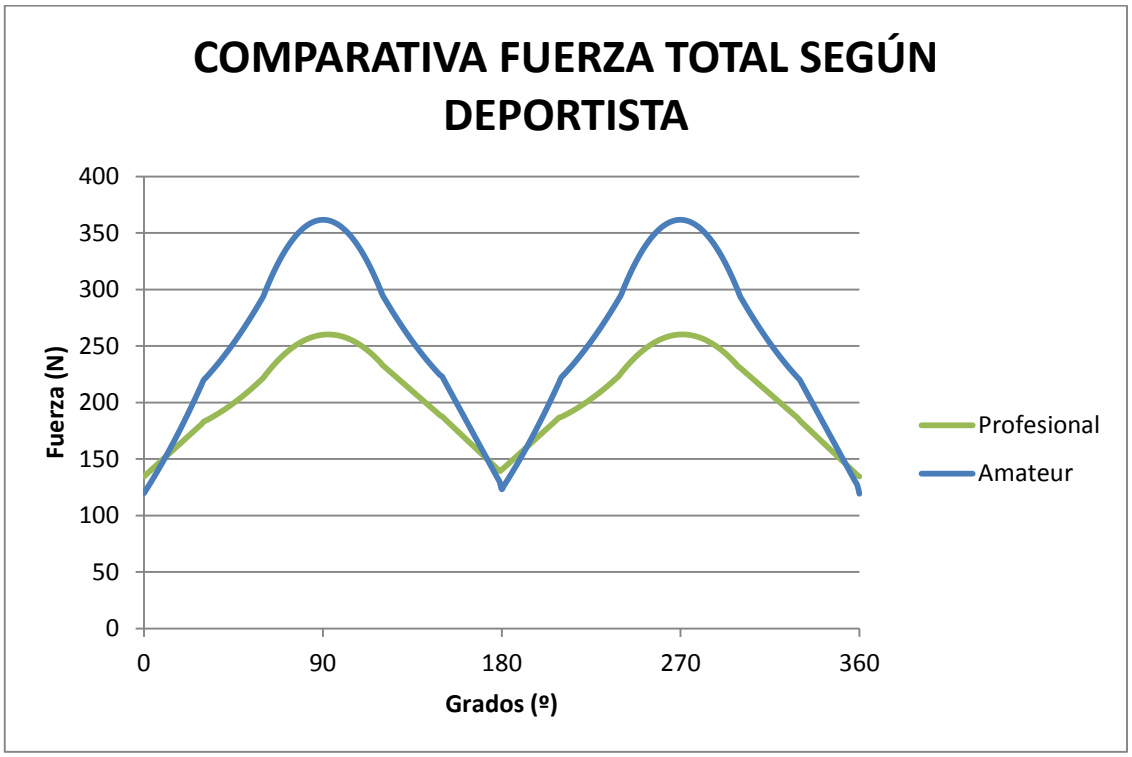


Figura 72. Comparativa fuerza total según deportista

La gráfica muestra los valores de fuerza ejercidos por los ciclistas profesionales y amateurs. Los valores máximos de fuerza tienen lugar en el mismo punto. Destacando que los deportistas amateurs consiguen un pico mucho más alto que los profesionales. Por el contrario, son también los amateurs los que tienden a obtener los valores inferiores. De esta forma, se mueven en un mayor rango de trabajo. Son más inestables. Referente a los profesionales, se mueven en un rango de trabajo menor, mucho más regular, ya que son más constantes y de esta forma se podría decir que realizan una mejor entrega de fuerza.

9.3.1.2 *Variación de la fuerza según el rendimiento de cada pierna.*

Los valores mostrados en el punto anterior han sido obtenidos considerando que las dos piernas actúan con la misma fuerza, pero se podría estimar que una persona hiciese más fuerza con la pierna derecha que con la izquierda, por ejemplo. En ese caso, se tendría que multiplicar la fuerza de una de las piernas por una ganancia.
Suponiendo que un ciclista amateur, con la pierna izquierda haga tan solo el 80% de la fuerza total que hace con la pierna derecha, obtendríamos los siguientes datos:

$$Fmáx_{pierna\ izq.} = 0.8 \cdot F_{pierna\ derecha} = 0.8 \cdot 461.66 = 369.328\ N$$

$$Fmín_{pierna\ izq.} = 0.8 \cdot F_{pierna\ derecha} = 0.8 \cdot (-100.00) = -80.00\ N$$

$$Fmed_{pierna\ izq.} = 0.8 \cdot F_{pierna\ derecha} = 0.8 \cdot 127.64 = 102.11\ N$$

VARIACIÓN EN LA FUERZA DE CADA PIERNA	PIERNA DERECHA (100%)	PIERNA IZQUIERDA (80%)
Fuerza máxima (N)	461.66	369.33
Fuerza mínimo (N)	-100.00	-80.00
Fuerza media (N)	127.64	102.11

Tabla 74. Variación de la fuerza ejercida según su rendimiento

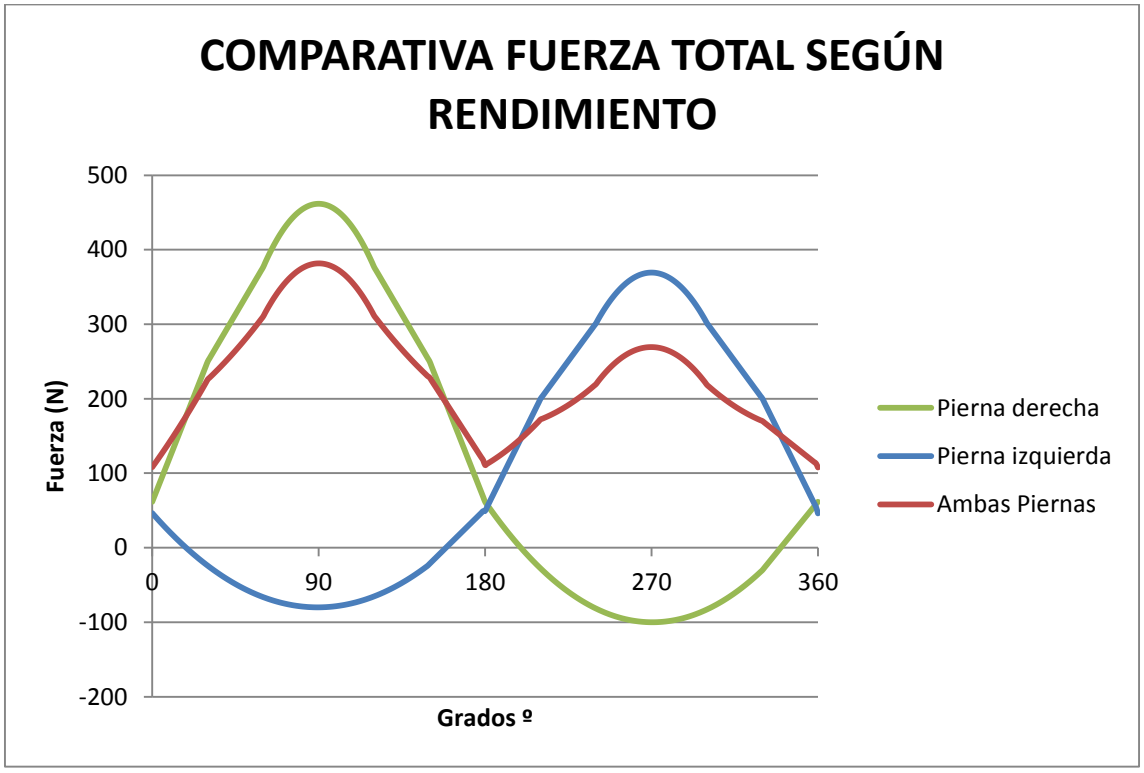


Figura 73. Comparativa de la fuerza total según el rendimiento de cada pierna

En la gráfica se puede apreciar que la fuerza que ejerce la pierna derecha es superior a la de la izquierda y por ello el sumatorio de estas varía según la posición de los pedales. Por lo que se refiere a los valores de las fuerzas obtenidos de cada pierna, los valores correspondientes a la pierna derecha no varía con respecto a la explicación en el punto anterior. Referente a la pierna izquierda, la fuerza correspondiente a esta, varía llegando a un máximo de 369.328 N y un mínimo de -80.00N de fuerza.

Con estos resultados la fuerza total resultante varía según la posición en la que se encuentre el sistema de pedaleo. Cuando la pierna derecha se encuentra en la fase descendente del ciclo, se llega a obtener 381.66N. En cambio cuando es la pierna izquierda la que se encuentra en esta posición la fuerza total es menor, 269.33N.

	POSICIÓN EN EL CICLO DE PEDALEO	
	Pierna derecha: 90º Pierna izquierda: 270º	Pierna derecha: 270º Pierna izquierda: 90º
Fuerza pierna derecha (N)	461.66	-100.00
Fuerza pierna izquierda (N)	-80.00	369.33
FUERZA TOTAL (N) 2 PIERNAS	381.66	269.33

Tabla 75. Comparación de la fuerza total según rendimiento y según la posición de cada una de ellas

En el caso de los ciclistas profesionales, esta variación en la fuerza de cada pierna al pedalear varía mínimamente, llegando a ser casi iguales. Esto es así ya que se trata de deportistas de élite, los cuales entrenan diferentes técnicas para que este factor no ocurra.

9.3.2 Par obtenido en la biela.

Como consecuencia de la fuerza ejercida por los ciclistas en los pedales, obtenemos un determinado momento a medida que gira la biela de la bicicleta. Este par varía según la fuerza ejercida en cada momento.

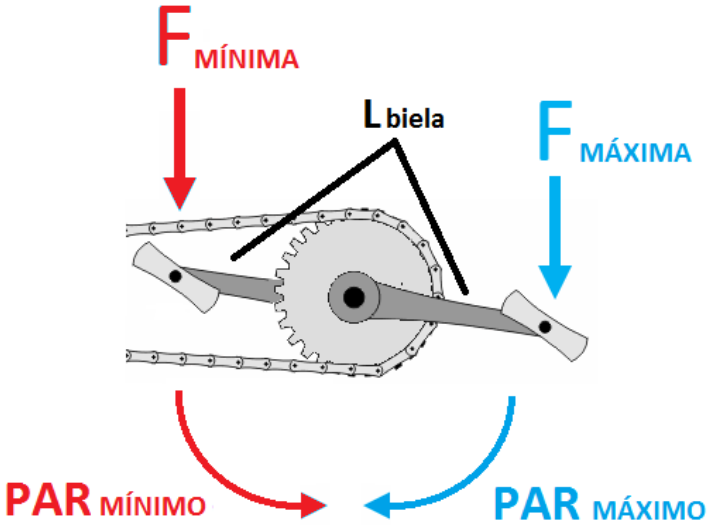


Figura 74. Fuerzas y momentos aplicados a la biela

Este par se calcula multiplicando la fuerza realizada por la longitud de la biela de la bicicleta. En el caso de la bicicleta estudiada la longitud de la biela es de 17.25cm (0.1725m).

$$M_{biela} = F_{1pierna} \cdot L_{biela}$$

En el momento que el ciclista empieza a pedalear, (cuando el pedal se sitúa en los cero grados) se obtiene un par de 10.637501 N·m (teniendo en cuenta la fuerza de una de las piernas).

$$M_{biela} = F_{1pierna} \cdot L_{biela} = 61.66666667 \cdot 0.1725 = 10.6375N \cdot m$$

Con la otra pierna se ejerce un par de valor diferente:

$$M_{biela} = F_{2pierna} \cdot L_{biela} = 58.1101091 \cdot 0.1725 = 10.02399382\ N \cdot m$$

El par total realizado es la suma de los anteriores:

$$M_{biela} = 10.6375 + 10.023994382 = 20.66149438\ N \cdot m$$

El par máximo obtenido, obviamente, coincide con el momento en que el ciclista ejerce la máxima fuerza. Cuando el pedal se sitúa en la posición de 90º, la fuerza máxima de un ciclista amateur es de 461.66379 N. Con los que se obtiene un par en la biela de 79.637004 N·m.

$$M_{biela} = F_{1pierna} \cdot L_{biela} = 461.66379 \cdot 0.1725 = 79.63700378N \cdot m$$

La otra pierna situada en lado opuesta ejerce una fuerza negativa de 100 N. Por lo que se obtiene un par de:

$$M_{biela} = F_{2pierna} \cdot L_{biela} = -100.0017829 \cdot 0.1725 = -17.25030755N \cdot m$$

El par total máximo realizado es de:

$$M_{biela} = 79.63700378 + (-17.25030755) = 62.38669623\ N \cdot m$$

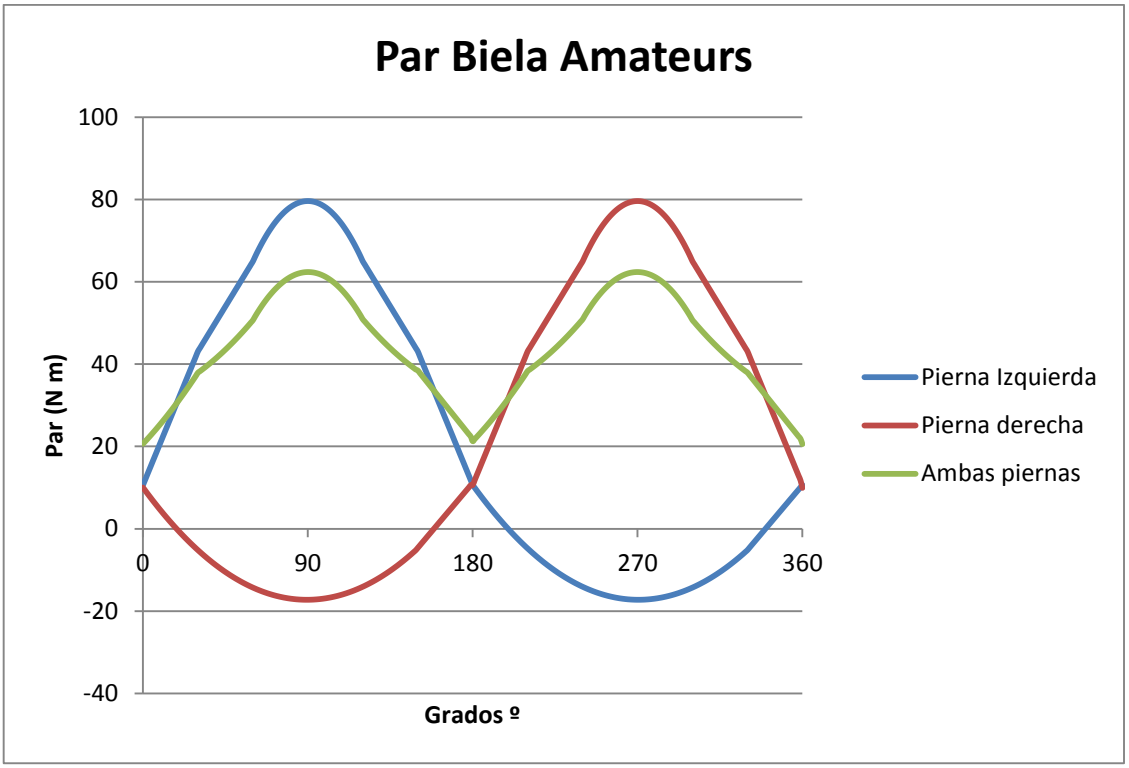


Figura 75. Par realizado en la biela

La gráfica sigue la misma distribución que la gráfica de fuerzas ya que hay una relación directa. Los valores varían ya que están multiplicados por la longitud de la biela.

9.3.3 Fuerza y par transmitidos al plato.

A continuación se quiere obtener la fuerza y el par que llega al plato de la bicicleta.

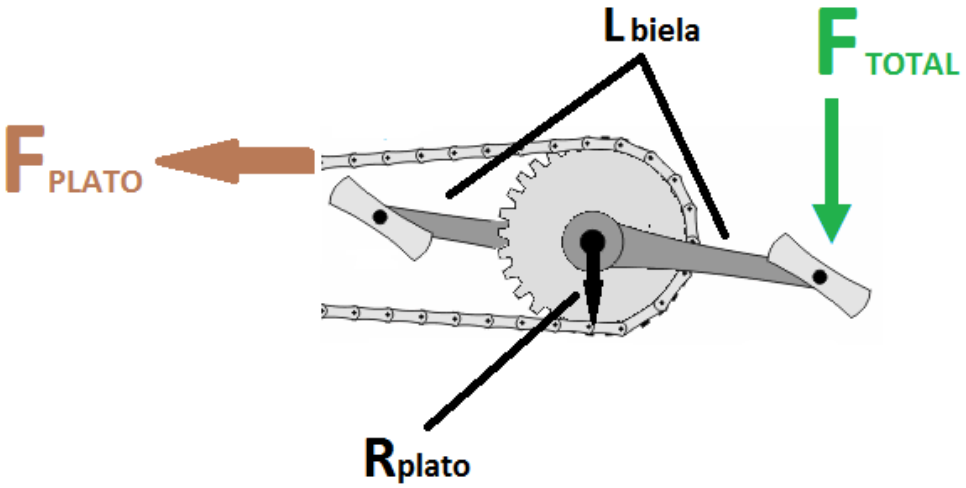


Figura 76. Fuerza aplicada al plato

La fórmula para poder calcular la fuerza en el plato es la siguiente:

$$F_{pierna_{plato}} = \left(\frac{F_{pierna} \cdot L_{biela}}{R_{plato}}\right)$$

Donde:

F_{pierna}: la fuerza ejercida en el pedal (N).
R_{plato}: el radio del plato (m).

Los cálculos realizados son los siguientes:

$$F_{1ªpierna_{plato}} = \left(\frac{F_{1ªpierna} \cdot L_{biela}}{R_{plato}}\right) = \left(\frac{461{,}66379 \cdot 0.1725}{0.0795}\right) = 1001.723318\ N$$

$$F_{2ªpierna_{plato}} = \left(\frac{F_{2ªpierna} \cdot L_{biela}}{R_{plato}}\right) = \left(\frac{-100.0017829 \cdot 0.1725}{0.0795}\right) = \\ = -216.9850006\ N$$

$$F_{Total_{plato}} = F_{1ªpierna_{plato}} + F_{2ªpierna_{plato}} = 1001.723318 + (-216.9850006\ ) = \\ = 784.7383174\ N$$

Para poder calcular el par obtenido en el plato se ha utilizado la siguiente formula:

$$M_{plato} = F_{plato} \cdot R_{plato}$$

$$M_{1ªpierna_{plato}} = F_{1ªpierna_{plato}} \cdot R_{plato} = 1001.723318 \cdot 0.0795 = \\ = 79.63700378\ N \cdot m$$

$$M_{2ªpierna_{plato}} = F_{2ªpierna_{plato}} \cdot R_{plato} = -216.9850006\ \cdot 0.0795 = \\ = -17.25030755\ N \cdot m$$

$$M_{Total_{plato}} = F_{1ªpierna_{plato}} + F_{2ªpierna_{plato}} = 62.38669623\ N \cdot m$$

Aunque se ha calculado el par realizado en el plato, multiplicando la fuerza y el radio de este, no sería necesario hacerlo, ya que el par es el mismo en el plato que en la biela (calculado anteriormente). Estos cálculos se han realizado a modo de comprobación.

9.3.4 Fuerza y par transmitida al piñón.

Una vez obtenidos los valores de fuerza y par ejercidos en el plato de la bicicleta, se ha procedido a calcular estos mismos factores en el piñón.

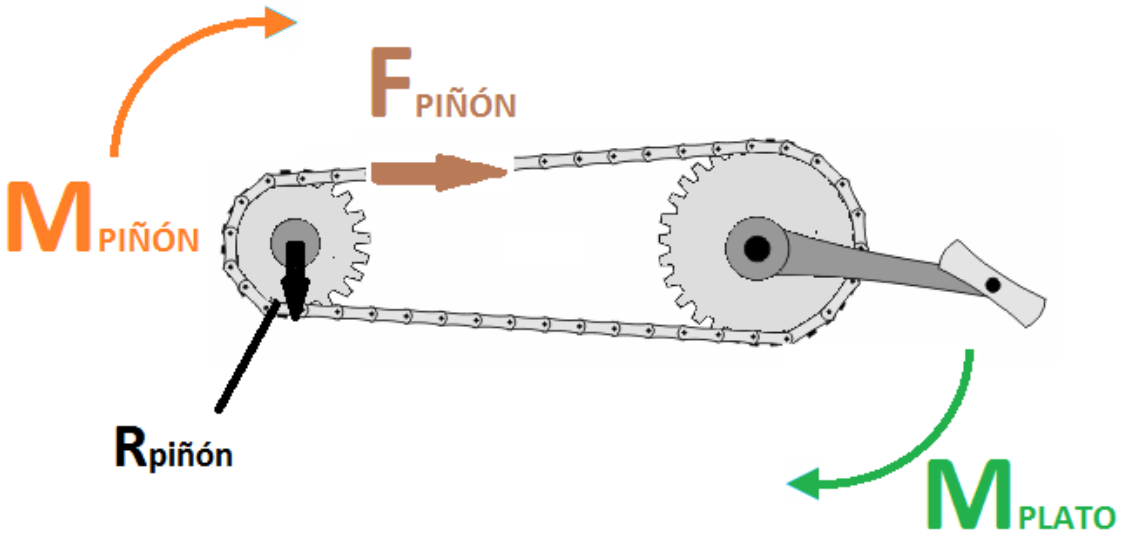


Figura 77. Fuerza y par transmitidos al piñón

Dependiendo de si se tiene una relación de transmisión u otra, la fuerza y el momento transmitidos al piñón son de diferente valor. Como ejemplo se ha escogido trabajar con el plato grande (53 dientes) y con el piñón grande (29 dientes).
La relación de transmisión es la siguiente:

$$rt = \frac{Z1}{Z2} = \frac{53}{29} = 1{,}827586207$$

Las fórmulas para poder calcular estos valores son las siguientes:

$$M_{piñón} = \frac{M_{plato}}{rt}$$

$$M_{1ªpierna_{piñón}} = \frac{M_{1ªpierna_{plato}}}{rt} = \frac{79.63700378}{1.827586207} = 43.57496433\ N \cdot m$$

$$M_{2ªpierna_{piñón}} = \frac{M_{2ªpierna_{plato}}}{rt} = \frac{-17.25030755}{1.827586207} = -9.438847527\ N \cdot m$$

$$M_{Total_{piñón}} = M_{1ªpierna_{piñón}} + M_{2ªpierna_{piñón}} = 43.57496433 + (-9.438847527\ ) = \\ = 34.1361168\ N \cdot m$$

Por lo que se refiere a la fuerza ejercida en el piñón se puede calcular simplemente aplicando la siguiente fórmula:

$$F_{piñón} = \frac{M_{Total_{piñón}}}{R_{piñón}}$$

En las siguientes gráficas se muestra el resultado del momento total de las dos piernas obtenido en el piñón utilizando diferentes relaciones de transmisión.

En el primer caso se ha mantenido el mismo plato (plato mediano: 39 dientes) y se ha variado el piñón utilizado (piñón1: 27 dientes; piñón2: 19 dientes; piñón3: 11dientes).

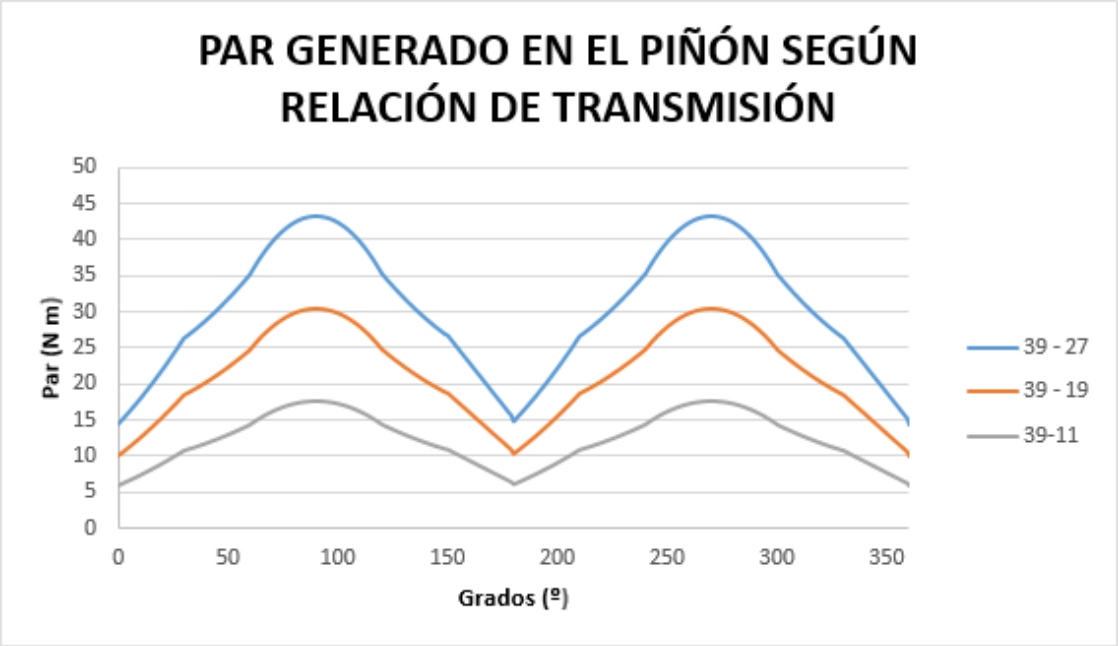


Figura 78. Par generado en el piñón según la relación de transmisión

En esta segunda gráfica se ha realizado el caso contrario: se ha mantenido el mismo piñón y se ha variado el plato en la relación de transmisión.

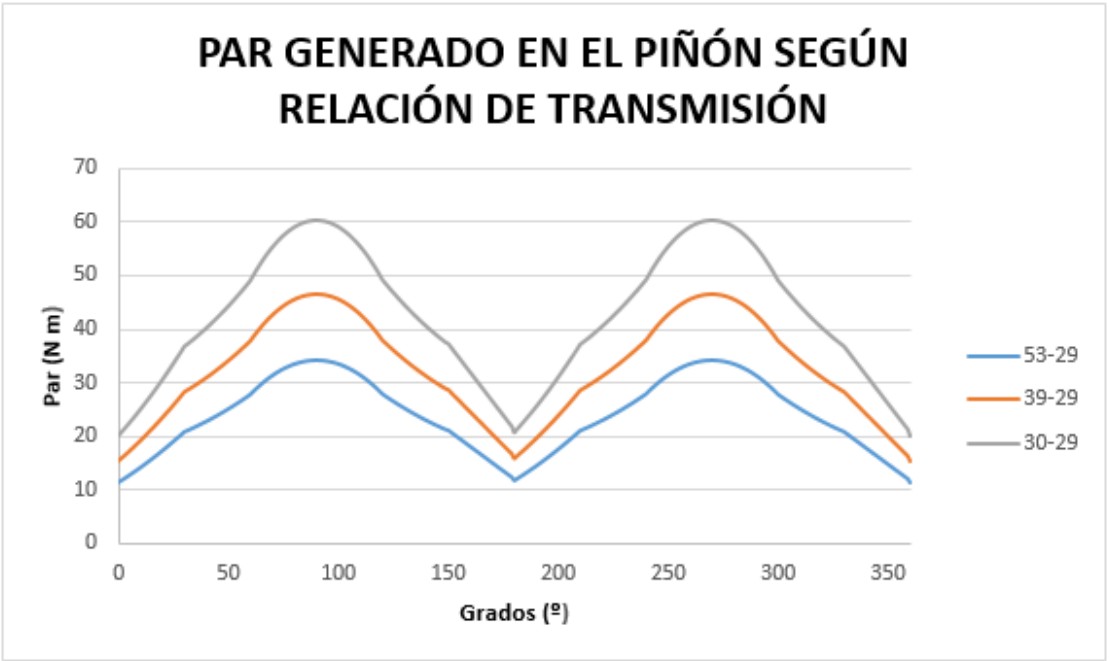


Figura 79. Par generado en el piñón según la relación de transmisión

Como se puede observar, las dos gráficas tienen la misma distribución. Referente al par máximo, sea cual sea la relación de transmisión que se utilice, este se encuentra en la misma posición de la biela, pero con diferente valor. En la siguiente tabla se específica los valores de par máximo, mínimo y medio de cada una de las relaciones de transmisión.

	Relación transmisión	PAR MÁXIMO	PAR MÍNIMO	PAR MEDIO
Mismo plato, diferentes piñones	39 - 27	43,19078969	14,24054112	30,48441291
	39 - 19	30,39351867	10,02112153	21,45199427
	39 - 11	17,59624765	5,801701936	12,41957563
Mismo piñón, diferentes platos	53 - 29	34,1361168	11,25510273	24,09355066
	39 - 29	46,39010745	15,29539601	32,74251757
	30 29	60,30713968	19,88401482	42,56527284

Tabla 76. Par máximo, mínimo y medio según relación de transmisión utilizada

Como conclusión, se puede decir que a mayor relación de transmisión, menor es el par transmitido al piñón. Por el contrario, si la relación de transmisión es menor, el par aumenta.

9.3.5 Fuerzas y par transmitidos a la rueda.

En este apartado se ha calculado la fuerza y par transmitidos a la rueda. Se ha ido calculando las fuerzas y momentos ejercidos desde los pedales hasta la rueda.
El momento ejercido en la rueda es el mismo que se da en el piñón.

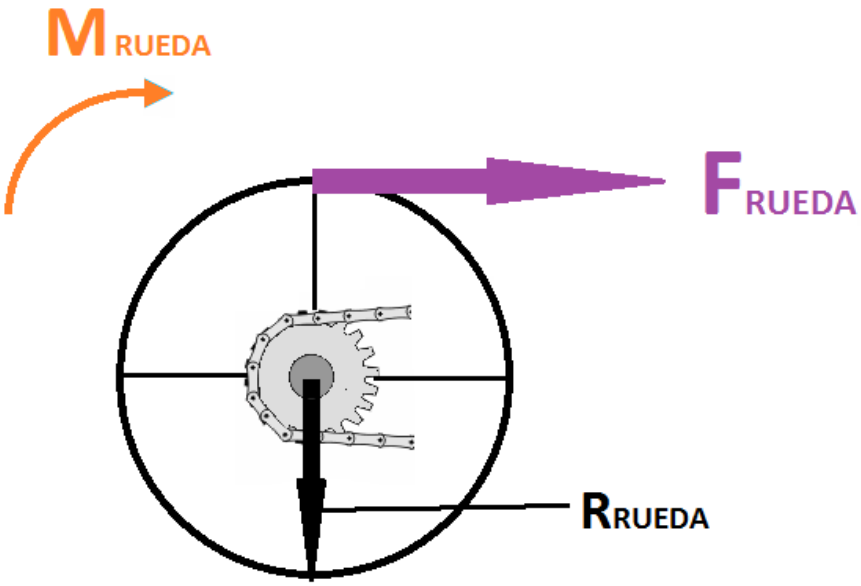


Figura 80. Fuerza y par transmitida a la rueda

Por ello sólo hace falta calcular la fuerza. Para poder calcular la fuerza producida en la rueda simplemente se ha de dividir el momento ejercido en el piñón por el radio de esta.

$$F_{1ªpierna_{rueda}} = \frac{M_{rueda}}{R_{rueda}} = \frac{43.57496433}{0.33} = 132.0453465\ N$$

$$F_{2ªpierna_{rueda}} = \frac{M_{rueda}}{R_{rueda}} = \frac{-9.438847527}{0.33} = -28.602568296\ N$$

$$F_{TOTAL_{Rueda}} = 132.0453465 + (-28.602568296\ ) = 103.4427782\ N$$

En la siguiente gráfica se muestra la fuerza generada en la rueda, trabajando con el plato y el piñón grandes (53 y 29 dientes respectivamente).

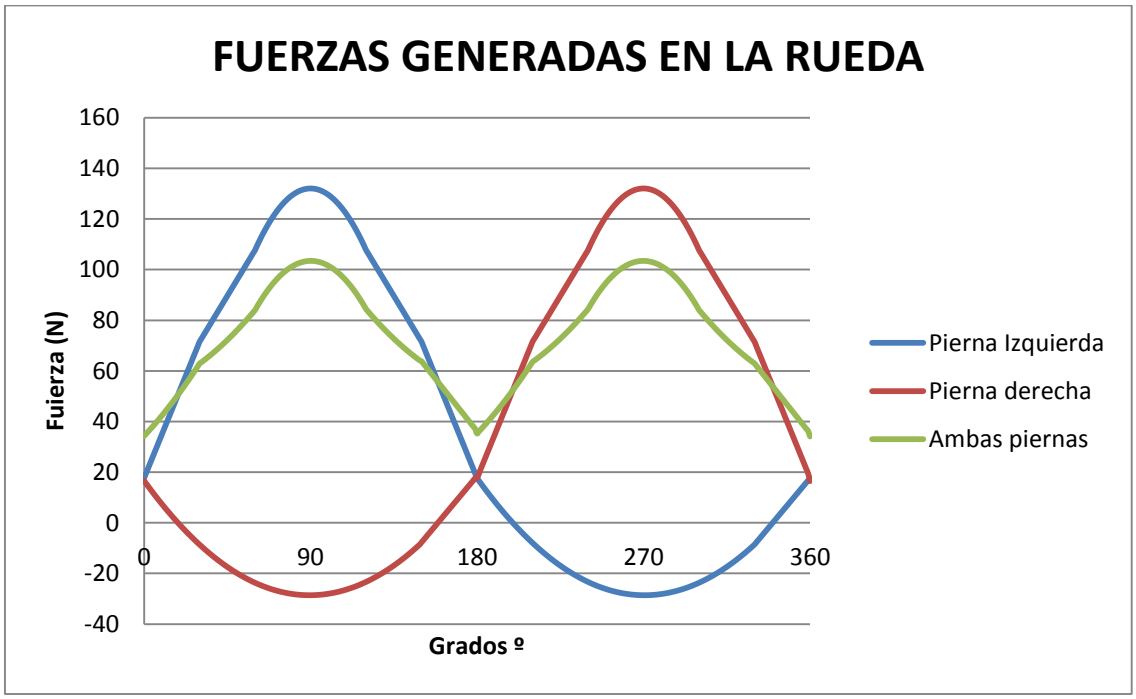


Tabla 77. Fuerzas generadas en la rueda

Se ha mostrado esta gráfica simplemente para verificar que sigue la misma distribución que las anteriores, y para ver el cambio de valores en cuanto a las fuerzas de cada pierna y a su suma se refiere. En cuanto al sumatorio de las fuerzas de las dos piernas, se obtiene un valor máximo de 103,44 N, un valor mínimo de 34,11 N y un valor medio de 73,01 N.

9.3.5.1 *Obtención del desarrollo y velocidad.*

En este apartado se calcula el desarrollo y la velocidad de la bicicleta.
El desarrollo es la distancia recorrida por la bicicleta por cada vuelta que realiza la biela en la fase del pedaleo, es decir, por cada ciclo completo del pedaleo.

Su cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$D = \omega \cdot 2\pi R_r \cdot r_t$$

Donde:

D: Desarrollo (m)
ω: Cadencia (rpm)
R_r: Radio rueda (m)
r_t: Relación de transmisión (adimensional).

Cuando se calcula el desarrollo se obtiene una distancia en función de un tiempo determinado. En este caso se ha calculado la distancia recorrida por cada minuto transcurrido.
El desarrollo varía según la relación de plato-piñón que se utilice, y también según la cadencia a la que se esté pedaleando.

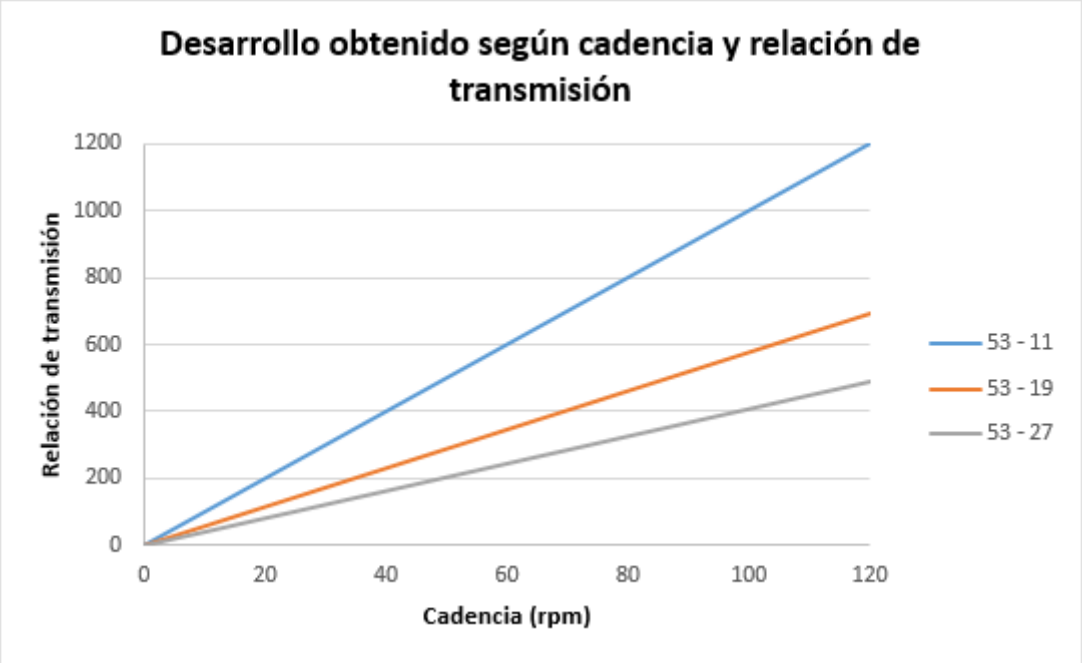


Tabla 78. Desarrollo obtenido según la cadencia y la relación de transmisión

Como se puede observar en la gráfica, el desarrollo aumenta de forma lineal a medida que la cadencia aumenta. Además de ello, cuando se pedalea a una determinada cadencia, si se utiliza una la relación de transmisión más grande, la bicicleta se desplaza más distancia. En este ejemplo, la relación de engranajes que obtiene un mayor desarrollo es utilizando un plato de 53 dientes y el piñón de 11 dientes. Por el contrario, si se utiliza el mismo plato pero con un piñón más grande (27 dientes), el desarrollo es menor.
Una vez se ha calculado el desarrollo, se puede obtener la velocidad a la que se desplaza la bicicleta, mediante un factor de conversión.

Si se quiere saber la velocidad en quilómetros hora, se calcula de la siguiente manera:

$$V = D \cdot \frac{60}{1000}$$

Donde:

V: Velocidad (km/h).
D: Desarrollo

Por ejemplo, la velocidad (en km/h) cuando la cadencia es de 70 rpm y se está utilizando el plato grande (53 dientes) y el piñón pequeño (11 dientes) es de 41, 95907604 km/h.

$$V = D \cdot \frac{60}{1000} = 699{,}317934 \frac{m}{min} \cdot \frac{60\ min}{1h} \cdot \frac{1\ km}{1000\ m} = 41{,}95907604\ km/h$$

Cadencia (rpm)	Desarrollo (m)			Velocidad (km/h)		
	53 -11	53-19	53-27	53 -11	53-19	53-27
0	0	0	0	0	0	0
5	49,951	28,919	20,351	2,997	1,735	0,104
10	99,903	57,838	40,701	5,994	3,470	0,208
15	149,854	86,757	61,052	8,991	5,205	0,312
20	199,805	115,677	81,402	11,988	6,941	0,416
25	249,756	144,596	101,753	14,985	8,676	0,521
30	299,708	173,515	122,103	17,982	10,411	0,625
35	349,659	202,434	142,454	20,980	12,146	0,729
40	399,610	231,353	162,804	23,977	13,881	0,833
45	449,562	260,272	183,155	26,974	15,616	0,937
50	499,513	289,192	203,505	29,971	17,351	1,041
55	549,464	318,111	223,856	32,968	19,087	1,145
60	599,415	347,030	244,206	35,965	20,822	1,249
65	649,367	375,949	264,557	38,962	22,557	1,353
70	699,318	404,868	284,907	41,959	24,292	1,458
75	749,269	433,787	305,258	44,956	26,027	1,562
80	799,220	462,707	325,608	47,953	27,762	1,666
85	849,172	491,626	345,959	50,950	29,498	1,770
90	899,123	520,545	366,309	53,947	31,233	1,874
95	949,074	549,464	386,660	56,944	32,968	1,978
100	999,026	578,383	407,010	59,942	34,703	2,082
105	1048,977	607,302	427,361	62,939	36,438	2,186
110	1098,928	636,222	447,711	65,936	38,173	2,290
115	1148,879	665,141	468,062	68,933	39,908	2,395
120	1198,831	694,060	488,413	71,930	41,644	2,499

Tabla 79. Desarrollo y velocidad según la relación de transmisión y la cadencia.

9.4 Fuerzas opuestas al movimiento.

En el ciclismo gracias a la fuerza ejercida por las piernas en los pedales, las ruedas pueden empezar a girar obteniendo un movimiento para poder desplazarse. Las fuerzas comentadas anteriormente son de propulsión ya que son las que favorecen al movimiento y avance de la bicicleta. Por el contrario, también existen fuerzas resistivas a este movimiento.

La fuerza de rozamiento total es la suma de diversas fuerzas como la fuerza de rozamiento por rodadura, fuerza de rozamiento del aire, la fuerza de la gravedad y la fuerza de rozamiento mecánico. Como se puede ver en la imagen inferior, el ciclista debe vencer las fuerzas de rozamiento. En la imagen de la izquierda se encuentra en llano, por lo cual tiene en contra la fuerza de rozamiento de rodadura y la del arrastre aerodinámico. En la imagen derecha se encuentra con una fuerza de la pendiente que le ayuda a coger velocidad ya que el ciclista se encuentra en bajada. Todas estas fuerzas de rozamiento se comentan a continuación.

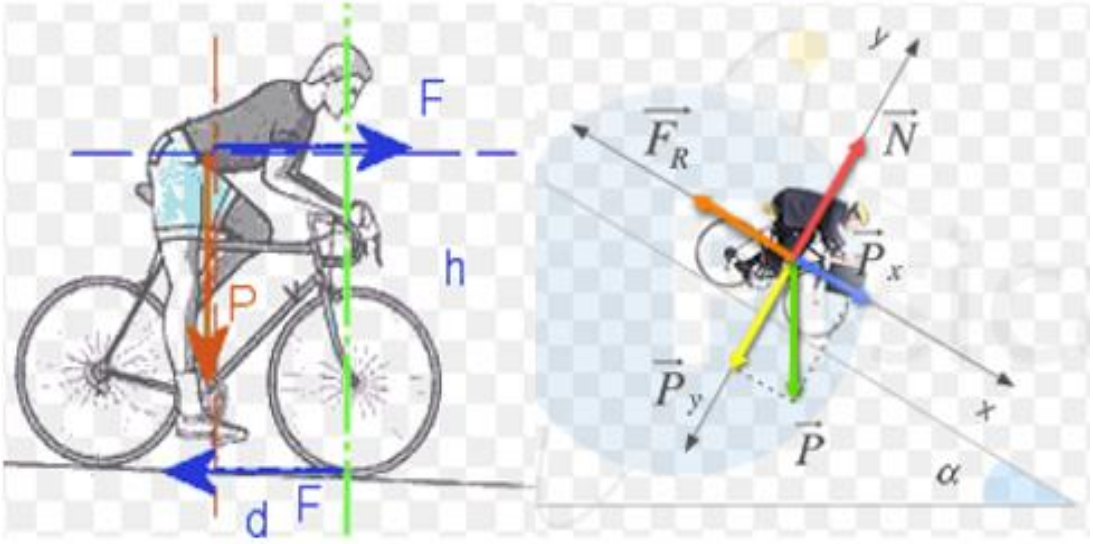


Figura 81. Diagrama de fuerzas de rozamiento

9.4.1 Fuerza de rozamiento por rodadura.

La primera fuerza de rozamiento que se ha estudiado es la fuerza de rozamiento por rodadura, la cual se da lugar en el contacto al que se someten la rueda y la carretera. A raíz de ese contacto se crea una fuerza resistiva opuesta al movimiento. Esta fuerza depende de diferentes factores como el peso de la bicicleta y del ciclista, la pendiente de la superficie, el coeficiente de rozamiento según la calzada de la carretera o las características del neumático (diámetro. grosor, elasticidad).

9.4.1.1 *Parámetros influyentes en la fuerza de rozamiento por rodadura.*

Existen diferentes parámetros que influyen en la fuerza de rozamiento de rodadura, aumentando o disminuyendo su valor. Todos ellos, se comentan a continuación.

9.4.1.1.1 *Peso del sistema ciclista-bicicleta.*

El peso del sistema ciclista-bicicleta influye en el rozamiento que tiene lugar entre la rueda y la superficie de contacto. A mayor peso de la bicicleta tenemos mayor rozamiento por rodadura. Es por ello que en etapas de puertos de montaña se suelen utilizar bicicletas más ligeras para ayudar al ciclista en la carrera. De igual forma, en pendientes, les será más fácil realizar la etapa a los deportistas de menor peso.

9.4.1.1.2 *Pendiente de la superficie.*

La pendiente también es otro factor influyente en la fuerza de rozamiento por rodadura. Dependiendo de si la subida que se esté realizando es más o menos inclinada, tendremos un mayor o menor rozamiento. En este proyecto se han estudiado pendientes de hasta un 20%. En la imagen inferior hay un ejemplo de una etapa de puerto de montaña en donde se puede ver los porcentajes de las pendientes por tramos. Los valores que se encuentran dentro del recuadro hacen referencia a las pendientes más pronunciadas de esta carrera en particular.

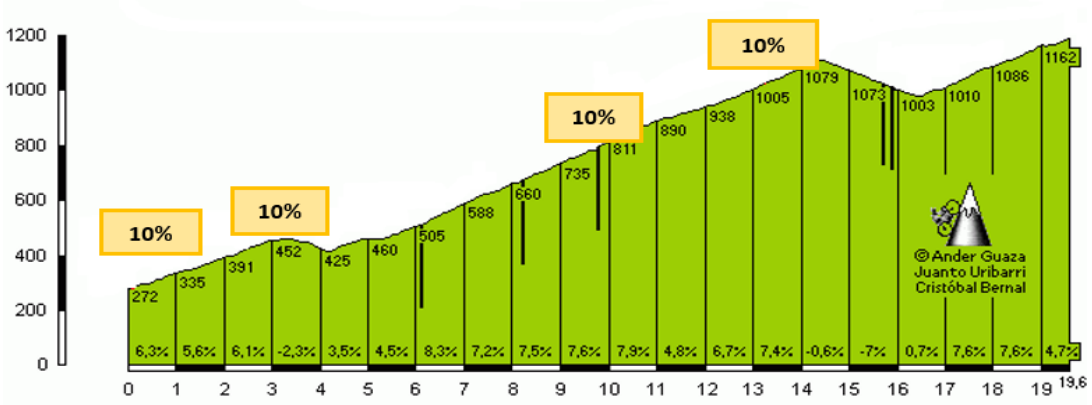


Figura 82. Etapa El Boyar - Las Palomas (Cádiz). Anotaciones de las pendientes máximas

9.4.1.1.3 *Coeficiente de rozamiento de la carretera.*

Según las características que tenga la superficie de competición se obtendrá una determinada fuerza de rozamiento, la cual no es constante. Cuanto menor sea el coeficiente, menor será la resistencia. En este caso se debe considerar dos coeficientes: el estático, el cual es el coeficiente que se obtiene de la relación entre la máxima fuerza de rozamiento posible necesaria para impedir el movimiento, y la fuerza que ejerce la rueda contra la superficie; y el dinámico, el cual es la relación entre la fuerza de rozamiento y la fuerza que ejerce la rueda contra la carretera.

9.4.1.1.4 *Características del neumático.*

Otro factor influyente es el neumático con el cual se va proceder a realizar una etapa. Dependiendo de las características de este, podemos dificultar el avance de la bicicleta haciendo la fuerza de rozamiento más grande. Principalmente hay cuatro características del neumático relacionadas con las fuerzas de rozamiento.

9.4.1.1.4.1 *Elasticidad del neumático.*

Cuando la rueda entra en contacto con el suelo, la goma de esta se deforma. Como consecuencia parte de la energía de deformación se devuelve en el sentido del avance de la bicicleta, pero por otro lado, parte de esta energía se pierde en forma de calor. Siempre se obtiene esa pérdida sin poder llegar a obtener que el total de la energía sea devuelta en el sentido del avance ya que no existe un neumático con una goma perfectamente elástica. Sin embargo sí que se puede disminuir la fuerza de rozamiento por rodadura utilizando gomas lo más elásticas posibles.

9.4.1.1.4.2 *Anchura y grosor del neumático.*

La fuerza de rozamiento por rodadura depende del área de las superficies que entran en contacto. Es por ello que la anchura del neumático influye. Si se tiene un neumático con una menor anchura, disminuirá la fuerza de rozamiento. Por el contrario, cuanto más ancha sea la superficie del neumático mayor será la energía disipada en forma de calor y por lo tanto mayor será la fuerza de rozamiento por rodadura. Referente al grosor de la rueda, también influye en el rozamiento. Al igual que la anchura, contra más grosor tenga el neumático, más energía en forma de se disipará en forma de calor. Por este motivo, las ruedas suelen tener un grosor muy pequeño con tal de evitar este fenómeno.
Por esta razón existen diferentes tipos de ruedas que se utilizan en las carreras dependiendo de las características de esta. En el caso del ciclismo en ruta, se utiliza una rueda mucho más delgada que en competiciones como triatlones o de montaña.

9.4.1.1.4.3 *Diámetro del neumático.*

Referente al diámetro del neumático, cuanto mayor sea este menor será la fuerza de rozamiento, es decir son inversamente proporcionales. Por el contrario si el diámetro de la rueda es menor, se obtiene un mayor rozamiento. Esto es debido a que a mayor diámetro de la rueda, esta entra en contacto con el suelo con un menor ángulo y como consecuencia se produce una menor deformación y una menor pérdida de energía en forma de calor disipada.
En la imagen inferior, se muestran tres ejemplos de neumáticos utilizados en los equipos españoles de ciclismo con sus respectivos diámetros y anchuras.

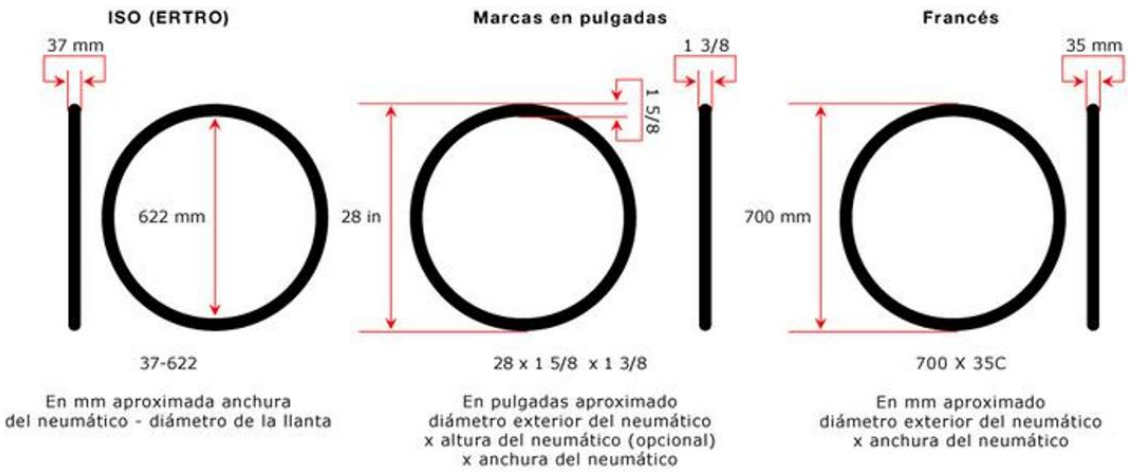


Figura 83. Medidas normalizadas de neumáticos

9.4.1.1.4.4 *Presión del neumático.*

Según la presión de hinchado del neumático se puede tener una fuerza de rozamiento por rodadura mayor o menor. Cuanto más presión tenga el neumático menor será el rozamiento.
Varios estudios han realizado experimentos con diversas presiones en el neumático. Fueron estudiadas presiones de entre 3 a 12 bares de presión. En la primera medida, cuando la presión de inflado del neumático era de 3 bar se obtuvo una determinada fuerza de rozamiento de rodadura, la cual disminuía en un 25% cada vez que se aumenta 1 bar de presión. Es decir que entre tener de 3 a 5 bares de presión, el rozamiento en la rueda disminuía en un 50%. Actualmente los neumáticos de las bicicletas profesionales están sometidos a 8 o 9 bar. A partir de estos 9 bares, la fuerza de rozamiento no disminuye tanto como en los casos anteriores, es despreciable. Por ello los neumáticos no están sometidos a más presión.

9.4.1.2 *Cálculo de la fuerza de rozamiento por rodadura (FRr).*

Para poder calcular esta fuerza se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$FR_r = C_{rr} \cdot FN$$

Siendo:

FRr: Fuerza de rozamiento por rodadura (N).
Crr: coeficiente de rodadura.
FN: fuerza normal (N).

En el cálculo de esta fuerza de rozamiento se ha considerado dos parámetros diferentes entre amateurs y profesionales: la masa de la bicicleta y la masa del ciclista.

Suponiendo el peor de los casos, se ha considerado que la masa de un ciclista amateur puede llegar a los 100kg; en el caso de los profesionales el peso medio de un deportista es de 60-70kg. También las masas de las bicicletas son diferentes: de 10 y 6 kg respectivamente. Por otro lado el coeficiente de rodadura se considera el mismo ya que no depende del ciclista sino de la carretera.

	MASA CICLISTA (kg)	MASA BICILETA (kg)	Crr
AMATEUR	100	10	0.005
PROFESIONAL	70	6	0.005

Tabla 80. Parámetros de entrada para el cálculo de fuerzas de rozamiento

En el caso de que se esté pedaleando con una pendiente del 5% obtenemos los siguientes valores de la fuerza de rozamiento.
Cuando se tiene una subida de por ejemplo el 5%, quiere decir que se está subiendo cinco metros de altura, con respecto al punto inicial, cada cien metros.

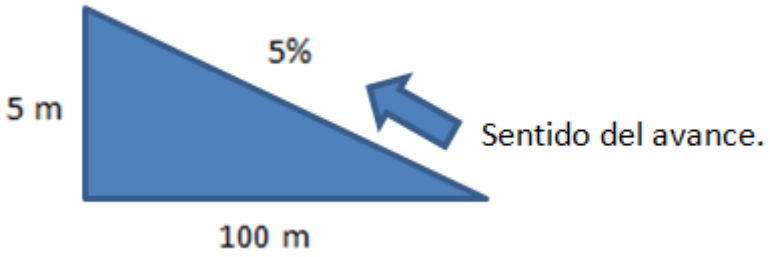


Figura 84. Explicación del porcentaje de pendiente

Por lo tanto, al tener una pendiente del 5%, el ángulo con respecto a la horizontal es de:

$$\alpha = arctg\left(\frac{5}{100}\right) = 2.86240^{\circ} \rightarrow 2.86240^{\circ} \cdot \frac{2\pi}{360^{\circ}} = 0.049958\, rad$$

Una vez se ha obtenido el ángulo de pendiente en radianes, se ha calculado la fuerza normal y posteriormente la fuerza de rozamiento por rodadura:

Profesionales:

$$FN = (m_b + m_c) \cdot 9.81 \cdot \cos\alpha = (6 + 70) \cdot 9.81 \cdot \cos\ (0.049958) = \\ = 744.6297938\ N$$

$$FR_r = C_{rr} \cdot FN = 0.005 \cdot 744.6297938 = 3.7231489\ N$$

Amateurs:

$$FN = (m_b + m_c) \cdot 9.81 \cdot \cos\alpha = (10 + 100) \cdot 9.81 \cdot \cos\ (0.049958) = \\ = 1077.753649N$$

$$FR_r = C_{rr} \cdot FN = 0.005 \cdot 1077.753649 = 5.3887682\ N$$

Se puede ver que a causa del mayor peso que tiene el sistema ciclista-bicicleta en el caso de los deportistas amateurs, se obtiene una mayor fuerza de rozamiento.
En la imagen inferior de la simulación en Matlab, se puede ver los datos necesarios para poder calcular la fuerza de rozamiento por rodadura.
Los cálculos explicados anteriormente se han realizado tan sólo con el caso de tener una pendiente del 5% como ejemplo. Pero la fuerza de rozamiento ha sido calculada desde el caso en que el ciclista se encuentra en llano hasta tener una pendiente del 20%. Realizando los mismos cálculos se obtiene los siguientes valores de fuerza de rozamiento por rodadura y la siguiente gráfica.

Pendiente (%)	FRr Profesional (N)	FRr Amateur (N)
0	3,7278	5,3955
1	3,727613624	5,395230245
2	3,727054664	5,394421224
3	3,726123621	5,393073663
4	3,724821334	5,391188773
5	3,723148969	5,388768244
6	3,721108023	5,385814244
7	3,718700318	5,382329407
8	3,715927995	5,378316835
9	3,712793513	5,373780085
10	3,709299638	5,36872316
11	3,705449438	5,363150502
12	3,701246279	5,357066982
13	3,69669381	5,350477883
14	3,691795963	5,343388894
15	3,686556936	5,335806092
16	3,680981188	5,32773593
17	3,675073425	5,319185221
18	3,668838595	5,310161125
19	3,662281871	5,300671129
20	3,655408643	5,290723036

Tabla 81. Fuerza de rozamiento Amateur y Profesional según la pendiente

En la siguiente gráfica, se muestra la diferencia de la fuerza de rozamiento por rodadura entre ciclistas amateurs y profesionales. Esta diferencia de valores del rozamiento es debida al peso del sistema ciclista-bicicleta, el cual es mayor en el caso de los amateurs.

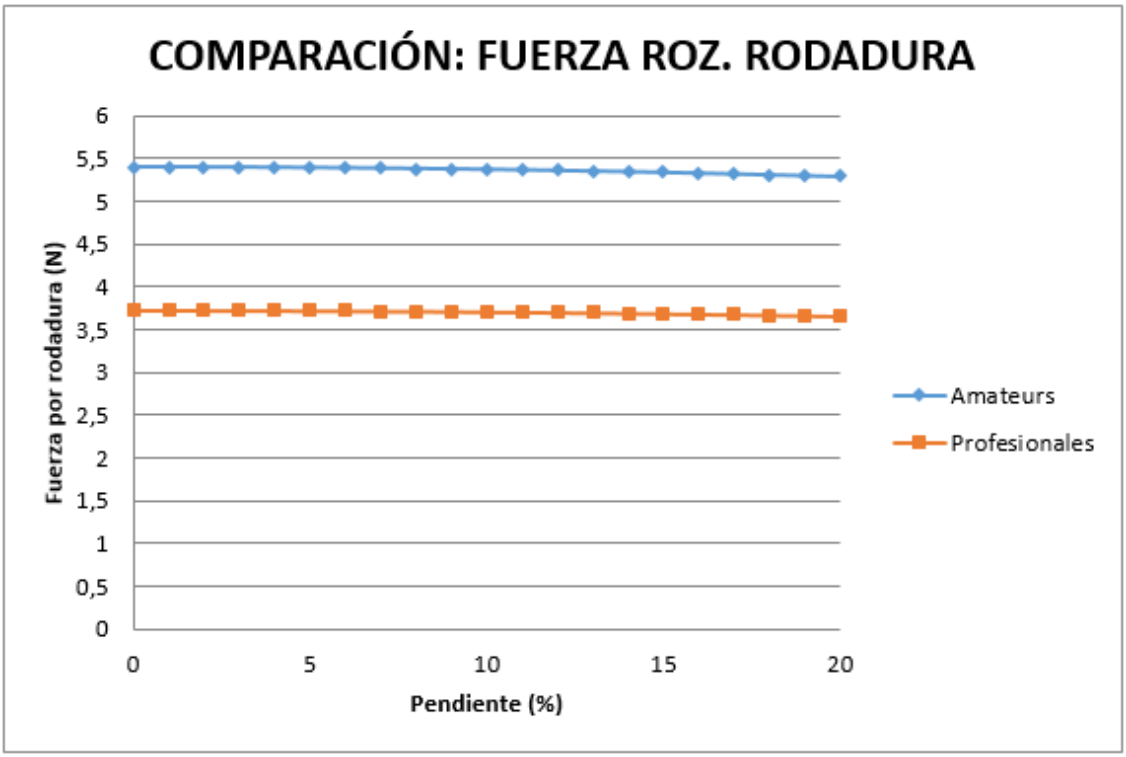


Figura 85. Comparación del efecto de la fuerza de rozamiento según tipo de ciclistas

Una vez ha sido calculada la fuerza resistiva que aparece entre el contacto de la rueda y el suelo, se ha procedido a calcular el momento de esta fuerza ejercido sobre la rueda. Este momento tendrá un sentido opuesto al momento que se transmite a la rueda, ejercido por el deportista.
En el caso de este estudio, se ha supuesto que el diámetro de la rueda es de 0.66 m. El cálculo del momento se realiza simplemente multiplicando la fuerza ejercida por el rozamiento de la rueda por el radio de esta.

$$Mr_{rueda} = FR_r \cdot R_{rueda}$$

Profesionales:

$$Mr_{rueda} = FR_r \cdot R_{rueda} = 3.723148969 \cdot 0.33 = 1.22863916\ N \cdot m$$

Amateurs:

$$Mr_{rueda} = FR_r \cdot R_{rueda} = 5.388768244 \cdot 0.33 = 1.77829352\ N \cdot m$$

Estos dos valores son los momentos resistivos en el caso de una pendiente del 5%.

En la tabla siguiente se muestra todos los valores de los momentos con las respectivas pendientes.

Pendiente (%)	M de rodadura Profesional (N·m)	M de rodadura Amateur (N·m)
0	1,230174	1,780515
1	1,230112496	1,780425981
2	1,229928039	1,780159004
3	1,229620795	1,779714309
4	1,22919104	1,779092295
5	1,22863916	1,778293521
6	1,227965648	1,7773187
7	1,227171105	1,776168704
8	1,226256238	1,774844556
9	1,225221859	1,773347428
10	1,22406888	1,771678643
11	1,222798315	1,769839666
12	1,221411272	1,767832104
13	1,219908957	1,765657702
14	1,218292668	1,763318335
15	1,216563789	1,76081601
16	1,214723792	1,758152857
17	1,21277423	1,755331123
18	1,210716736	1,752353171
19	1,208553017	1,749221473
20	1,206284852	1,745938602

Tabla 82. Par de Rodadura según el tipo de ciclista y el tipo de pendiente

9.4.2 Fuerza de rozamiento del aire.

La segunda fuerza de rozamiento que se ha tenido en cuenta en este es estudio es la fuerza de rozamiento del aire también llamada fuerza de arrastre aerodinámico. En comparación con la fuerza de rozamiento por rodadura, la fuerza de arrastre aerodinámico influye mucho más en el movimiento de la bicicleta.
Para obtener los valores de la fuerza de arrastre se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$FR_{aire} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot V^2$$

Donde:

ρ: Densidad.
A: Área frontal del sistema ciclista-bicicleta.
C_x: Coeficiente de arrastre aerodinámico.
V: Velocidad del conjunto.

Al igual que pasa con las superficies de la rueda y del suelo de la carretera, cuando un ciclista está en movimiento se produce un rozamiento del aire que interfiere en la superficie compuesta por el sistema ciclista-bicicleta. A causa de este aire opuesto al

movimiento, la velocidad a la cual se desplaza el ciclista disminuye. Esta fuerza de arrastre puede variar dependiendo de diversos parámetros.

9.4.2.1 *Parámetros influyentes en la fuerza de rozamiento del aire.*

Existen diferentes parámetros, los cuales afectan directamente a la fuerza de rozamiento del aire. Estos parámetros son los siguientes:

9.4.2.1.1 *Velocidad del sistema ciclista-bicicleta.*

La velocidad es el parámetro más influyente en cuanto al cálculo de la fuerza de arrastre. Cuanto mayor sea la velocidad a la que se desplaza la bicicleta, mayor será la resistencia opuesta al movimiento.

9.4.2.1.2 *Temperatura y altitud.*

La temperatura y altitud a la que se desarrolla una competición afectan a la densidad, ρ. Un incremento de la temperatura supone un aumento de la viscosidad del aire y a su vez de la fuerza de rozamiento; por este motivo, sería recomendable competir a temperaturas no muy altas. Sin embargo, un aumento de la temperatura va a afectar a la presión del aire, y ésta, a la densidad del mismo. Por este motivo, ambas variables son tratadas conjuntamente, midiendo la temperatura, T, y presión atmosférica, P, que influirán en la densidad del aire, tal y como expresa la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{273}{760}\right) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)$$

Donde:

ρ = densidad del aire (Kg/m^3)
ρ_0 = densidad del aire estándar, 1.293 kg/m^3
P = presión atmosférica (mm Hg)
T = temperatura (ºK)

9.4.2.1.3 *Área frontal del sistema ciclista-bicicleta.*

El área frontal que presenta el conjunto del ciclista y de la bicicleta es el área que choca con el aire. Lógicamente, a mayor área frontal del sistema ciclista-bicicleta, mayores van a ser los valores de rozamiento con el aire. El tipo de bicicleta utilizada por los ciclistas, la posición de los brazos en el manillar, la posición del cuerpo sobre la bicicleta y otros factores que serán comentados posteriormente , son los que determinan el área frontal. El rango de área frontal, a pesar de variar bastante, está comprendido mayoritariamente entre 0.3 - 0.6 m^2.

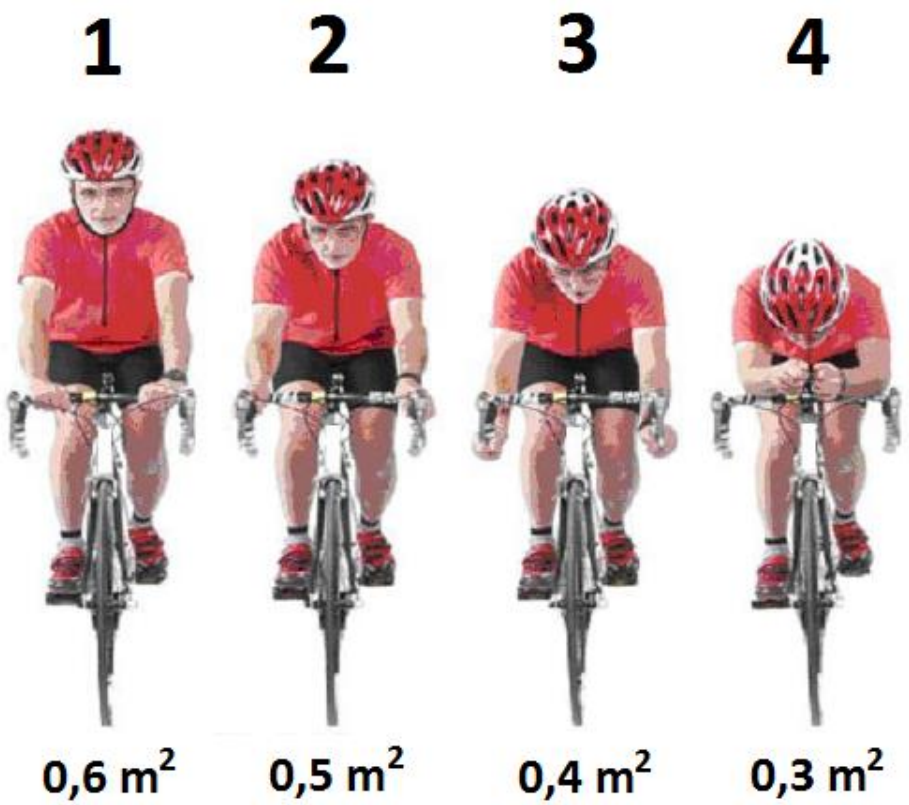


Figura 86. Área frontal que exponen los ciclistas en función de su posición adoptada en la bicicleta de carretera (posiciones 1 a 3) y de contrarreloj (posición 4)

Existen diferentes métodos para calcular el área frontal, algunos de ellos muy sofisticados, pero son bastante complejos y laboriosos, por lo que se suelen emplear otros métodos más sencillos y directos. Un problema que presentan estos métodos es la poca precisión en el resultado. Esto es debido a que solo calculan el área frontal del ciclista pero no la de la bicicleta, por lo tanto, tienen un error que arrastran siempre. Para un cálculo preciso es necesario saber el área frontal del conjunto ciclista-bicicleta. Calcular el área total del conjunto no es nada fácil ya que cada bicicleta presenta un área frontal determinada y, además, se debe tener en cuenta que cada posición en la bicicleta es bastante individual. Dadas todas las variables que hay y la dificultad en el cálculo preciso se ha optado por utilizar el valor del coeficiente de succión aerodinámico, A·Cx. Este coeficiente es el producto del área frontal del conjunto ciclista-bicicleta y el coeficiente de rozamiento del conjunto con el aire. En vez de tener en cuenta ambos valores por separado se calculan los dos juntos y se simplifica.

Para medir el A·Cx el mejor método es utilizar el túnel de viento. En él se pueden hacer los ensayos necesarios para ver cómo afectan los diferentes cambios utilizando diferentes áreas frontales. Come ejemplo este estudio realizado por J. García-López y J. Peleteiro López en ITER de Tenerife [38]:

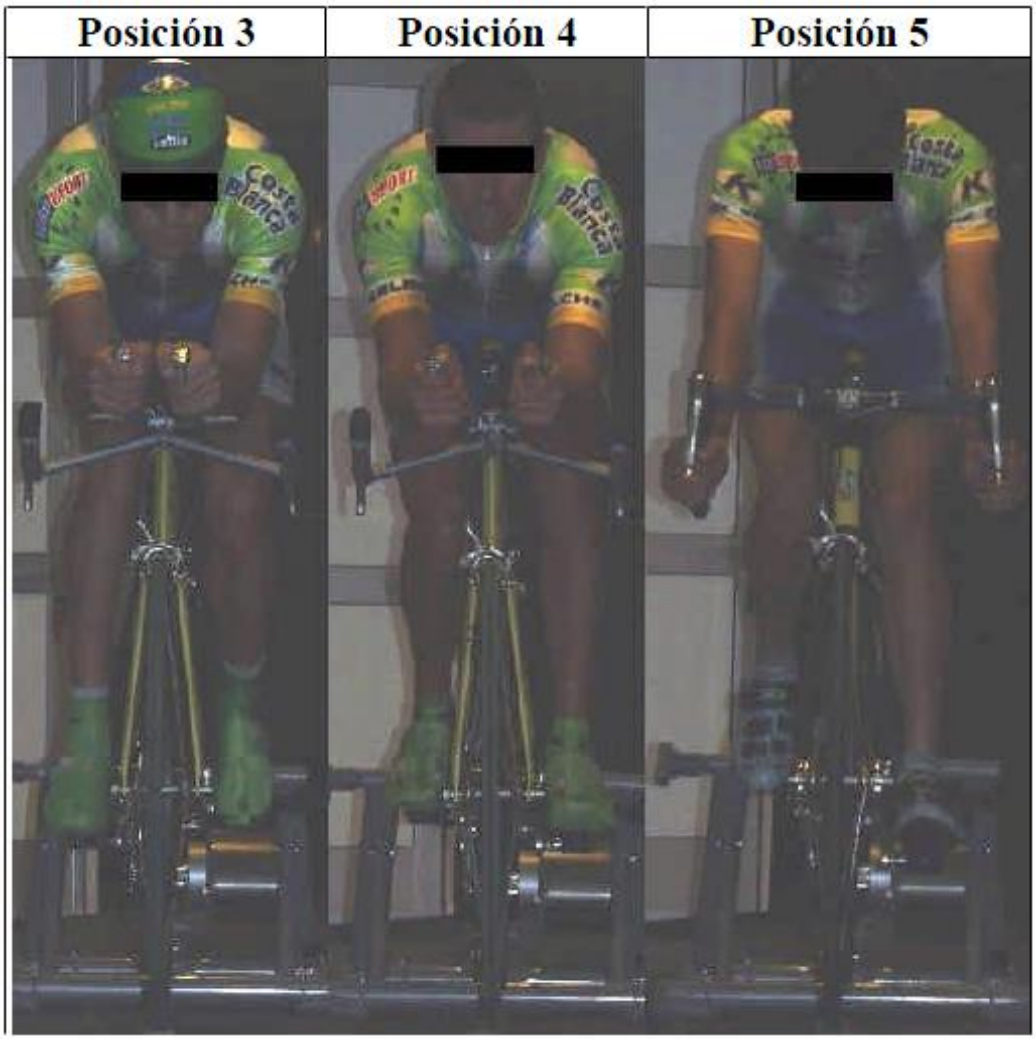


Figura 87. Área frontal en diferentes posiciones. La posición 3 en posición de contrarreloj, bicicleta de contrarreloj y casco, la posición 4 en posición de contrarreloj, bicicleta de contrarreloj y sin casco y la posición 5 con posición de contrarreloj

Los resultados obtenidos son [38]:

	Posición 3	Posición 4	Posición 5
SC_X (m^2)	0.2987	0.3148	0.5209
S (m^2)	0.3096	0.3167	0.3511

Tabla 83. Valores obtenidos del coeficiente de succión aerodinámico, A•Cx, y a del área frontal, A, según las diferentes posiciones

Los resultados obtenidos muestran valores lógicos y que se corresponden a lo esperado. El menor coeficiente de succión aerodinámico corresponde a la posición 3, tal y como es de esperar ya que es la posición y la indumentaria más aerodinámica. La posición 4 presenta un A·Cx algo mayor que la 3 debido a que el ciclista no lleva el casco en ese momento siendo los demás parámetros iguales. La posición 5 muestra un área frontal mucho mayor ya que el ciclista presenta una posición menos aerodinámica y presenta un A·Cx mayor debido a que el área frontal es mayor y porque no lleva casco, lo que

favorece el rozamiento. En conclusión, se puede decir que los resultados obtenidos en el ensayo corresponden a lo que se esperan encontrar.

9.4.2.1.4 *Ruedas utilizadas.*

El tipo de rueda utilizada es un factor importante a la hora su elección ya que pueden suponer entre el 10-15% de la fuerza de rozamiento total de la bicicleta. Unas ruedas adecuadas pueden reducir hasta un 3% la fuerza de rozamiento total. Existen 3 grupos mayoritarios de tipos de ruedas, las ruedas convencionales de radios, las ruedas de bastón y las ruedas lenticulares. Las ruedas convencionales son las ruedas menos eficientes generando un mayor fregamiento con el aire. Entre las ruedas de bastones y las ruedas lenticulares no existe una gran diferencia en relación al rozamiento con el aire que generan.

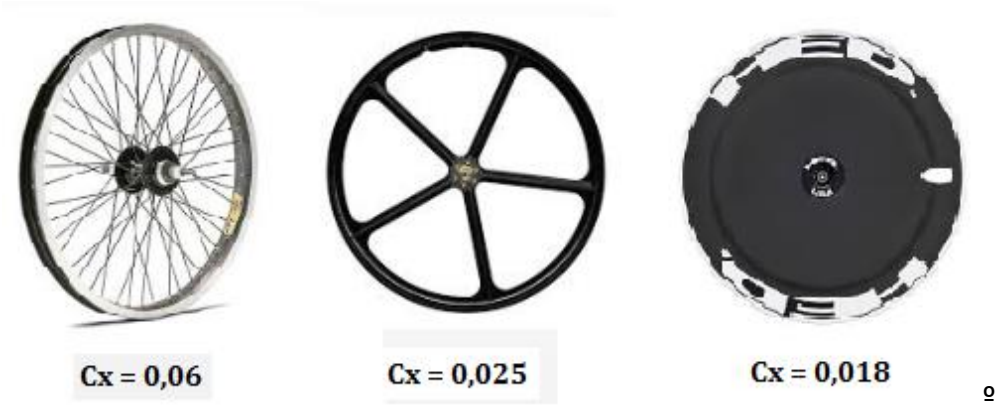


Figura 88. Rueda de radios, rueda de bastones y rueda lenticular con sus respectivos coeficientes de rozamiento (Cx)

Otro aspecto que hay que tener en cuenta a la hora de la elección del tipo de rueda es el posible viento lateral incidente. A medida que aumenta el ángulo incidente, el coeficiente de rozamiento también aumenta, incluso, llegándose a disparar a partir de un determinado ángulo. Este viento lateral tiene diferente efecto dependiendo del tipo de rueda. En ruedas de radios y en lenticulares es donde se produce una mayor afectación por el viento lateral, especialmente en las lenticulares debido al efecto pantalla que hacen. Por lo tanto, cuando el viento lateral es nulo o casi nulo es preferible utilizar ruedas lenticulares por su bajo coeficiente de rozamiento, sin embargo, si el viento sobrepasa cierto ángulo es más conveniente utilizar ruedas de bastones ya que no hacen efecto pantalla y tienen menor peso.

9.4.2.1.5 *Tipo de bicicleta.*

La bicicleta representa entre una tercera parte y la mitad de la resistencia aerodinámica total del sistema ciclista-bicicleta, por lo tanto, cualquier mejora aerodinámica tiene un efecto muy positivo en el rendimiento. En los últimos años se han desarrollado bicicletas y cuadros diseñados especialmente para reducir la resistencia aerodinámica llegándose a conseguir hasta un 25%. No obstante, no es habitual basarse en los valores de la

resistencia aerodinámica únicamente de la bicicleta ya que las diferencias suelen ser pequeñas. Lo que se tiene en cuenta es la resistencia del conjunto ciclista-bicicleta ya que esta sí que varía en gran medida. Para medir la resistencia que tiene una bicicleta se utiliza el producto del área frontal da la bicicleta y el coeficiente de rozamiento, A·Cx. Este valor se obtiene de forma experimental en ensayos empleando un túnel de viento. Por este motivo se suele utilizar el producto de A·Cx el cual es más fácil de calcular.
En el mundo de la competición existen mayoritariamente 3 tipos de cuadros de bicicleta: 1) cuadro y manillar aerodinámico, utilizado en las pruebas de contrarreloj, 2) cuadro triangular y manillar aerodinámico, utilizado en pruebas de montaña, contrarreloj y ruta y, 3) cuadro y manillar convencional, utilizado en ruta. Estos son los valores típicos de A·Cx que presentan [38]:

Figura 89. 1. Cuadro y manillar aerodinámico, 2. Cuadro triangular y manillar aerodinámico y 3. Cuadro y manillar convencional con sus respectivos A•Cx

Tal y como se observa el cuadro y manillar aerodinámico reduce el valor del A·Cx alrededor de un 25% respecto a los cuadros triangulares y convencionales. Expresando los valores en términos de potencia el ciclista ahorraría unos 50 W, ya que necesita vencer menos fuerza para avanzar, al utilizar el cuadro aerodinámico.

9.4.2.1.6 *Tipo de casco.*

El casco también es un elemento que se analiza teniendo en cuenta el producto del área frontal y el coeficiente de rozamiento A·Cx. El casco, contrariamente a lo que se puede pensar en casi todos los casos, es un elemento que aumenta la fricción con el aire si se compara con la cabeza totalmente desnuda (sin pelo), así que, la mejor solución sería no utilizar casco e ir con la cabeza afeitada. Por seguridad, y obligatorio por reglamento, es necesario el uso de casco, por lo tanto, se hace obligatorio su optimización para poder reducir la fricción con el aire todo lo posible. Estos cascos aerodinámicos tienen el inconveniente de ir pegados a la espalda por lo que resultan muy incomodos y solo trabajan correctamente en una cierta posición. Si se varía la posición acaban resultando muy molestos para el ciclista provocando la caída de su rendimiento y al final resultando más negativo.

9.4.2.1.7 *Posición de los brazos.*

La posición de los brazos afecta al coeficiente de succión aerodinámico, A·Cx. En una competición la posición de los brazos en el manillar puede mejorar el rendimiento hasta reducir un 10% el tiempo final dependiendo de la posición adoptada. Esto es debido a

que el A·Cx del sistema ciclista-bicicleta puede disminuir un 30% cuando se compara la posición sobre una bicicleta con manillar estándar y una bicicleta con manillar aerodinámico. La posición de los brazos no sólo afecta al área frontal del ciclista (S), sino que también afecta al coeficiente de rozamiento aerodinámico (Cx). Es la combinación de ambos factores lo que modifica el coeficiente de succión aerodinámico.
A continuación, se muestra la variación del coeficiente de succión aerodinámico para un ciclista utilizando una posición con manillar convencional y una con manillar de triatlón [38]:

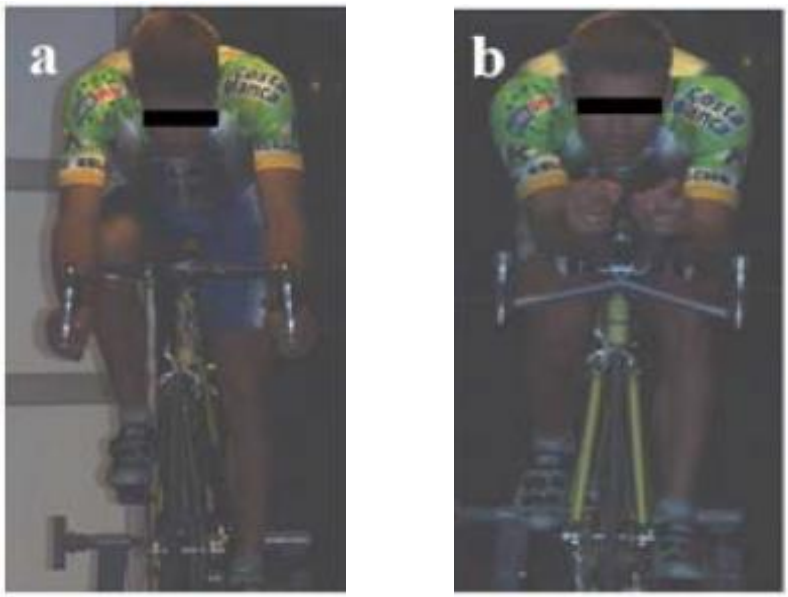


Figura 90. a = Posición del ciclista en un manillar convencional b = posición del ciclista en un manillar de triatlón

En a:
A = 0,380 m^2
A·Cx = 0,469 m^2

En b:
A = 0,289 m^2
A·Cx = 0,255 m^2

El incremento del área es:

$$\Delta S = \frac{(S_a - S_b) \cdot 100}{S_b}$$

$$\Delta S = \frac{(0{,}38 - 0{,}289) \cdot 100}{0{,}289} = 31{,}5\%$$

El incremento del coeficiente de succión aerodinámico es:

$$\Delta S = \frac{(S \cdot Cx_a - S \cdot Cx_b) \cdot 100}{S \cdot Cx_b}$$

$$\Delta S = \frac{(0{,}469 - 0255) \cdot 100}{0{,}255} = 83{,}9\%$$

Tal y como se puede ver entre un ciclista en posición con un manillar convencional y otro ciclista en posición con manillar de triatlón existe una diferencia de área frontal, ΔA, del

31,5%, mientras que el coeficiente de succión aerodinámico, ΔA·Cx, varía un 83,9%. Estos resultados son orientativos ya que varían en gran medida según diferentes parámetros como pueden ser la corpulencia del ciclista y las dimensiones y ajustes de posicionamiento de la bicicleta.

9.4.2.1.8 *Posición del cuerpo.*

Es posible optimizar la postura del ciclista encima de la bicicleta disminuyendo el ángulo del tronco con la horizontal. Esta es una variable que se relaciona con la resistencia aerodinámica del conjunto ciclista-bicicleta, debido a su influencia en el coeficiente de succión aerodinámico, A·Cx. En ciclistas de élite, este ángulo puede oscilar entre los 10-25º, y es importante optimizarlo, teniendo en cuenta la disminución de la resistencia aerodinámica, pero también el aumento del coste metabólico del pedaleo. Tiempo atrás la forma más sencilla para reducir el ángulo del tronco era utilizar ruedas delanteras más pequeñas que las traseras, pero esto ya no está permitido por el reglamento, así que, hoy en día, la única estrategia posible para disminuir esta variable es adelantar y bajar el apoyo de los antebrazos en el manillar de la bicicleta.
Sin embargo, existen dudas sobre los efectos de esta modificación en el gasto metabólico del pedaleo. Cuando se disminuye el ángulo del tronco con la horizontal también aumenta el gasto metabólico requerido para pedalear. Los factores responsables de la disminución del rendimiento del pedaleo, cuando los ciclistas adoptan una posición aerodinámica forzada, son la contracción generada en los músculos de las piernas y las variaciones en la cinética angular de la cadera, rodilla y tobillo. Por esta razón, es necesario encontrar el balance más equilibrado entre la reducción aerodinámica y el gasto metabólico extra para conseguir el mejor rendimiento físico en el pedaleo.

9.4.2.1.9 *Drafting (rebufo).*

En muchas disciplinas deportivas los deportistas se colocan detrás de uno o varios competidores; esto es conocido como ir a rueda o rebufo, y técnicamente, como drafting y es de vital importancia ya que puede reducir el coeficiente de succión aerodinámico hasta la mitad dependiendo de las circunstancias. Ir a rueda supone ventajas en cualquier modalidad deportiva pero a mayores velocidades mayores son las ventajas conseguidas. Por eso en el ciclismo, donde se trabaja a altas velocidades comparado con otros deportes, el drafting tiene mucha importancia y se intenta explotar en toda su dimensión.
En el ciclismo el drafting puede suponer reducciones de la resistencia aerodinámica de un 30%, y un ahorro del gasto energético del 20%, y esto solo yendo a rueda de un solo ciclista. Tal y como se ha mencionado anteriormente estos descensos pueden verse incrementados al aumentar la velocidad de la prueba, y también, disminuir la distancia entre las ruedas del primer ciclista y el ciclista perseguidor, o aumentar el número de ciclistas que lo preceden.

En relación a la distancia de separación entre las ruedas del primer ciclista y el ciclista perseguidor, se estima que los beneficios aerodinámicos cuando la distancia no supera los 0.5 m son prácticamente similares a cuando ésta es de 0 m. Sin embargo los

beneficios aerodinámicos disminuyen cuando la distancia es mayor de 0.5 m, y desaparecen cuando es mayor de 3 m. La siguiente figura muestra este fenómeno [39].

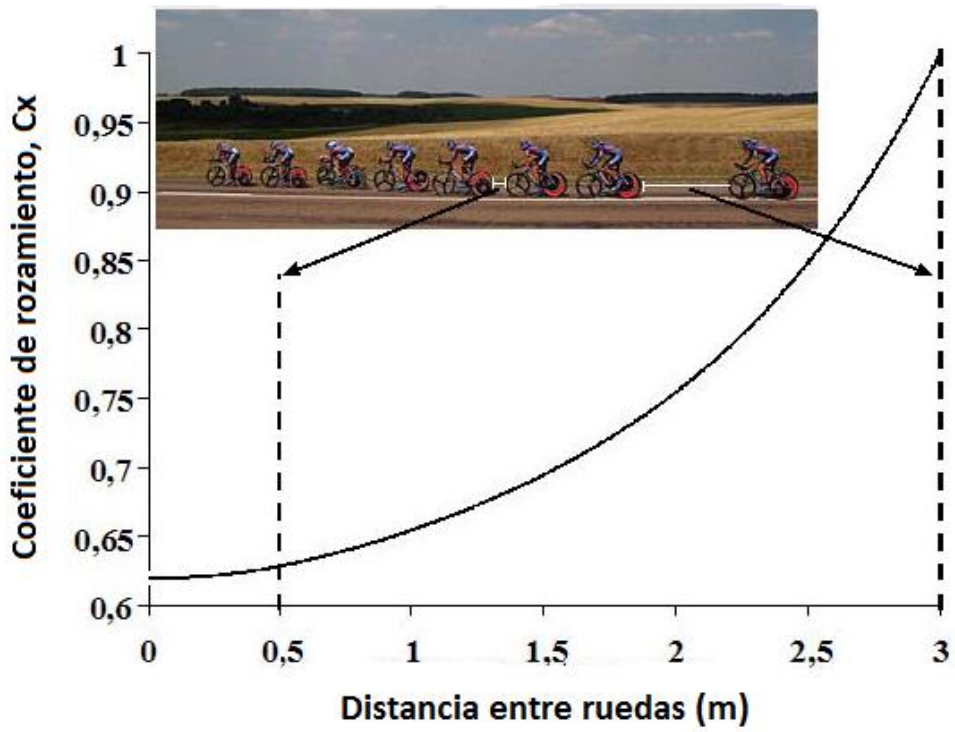


Figura 91. Coeficiente aerodinámico en función de la separación de las ruedas

La disminución de la resistencia aerodinámica también depende del número de ciclistas que preceden al perseguidor, cuando estos no circulan en una sola fila, sino agrupados en un pelotón. A medida que el pelotón es más numeroso las velocidades conseguidas pueden ser mayores si se compara con el mismo desgaste energético pero sin ir a rebufo. Esto se muestra en la siguiente gráfica [39]:

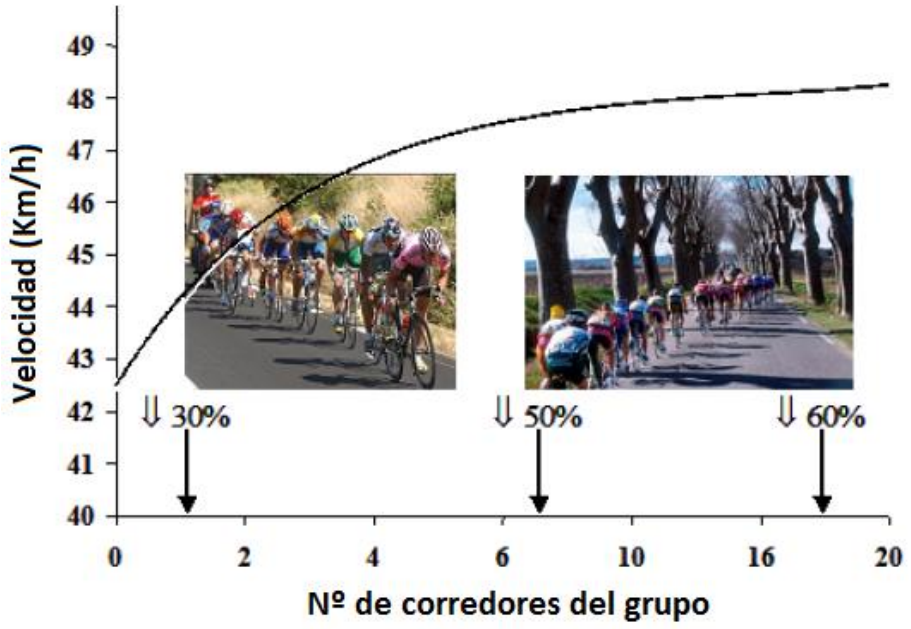


Figura 92. Velocidad media para una misma potencia en función del número de corredores del grupo

Como se puede ver en la gráfica, detrás del líder la resistencia aerodinámica disminuye un 30%, tras unos 7 ciclistas disminuye un 50% y tras unos 18 ciclistas disminuye un 60%. En conclusión, en un pequeño grupo de ciclistas (6 -8) se consigue una gran reducción del rozamiento aerodinámico, sobre un 50%, y la velocidad media alcanzada es claramente mayor que si lo comparas con un grupo de 2 o 3 ciclistas. Sin embargo, en grupos mayores de 6-8 ciclistas la mejora aerodinámica ya no aumenta mucho mayor consiguiéndose unas mejoras cada vez menos apreciables. Este fenómeno explica porque en pelotones grandes los ciclistas alcanzan velocidades medias tan elevadas.

9.4.2.2 *Cálculo de la fuerza de rozamiento del aire (FRa).*

Como se ha explicado en los apartados anteriores, se ha utilizado la siguiente ecuación para el cálculo de la fuerza de rozamiento que provoca el aire.

$$FR_{aire} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot V^2$$

A continuación, se especifica los valores de los parámetros influyentes en este cálculo.

Densidad: 1,225 kg/m3, Área frontal ciclista: 0,6 m2, Cx (adim): 1

El único parámetro que se ha ido variando es la velocidad. La fuerza de arrastre es directamente proporcional a la velocidad a la que se desplaza el conjunto. Si esta es mayor, el rozamiento aumenta considerablemente. Por ejemplo si el ciclista se desplazase a una velocidad de 35 km/h (9.72222 m/s), se obtendría una fuerza de arrastre de 34.7367 N.

$$FR_{aire} = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 0.6 \cdot 1 \cdot 9.72222^2 = 34.7367\ N$$

En la siguiente tabla se observa el cálculo de la fuerza de arrastre para distintas velocidades (tanto para profesionales como para amateurs ya que las condiciones son las mismas).

Velocidad (Km/h)	Fuerza del aire (N)
0	0
5	0,708912037
10	2,835648148
15	6,380208333
20	11,34259259
25	17,72280093
30	25,52083333
35	34,73668981
40	45,37037037
45	57,421875
50	70,8912037
55	85,77835648
60	102,0833333
65	119,8061343
70	138,9467593

Tabla 84. Fuerza de rozamiento del aire según la velocidad

En la gráfica siguiente se puede ver mejor la evolución de la fuerza de rozamiento a medida que aumenta la velocidad.

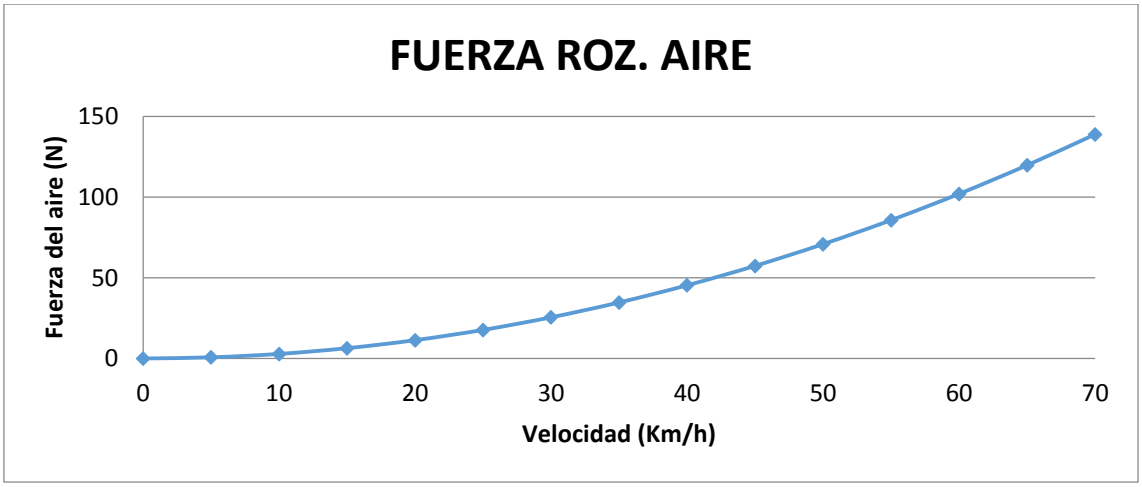


Figura 93. Incremento de la fuerza de rozamiento del aire a mayor velocidad.

Una vez calculada la fuerza de rozamiento ejercida por el aire, se ha procedido a calcular el momento que se ejerce sobre la rueda, al igual que se ha hecho con la fuerza de rozamiento de rodadura.
En este caso el momento opuesto al movimiento es del mismo valor en el caso de los ciclistas profesionales y amateurs.

$$Mr_{rueda} = FR_{aire} \cdot R_{rueda} = 34{,}73668981 \cdot 0.33 = 11.46310764 \text{ N} \cdot \text{m}$$

En la siguiente se encuentran todos los momentos ejercidos por la fuerza del aire para todas las velocidades estudiadas.

Velocidad (Km/h)	Momento del aire (N m)
0	0
5	0,233940972
10	0,935763889
15	2,10546875
20	3,743055556
25	5,848524306
30	8,421875
35	11,46310764
40	14,97222222
45	18,94921875
50	23,39409722
55	28,30685764
60	33,6875
65	39,53602431
70	45,85243056

Tabla 85. Momento del aire según la velocidad

9.4.3 Fuerza de la pendiente.

La fuerza de la pendiente es otra de las fuerzas resistivas más importantes. Cuando un ciclista se desplaza por un sitio llano, debe superar la fuerza resistiva del aire y puede alcanzar una velocidad alta. En el caso de que el tramo no sea llano, la velocidad se reduce considerablemente cuando el deportista empieza subir una pendiente.
La pendiente y la velocidad del conjunto son inversamente proporcionales, cuando existe mucha pendiente, la velocidad es muy baja, y viceversa.
Esta fuerza de la pendiente puede llegar a ser de más del 90% del total de las fuerzas resistivas y su cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$Fp = (m_c + m_b) \cdot 9.81 \cdot sen\ \alpha$$

9.4.3.1 *Parámetros influyentes en la fuerza de rozamiento de la pendiente.*

Como parámetros más influyentes en la fuerza resistiva que ejerce la pendiente destacan el peso del conjunto ciclista-bicicleta y la inclinación de la superficie de la carretera.

9.4.3.1.1 *Peso conjunto ciclista-bicicleta.*

La masa total del ciclista y la bicicleta, junto con la gravedad, hacen que la etapa (si se trata de un puerto de montaña por ejemplo) sea más dificultosa. Es por ello que la masa de la bicicleta juega un papel muy importante, por ello las bicicletas de los deportistas

profesionales son muy poco pesadas. Por otro lado también influye el peso del ciclista, el cual puede favorecer o perjudicar dependiendo de la inclinación de la carretera.

9.4.3.1.2 *Inclinación de la superficie de la carretera.*

El otro factor que influye directamente, es la inclinación de la pendiente de la carretera. No se pedalea del mismo modo cuando se está en llano a cuando se está subiendo una pendiente pronunciada. En el caso de estar en llano, se utilizan marchas largas (plato grande y piñón pequeño), de esta forma se logra a alcanzar una velocidad alta. Por el contrario, si la carretera tiene pendientes (como por ejemplo las etapas de puerto de montaña), se utilizan las marchas más cortas (plato pequeño y piñón grande) con el fin de facilitar el avance de la bicicleta.
En el apartado anterior se ha comentado que el peso del ciclista puede facilitar o perjudicar según el tipo de etapa que se esté realizando.
Los deportistas con menos masa corporal suelen ser mejores en puertos de montaña, ya que al pesar menos, tiene una fuerza de la pendiente menor a los ciclistas más pesados.
En cambio, los deportistas que tienen un mayor peso pueden llegar a lograr mayor velocidad en las bajadas de las pendientes y también suelen ser mejores en etapas de contrarreloj (las cuales son en llano).
En la imagen anterior se puede ver una etapa de puerto de montaña, en donde se aprecia cada pendiente (en porcentaje) de cada tramo de la carrera. Los valores de pendiente situadas en los recuadros son los máximos que tiene esta etapa francesa (Tourmalet).

Figura 94. Etapa Torumalet (Francia). Anotaciones de las pendientes máximas

9.4.3.2 *Cálculo de la fuerza de rozamiento de la pendiente (FRp).*

Como ya se ha comentado en anteriormente, se han fijado diferentes parámetros como la masa del ciclista y de la bicicleta ($m_c = 70\ kg$, $m_b = 6\ kg$). El dato que se ha ido variando es la pendiente a la cual se está trabajando (de 0% a 20%).

Pendiente (%)	F gravedad Profesional (N)	F gravedad Amateur (N)
0	0	0
1	7,455227248	10,79046049
2	14,90821865	21,57768489
3	22,35674173	32,35844198
4	29,79857067	43,12951018
5	37,23148969	53,88768244
6	44,65329628	64,62977092
7	52,06180445	75,3526117
8	59,45484793	86,05306937
9	66,83028324	96,72804153
10	74,18599275	107,3744632
11	81,51988764	117,9893111
12	88,82991068	128,5696076
13	96,11403907	139,112425
14	103,370287	149,614889
15	110,5967081	160,0741828
16	117,791398	170,4875497
17	124,9524965	180,8522975
18	132,0781894	191,1658005
19	139,1667111	201,4255029
20	146,2163457	211,6289214

Tabla 86. Fuerza de la gravedad según pendiente (Amateurs y Profesionales)

A continuación se muestra en una misma gráfica, la fuerza de rozamiento de la gravedad tanto para profesionales como para amateurs con el fin de ver mejor la evolución del rozamiento influyente en cada tipo de sistema ciclista-bicicleta.

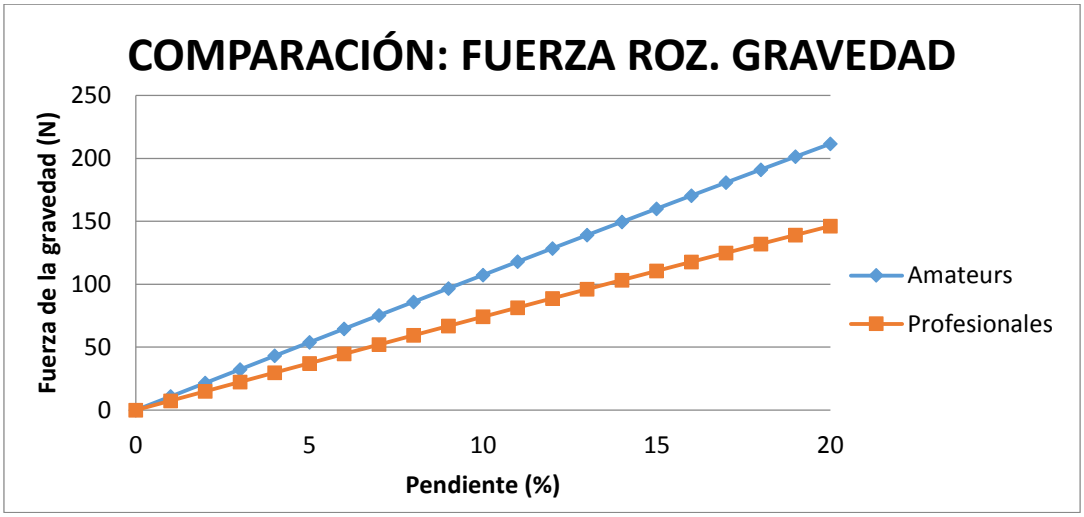


Figura 95. Comparación del efecto de la fuerza de la gravedad entre Amateurs y Profesionales

Los deportistas de élite deben vencer una fuerza resistiva menor ya que el sistema ciclista-bicicleta tiene un menor peso que los amateurs.
Por último se ha calculado también el momento de la pendiente encontrada en la rueda.

$$Mr_{rueda} = FR_{pendiente} \cdot R_{rueda} = 37{,}23148969 \cdot 0.33 = 12.2863916 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Este valor ha sido obtenido con una pendiente del 5%. En la tabla siguiente se muestra los momentos realizados a causa de la fuerza de la pendiente que se encuentra en la rueda.

Pendiente (%)	M gravedad Profesional(N m)	M gravedad Amateur (N m)
0	0	0
1	2,460224992	2,460224992
2	4,919712156	9,839424312
3	7,377724771	22,13317431
4	9,833528322	39,33411329
5	12,2863916	61,43195799
6	14,73558777	88,41352662
7	17,18039547	120,2627683
8	19,62009982	156,9607985
9	22,05399347	198,4859412
10	24,48137761	244,8137761
11	26,90156292	295,9171921
12	29,31387053	351,7664463
13	31,71763289	412,3292276
14	34,1121947	477,5707258
15	36,49691367	547,453705
16	38,87116134	621,9385815
17	41,23432383	700,9835051
18	43,58580251	784,5444452
19	45,92501466	872,5752786
20	48,25139409	965,0278817

Tabla 87. Valores de los momentos de la gravedad Amateurs y profesionales según la pendiente

9.4.4 Fuerza de rozamiento mecánico.

Por último, existe la fuerza de rozamiento mecánica debida a la fricción de los cojinetes que se encuentran en las dos ruedas, en la biela y en los pedales; y a la fricción de la cadena de la bicicleta. Su cálculo es bastante complejo ya que no se puede separar la fuerza de rozamiento que ejerce cada una de las partes comentadas. No obstante, algunos estudios afirman que la fuerza resistiva producida en la cadena es del 2.4% de la fuerza de rozamiento total; mientras que el rozamiento en los cojinetes es de tan solo el 1%. Con estos valores, se puede decir que la fuerza proveniente del rozamiento mecánico es despreciable.

Figura 96. Elementos que generan el rozamiento mecánico

En la siguiente imagen se muestra un esquema de la relación de transmisión con cada uno de sus componentes, en donde se produce parte del rozamiento mecánico.

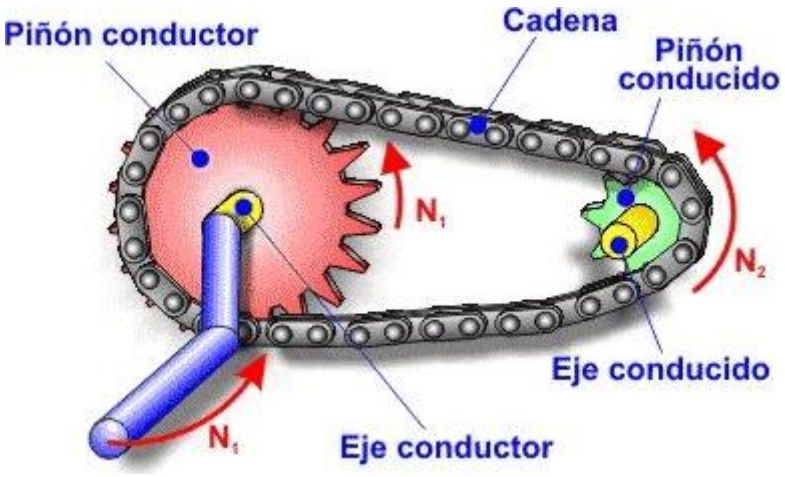


Figura 97. Elementos de la relación de transmisión: lugar donde se produce rozamiento mecánico

9.4.5 Sumatorio de las fuerzas y momentos de rozamiento.

Todas las fuerzas resistivas comentadas anteriormente afectan al desplazamiento del ciclista intentando impedir su movimiento. Todas ellas sumadas hacen que cueste más avanzar. Siempre hay que tener en cuenta las condiciones con las cuales se está realizando ejercicio físico. No afecta de igual forma una bicicleta de 6 kg que una de 10 kg, o no es lo mismo cuando se afronta una pendiente del 15% a cuando se va en llano. Todos estos parámetros se deben tener en cuenta.

En este proyecto se realizó este sumatorio con dos variables: la pendiente de la superficie de la carretera y la velocidad del sistema ciclista-bicicleta. En la tabla que se muestra a continuación, hay diferentes ejemplos de este sumatorio de fuerzas opuestas al movimiento, todas ellas a distintas pendientes y velocidades.

Pendiente (%)	FR rodadura (N)	FR gravedad (N)	FR aire (N)		FR Total (N)
0	3,7278	0	20 km/h	11,3427273	15,07052727
			40 km/h	45,370303	49,09810303
			60 km/h	102,083333	105,8111333
5	3,72314897	37,2314897	20 km/h	11,3427273	52,29736594
			40 km/h	45,370303	86,3249417
			60 km/h	102,083333	143,037972
10	3,70929964	74,1859928	20 km/h	11,3427273	89,23801967
			40 km/h	45,370303	123,2655954
			60 km/h	102,083333	179,9786257
15	3,68655694	110,596708	20 km/h	11,3427273	125,6259923
			40 km/h	45,370303	159,6535681
			60 km/h	102,083333	216,3665984
20	3,65540864	146,216346	20 km/h	11,3427273	161,2144816
			40 km/h	45,370303	195,2420574
			60 km/h	102,083333	251,9550877

Figura 98. Fuerzas de rozamiento según pendiente y velocidad

A medida que la pendiente aumenta, aumenta también la fuerza de rozamiento total. Del mismo modo, al incrementar la velocidad, obtenemos más resistencia. En la siguiente gráfica se observa el incremento de la fuerza resistiva total a medida que aumenta los dos parámetros comentados.

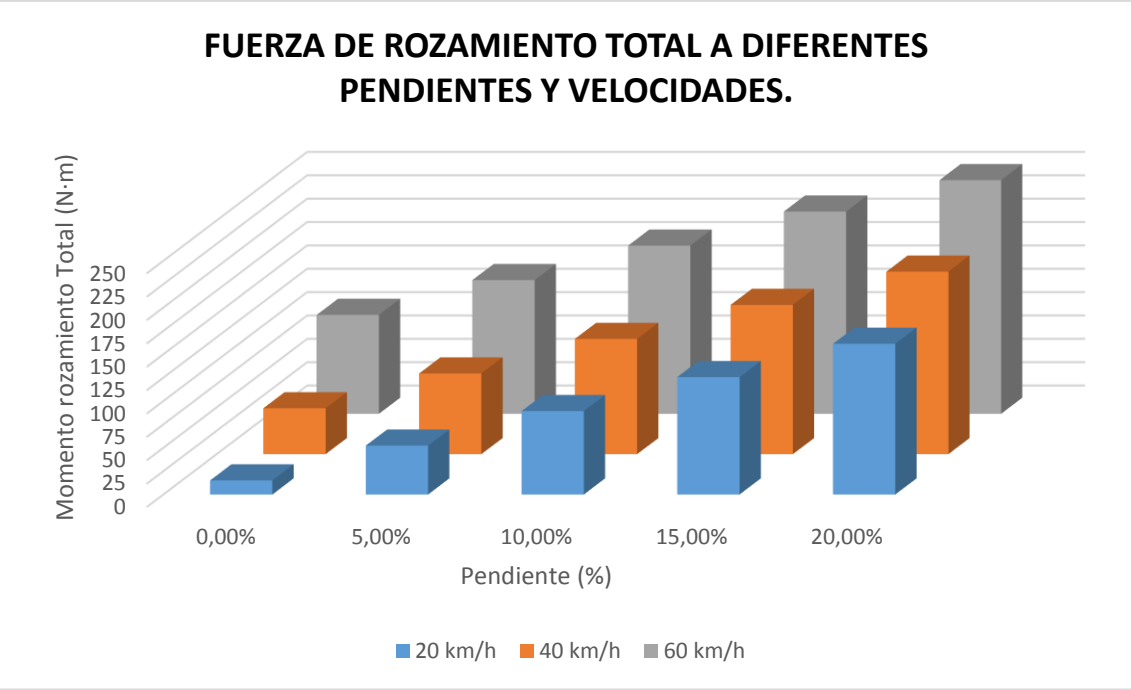


Figura 99 . Evolución de las fuerzas de rozamiento según pendiente y velocidad

La siguiente tabla muestra los momentos ejercidos por las fuerzas resistivas en la rueda. Los valores extraídos son proporcionales a los de las fuerzas. La progresión de la gráfica sería la misma que en la anterior por con los valores del momento.

Pendiente (%)	M rodadura (N m)	M gravedad (N m)	M aire (N m)		M Total (N m)
0	1,230174	0	20 km/h	3,7431	4,973274
			40 km/h	14,9722	16,202374
			60 km/h	33,6875	34,917674
5	1,22863916	12,2863916	20 km/h	3,7431	17,25813076
			40 km/h	14,9722	28,48723076
			60 km/h	33,6875	47,20253076
10	1,22406888	24,4813776	20 km/h	3,7431	29,44854649
			40 km/h	14,9722	40,67764649
			60 km/h	33,6875	59,39294649
15	1,21656379	36,4969137	20 km/h	3,7431	41,45657746
			40 km/h	14,9722	52,68567746
			60 km/h	33,6875	71,40097746
20	1,20628485	48,2513941	20 km/h	3,7431	53,20077894
			40 km/h	14,9722	64,42987894
			60 km/h	33,6875	83,14517894

Tabla 88. Momentos de rozamiento según pendiente y velocidad

9.5 Potencia obtenida.

Como consecuencia de las fuerzas realizadas en los pedales se generan diferentes momentos en diversos puntos de la bicicleta. Además de estos momentos, se puede obtener la potencia generada por el ciclista. Esta potencia ha sido calculada a raíz de obtener el momento ejercido en la biela y la cadencia, a la cual se está trabajando.
Se ha calculado de la siguiente forma:

$$P = M_{biela} * w_1$$

Siendo:

Mbiela: Momento generado en la biela (N·m).
w1: cadencia realizada en los pedales y la biela (rad/s).

La potencia total es la suma de la potencia obtenida por ambas piernas. El cálculo siguiente corresponde a la potencia total máxima de las dos piernas.

$$P_{Total} = P_{1ªpierna} + P_{2ªpierna} = \left(M_{1ªpierna} + M_{2ªpierna}\right) * w_1 =$$
$$= [79.63700378 + (-17.25030755)] * 80 * \frac{2\pi}{60} = 522.6495642\ W$$

9.5.1 Obtención de las curvas de Par – Velocidad.

Después de haber realizado el estudio de fuerzas que ejerce el ciclista y los momentos que como consecuencia se transmiten a través de las diferentes partes de la bicicleta, se ha procedido a obtener las curvas de par-velocidad que puede lograr el deportista.

Dependiendo de la relación de transmisión que se utilice y de la cadencia a la que se pedalee se obtiene un par u otro. En las dos siguientes gráficas se muestra los valores del par máximo y par medio, la velocidad a la que avanza la rueda de la bicicleta y todas las posibles relaciones de transmisión existentes en el caso de la bicicleta estudiada. Todo ello para una cadencia de 70 rpm.

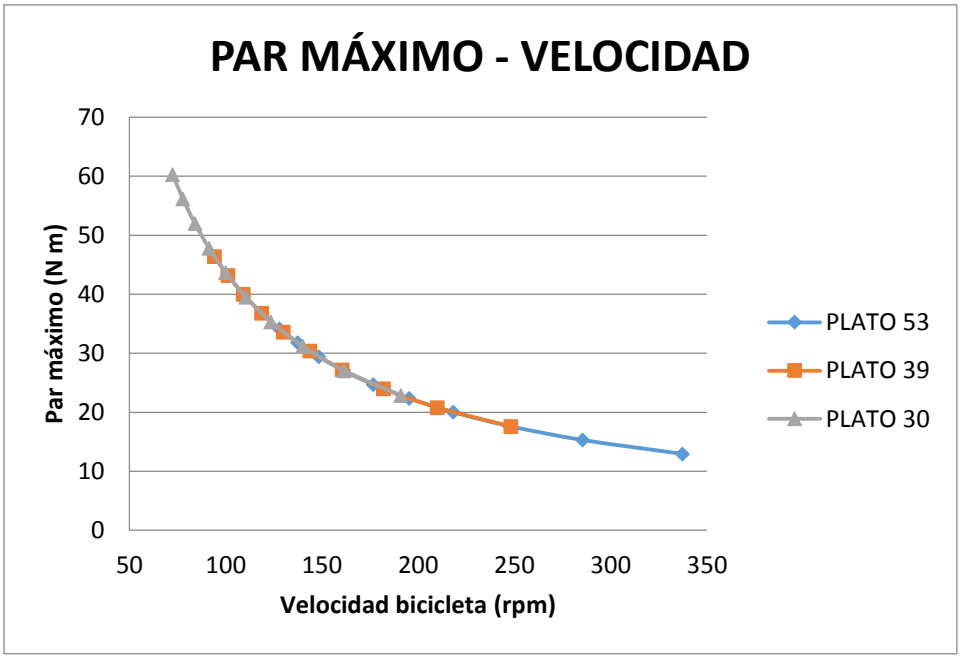


Figura 100. Evolución del par máximo y la cadencia según la relación de transmisión utilizada

Utilizando el plato más pequeño (30 dientes), se logra conseguir los valores más grandes de par siendo el máximo de 60,30714 N m. Este valor máximo tiene lugar cuando se utiliza el plato pequeño y el piñón más grande. Esta relación de transmisión es la más idónea para subir pendientes. En cambio, si no se suben cuestas no se utiliza este juego de plato-piñón, ya que se hace mucho esfuerzo y no se logra gran velocidad de la bicicleta. El valor del par mínimo, utilizando este plato es de 7,542213 N m, que tienen lugar cuando se utiliza también el piñón más pequeño.

Si se utiliza el plato más grande (53 dientes), no se llega a lograr un par tan elevado como en el caso anterior, siendo el valor máximo de 34, 13612 N m (con el piñón más grande: 29 dientes) y el valor mínimo de 4,269177 N m (con el piñón más pequeño: 11 dientes).

No obstante, se puede lograr ir a una velocidad mucho mayor. Esta relación (plato grande-piñón pequeño: 53-11) es la más idónea para ir en llano y lo que se quiere conseguir es ir a la máxima velocidad.

Por último, se muestra el rango de trabajo del plato mediano; con un valor máximo de par de 46,39011 N m y un par mínimo de 5,801702 N m. Como se puede ver en la gráfica, el rango de trabajo del plato mediano se solapa hacia la izquierda con el plato pequeño y hacia la derecha con el plato grande. Es por esta razón que muchas bicicletas disponen de sólo dos platos, y así aligerar un poco el peso de esta. Si se eliminase este plato mediano, la gráfica de Par – Velocidad quedaría de la siguiente manera:

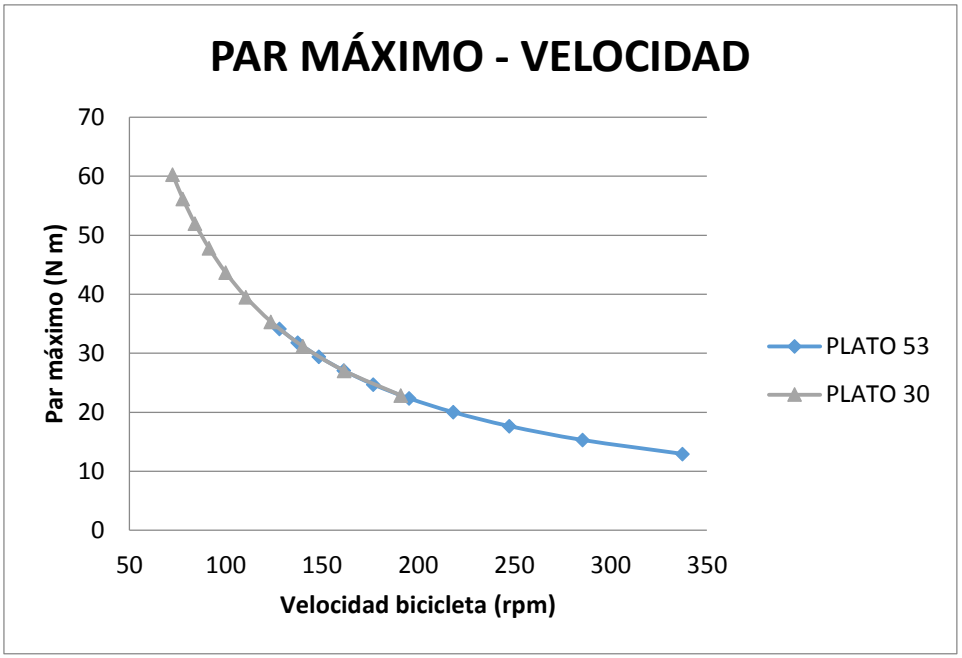


Figura 101. Evolución del par máximo y velocidad con los dos platos más importantes

Aunque se ha comentado los valores máximos de par que llegan a lograr las distintas relaciones de transmisión, otro factor aún más importante es el valor medio de par a la que se trabaja. Ya que el par máximo solo se va a dar en algunos casos, mientras que el par medio representa los valores con los que normalmente se trabaja.

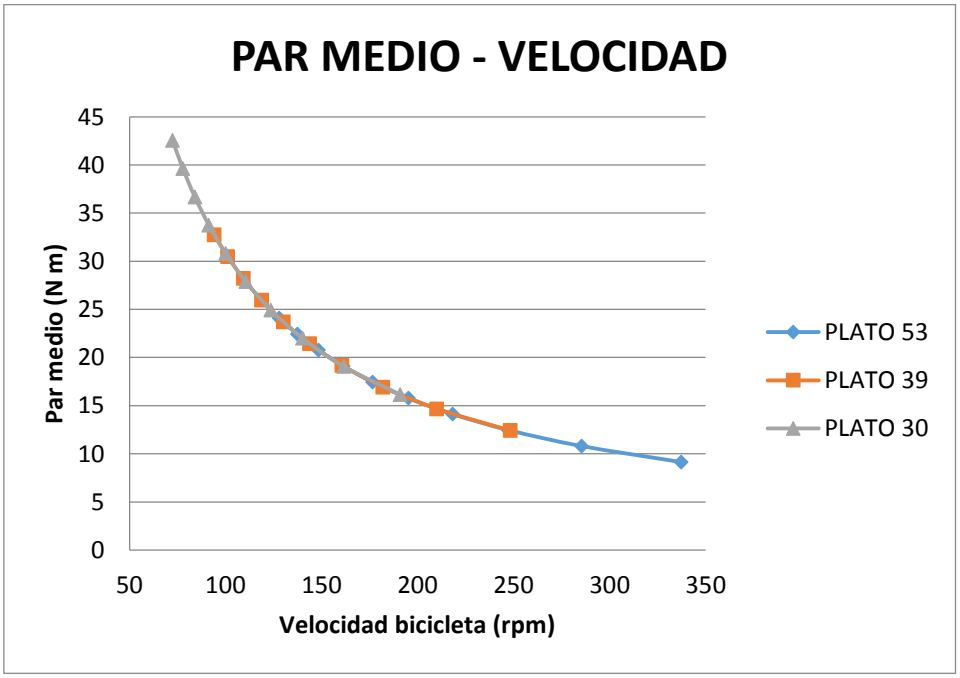


Figura 102. Evolución del par medio y la velocidad según la relación de transmisión utilizada

Como se puede ver en la gráfica, los valores máximos de este par medio corresponden a la utilización del plato pequeño. El valor del par conseguido con este plato va desde los 16,14545 N m a los 42,56527 N m.
Los valores mínimos corresponden al uso del plato grande, desde los 9,138933 N m hasta los 24,09355.

Finalmente, los valores de par correspondientes al plato mediano se encuentran entre los valores antes comentados; desde los 12,41958 N m hasta los 32,74252 N m.

9.5.1.1 *Gráficas de Par Máximo - Velocidad y Par Medio - Velocidad a diferentes cadencias.*

Las gráficas comentadas en el apartado anterior, correspondían al par máximo y medio, y a la velocidad de la bicicleta cuando se estaba pedaleando a una cadencia de 70 rpm. No obstante, este proceso se ha realizado para cadencias de 100, 70 y 50 rpm.
Con esta variación de cadencias se obtiene las siguientes gráficas.

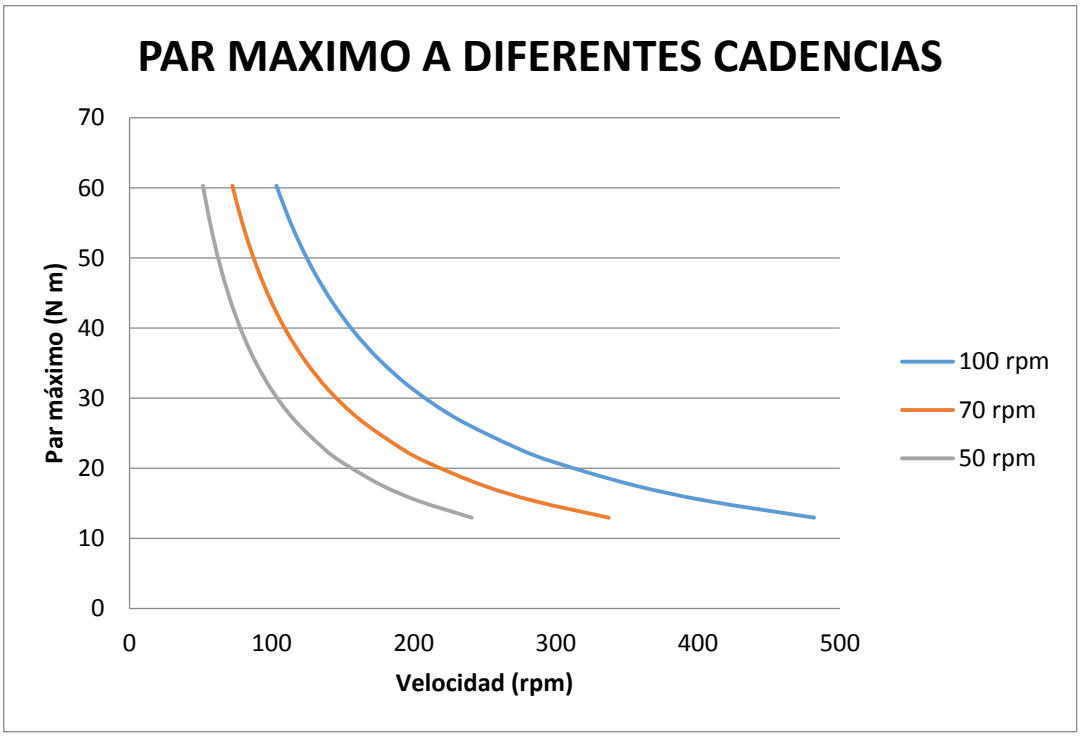


Figura 103. Evolución del par máximo a distintas cadencias

En la gráfica se observa que para las tres cadencias se consiguen los mismos valores de par máximo. La única diferencia es que no se llega a conseguir la misma velocidad. Si se pedalea a mayor cadencia, mayor será la velocidad de la bicicleta. Si se pedalea a menos cadencia, se obtiene menor velocidad.
Del mismo modo que ocurre con el par máximo, el par medio conseguido por las distintas relaciones de transmisión posibles es el mismo. En la siguiente gráfica se muestra los valores de par medio para distintas cadencias.

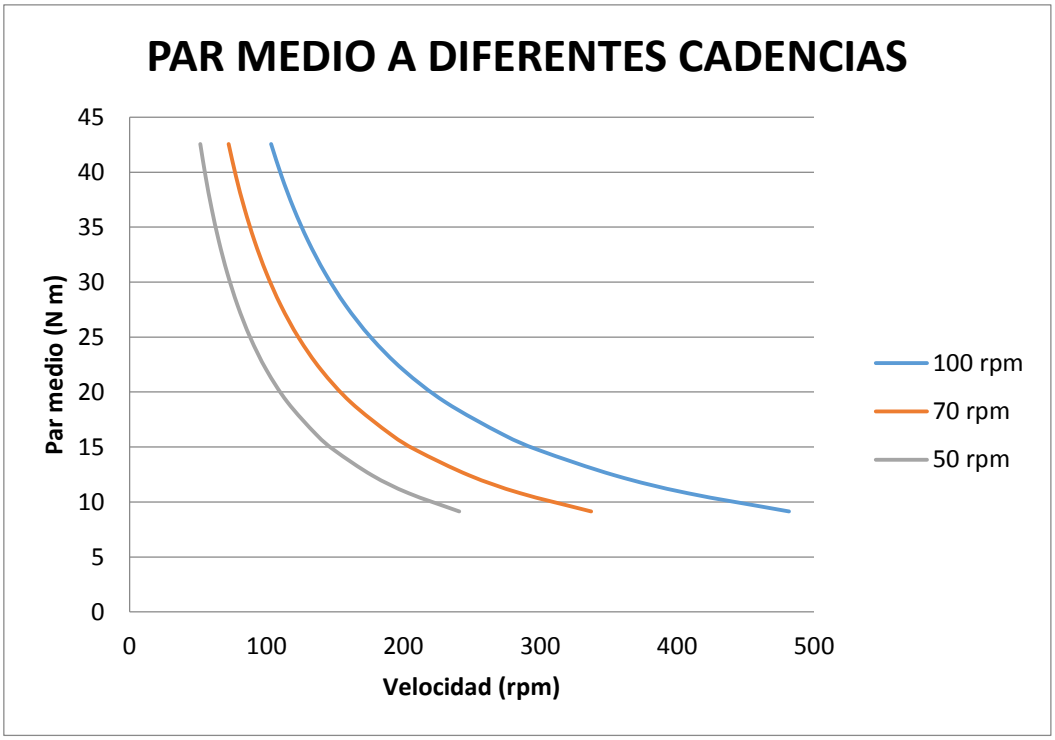
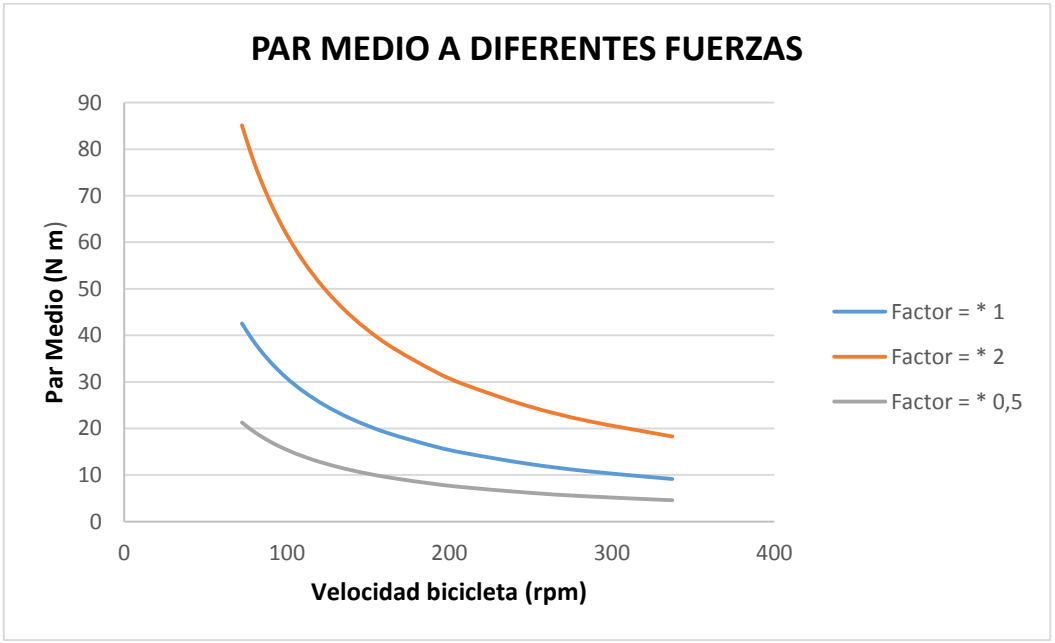


Figura 104. Evolución del par medio a distintas cadencias

9.5.1.2 *Curvas de Par Medio – Velocidad a diferente fuerza.*

En este apartado se ha mantenido una cadencia de 70 rpm. No se ha variado la cadencia. Lo que se ha variado es la fuerza ejercida.
A continuación se muestra una gráfica con el par medio y la velocidad de la bicicleta.



Se observa que al cambiar la fuerza del pedaleo, se obtienen diferentes pares para una misma velocidad. Cuando se aumenta la fuerza, aumenta también el par y por lo tanto también la potencia.

9.6 Rangos de trabajo.

En este apartado se van a acotar las zonas de trabajo de los dos tipos de ciclistas, en las cuáles deberá conseguir trabajar el motor. Existe una diferencia entre ciclistas amateurs y profesionales. Por lo tanto, los rangos de trabaja para cada uno de ellos son diferentes.

9.6.1 Cadencia.

Dependiendo de si se trata de un ciclista amateur o profesional, se trabaja a una cadencia mayor o menor.
En el primer caso, los ciclistas amateurs trabajan en un rango de 50 – 120 rpm; mientras que los profesionales pedalean entre 70 y 125 rpm.

9.6.2 Potencia.

En el caso de la potencia existen diferencias bastante significativas. Mientras que los ciclistas amateurs consiguen potencias más bajas, entre 100 y 600 W, los profesionales llegan a conseguir potencias superiores en un rango de 150 y 1100 W.

Sabiendo el intervalo de cadencia y de potencias en el que se trabaja, se puede acotar una zona que determinará el rango de trabajo. En el caso de amateurs se obtiene el siguiente rango de trabajos.

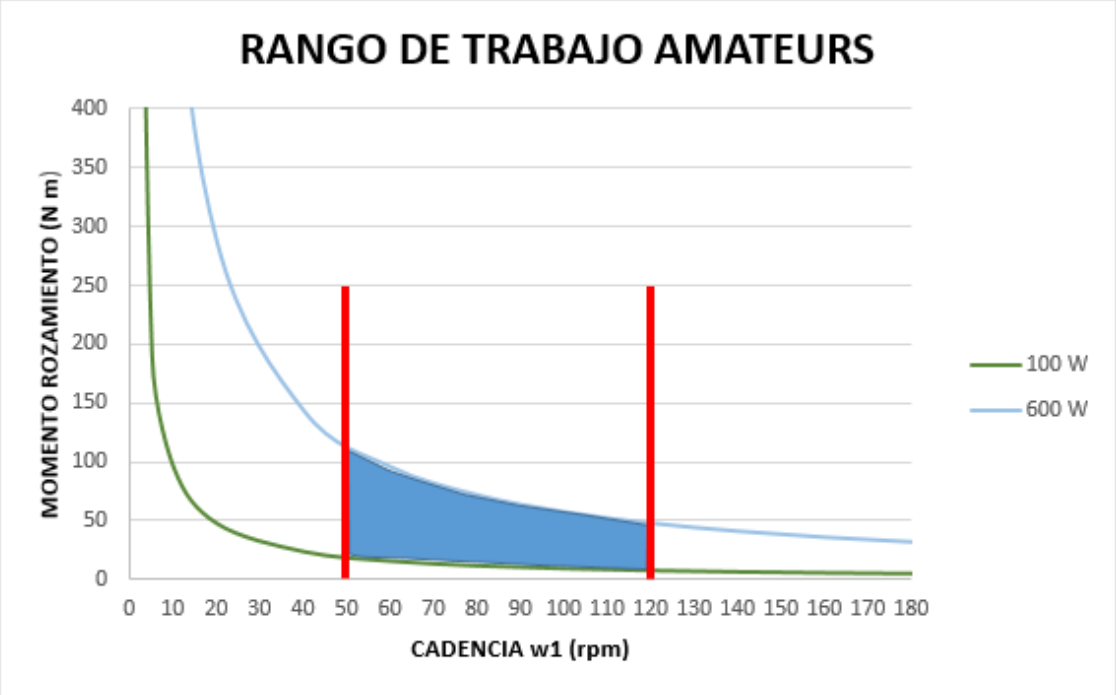


Figura 105. Rango de trabajo para ciclistas amateurs

Teniendo una cadencia mínima de 50 rpm y una máxima de 120 rpm, y con las curvas de potencia de 100 y 600 W, se ha delimitado la zona en la que el ciclista amateur va a desarrollar su actividad física.

En el caso de los ciclistas profesionales se obtiene la siguiente gráfica:

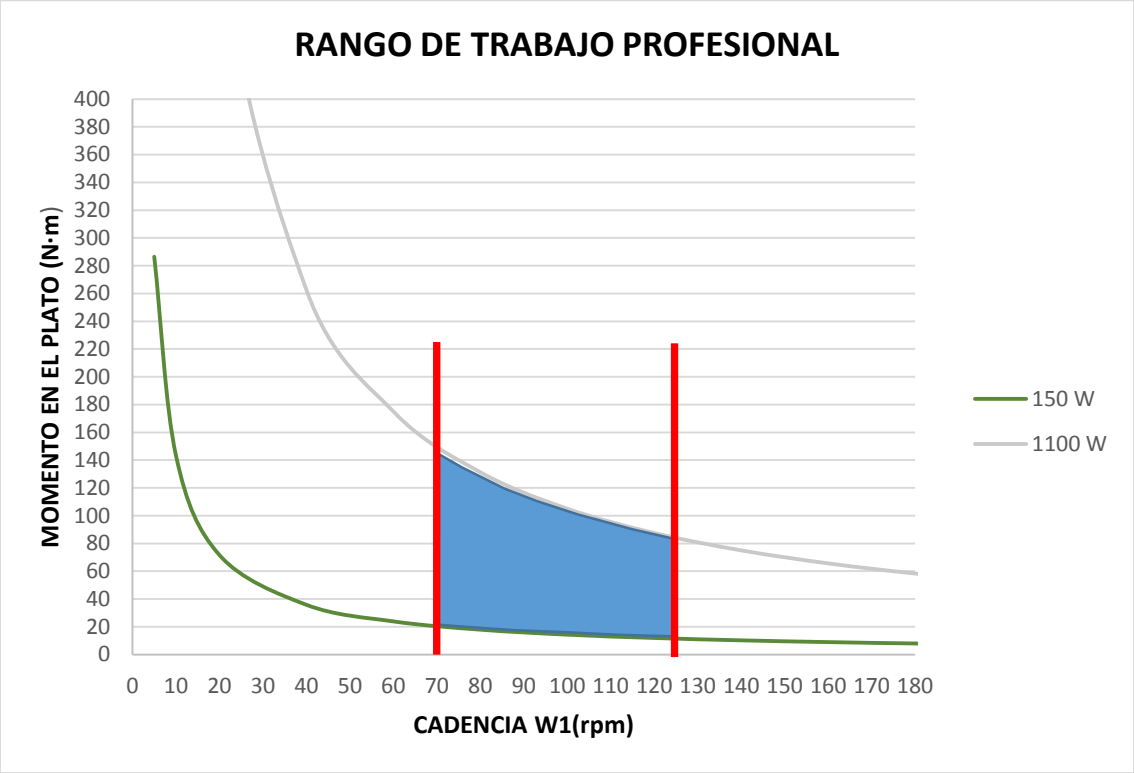


Figura 106. Rango de trabajo para ciclistas profesionales

Teniendo la cadencia entre 70 y 125 rpm y unas potencias de 150 W de mínimo y 1100 W como máximo, se delimita la zona de trabajo en la que el ciclista profesional va desarrollar su entrenamiento.

9.6.3 Fuerzas de rozamiento - relación de transmisión.

El rango de trabajo puede acotarse de forma más precisa si se tiene en cuenta las condiciones con las que se vencen las fuerzas de rozamiento, las cuales tienen diferente magnitud dependiendo de qué relación de transmisión se utilice.
Bajo unas mismas condiciones de rozamiento, el ciclista las superará con mayor o menor facilidad según el juego plato-piñón que utilice.
En las dos siguientes gráficas se muestran las cargas contrarias al movimiento con dos relaciones de transmisión distintas. Estas cargas están calculadas para las condiciones de un ciclista amateur:

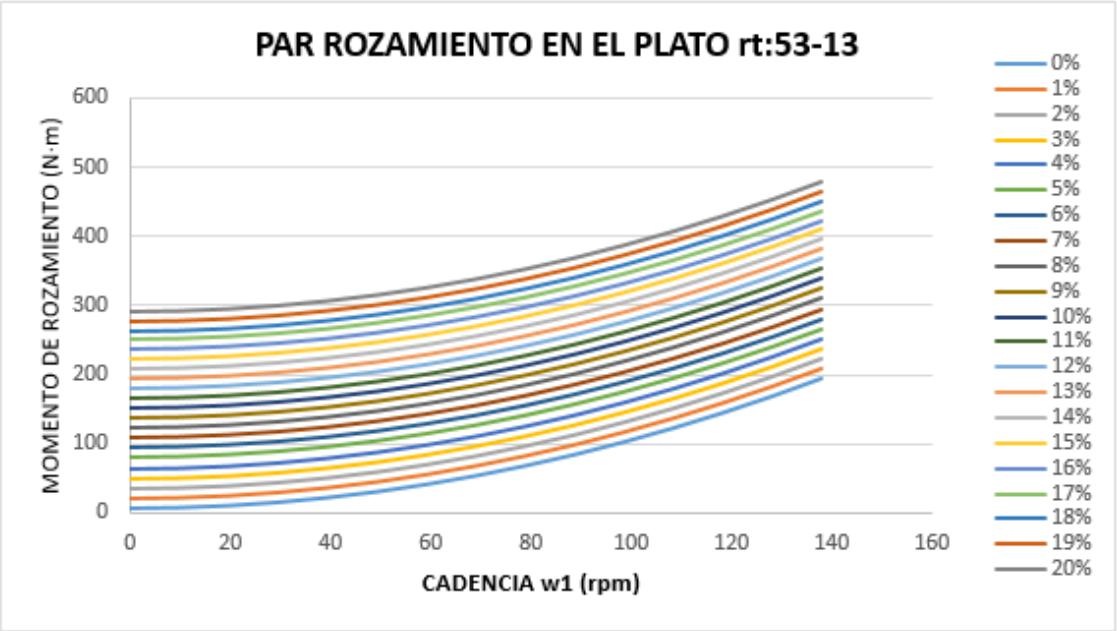


Figura 107. Efecto de las Curvas de carga (sumatorio de los momentos de rozamiento) utilizando una relación de transmisión plato 53 dinentes y piñón 13 dientes

La relación de transmisión correspondiente a esta primera gráfica pertenece a la utilización del plato grande de 53 dientes y el piñón de 13 dientes. Las diferentes líneas paralelas corresponden a las distintas condiciones de rozamiento con la única diferencia de una variación en la pendiente. Cuando se trata de una pendiente del 0% y la cadencia es de 60 rpm, el momento de rozamiento total es de 63,81018 N m. En cambio, con esta misma cadencia, pero con una pendiente del 20%, el momento de rozamiento aumenta hasta los 400,13357 N m.

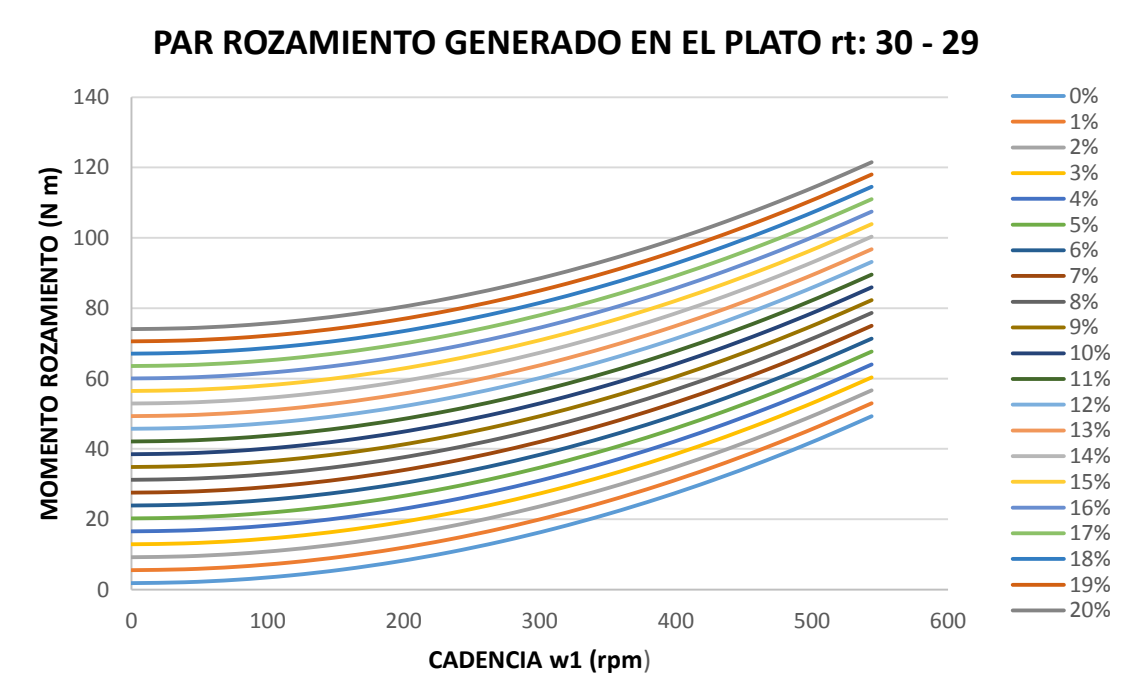


Figura 108. Efecto de las Curvas de carga (sumatorio de los momentos de rozamiento) utilizando una relación de transmisión: plato 30 dientes y piñón 29 dientes

En esta segunda gráfica, se muestran las cargas opuestas al movimiento cuando se está utilizando una relación de transmisión menor compuesta por el plato pequeño (30 dientes) y el piñón de 29 dientes. . Cuando se trata de una pendiente del 0% y la cadencia es de 300 rpm, el momento de rozamiento total es de 17,3304 N m. En cambio, con esta misma cadencia, pero con una pendiente del 20%, el momento de rozamiento aumenta hasta los 89,54038 N m.

Estas cargas calculadas vienen en función de unos parámetros de entrada los cuales varían según ciertas condiciones, como por ejemplo, la masa del ciclista, el área frontal del conjunto ciclista-bicicleta con el aire o el tipo de bicicleta, entre otros. Por lo tanto, las cargas son diferentes según si son para ciclistas amateurs o ciclistas profesionales ya que trabajan en distintas condiciones.

Con estas dos gráficas se han obtenido los límites superior e inferior de las cargas de rozamiento para el todo el abanico de engranajes. No obstante, estos límites son casos muy extremos; tan extremos que no son utilizados por los ciclistas ya que sería muy dificultoso subir una cuesta muy pronunciada con un juego de plato grande y piñón pequeño. Por el contrario, cuando se trata del 0% de pendiente, tampoco se rentabilizaría el esfuerzo ejercido en el pedaleo con una relación de plato pequeño y piñón grande.

Con el objetivo de realizar una predicción más realista se ha acotado el rango de trabajo más común y habitual donde se trabaja.

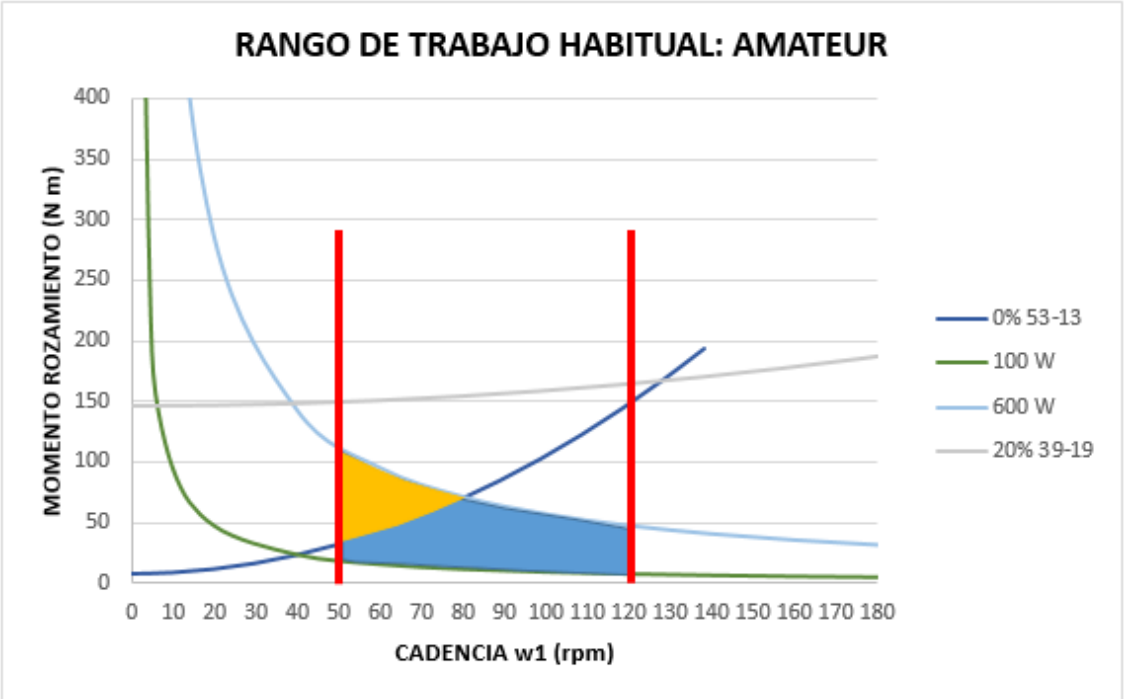


Figura 109. Zona Azul: Rango de trabajo; Zona Amarilla: Zona de Trabajo Habitual (Amateurs)

Para acotar el rango de trabajo más habitual simplemente se ha utilizado un juego de engranajes más acordes para cada situación con el fin de vencer al rozamiento con mayor facilidad. En el caso de terreno llano, pendiente 0%, se ha utilizado un plato grande de 53 dientes y un piñón pequeño de 13 dientes. En estas condiciones, es la mejor combinación ya que lo que se busca es la velocidad. En cambio, para pendientes pronunciadas de un 20%, se ha utilizado el caso contrario, un plato más pequeño de 39 dientes y un piñón más grande de 19 dientes. En estas condiciones lo que se busca es

vencer la pendiente con mayor facilidad sin realizar tanto esfuerzo en el pedaleo, pero por el contrario, la velocidad de avance disminuye.
En la gráfica, la zona de trabajo habitual está marcada en color amarillo y como se puede observar, dicha zona no llega a trabajar en la peor de las condiciones, 20% de pendiente con un juego de engranajes 39-19. Esto es debido a que los ciclistas amateurs no son capaces de generar tan altas potencias y, por lo tanto, no son capaces de llegar a ciertos límites.
En la gráfica siguiente se puede observar el rango de trabajo habitual, en este caso para los ciclistas profesionales.

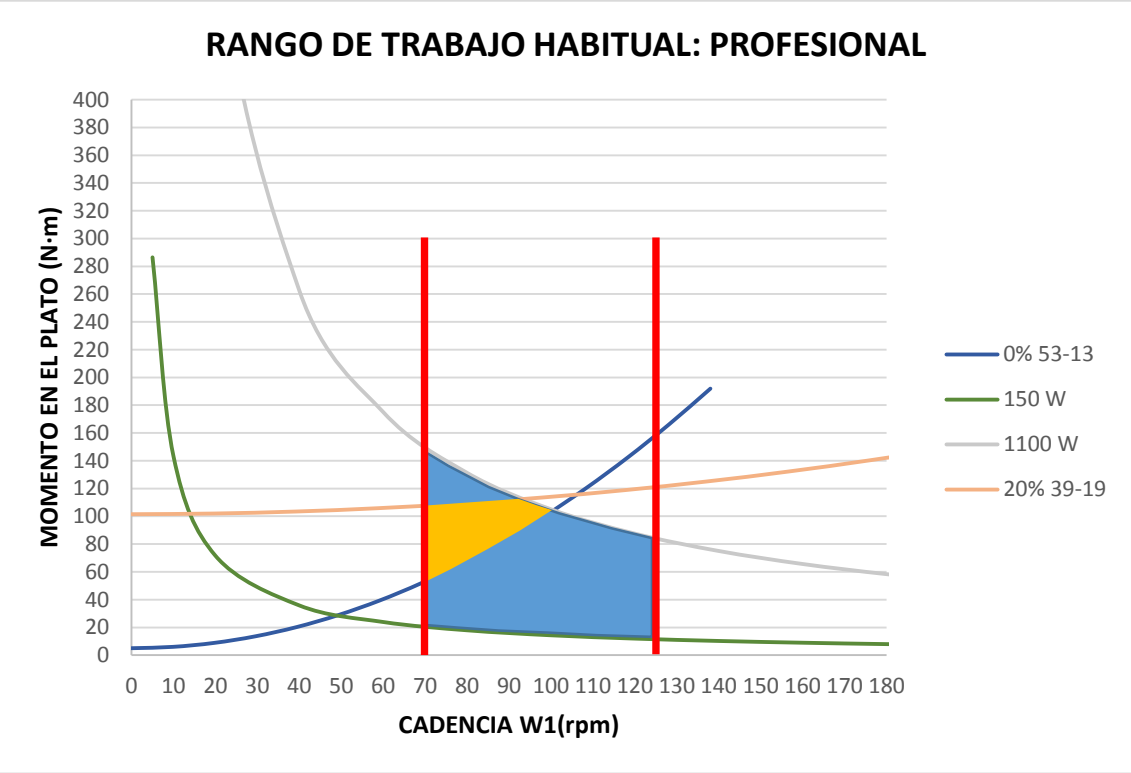


Figura 110. Zona Azul: Rango de trabajo; Zona Amarilla: Zona de Trabajo Habitual (Profesionales)

En este caso los límites son los mismos que los comentados anteriormente, 0% de pendiente con un juego de engranajes de 53-13 dientes y 20% de pendiente con uno de 39-19 dientes. En este caso la zona de trabajo habitual remarcada en color amarillo está acotada por ambos límites. Con esto se puede decir que el ciclista profesional es capaz de trabajar en condiciones más extremas ya que consigue generar una mayor potencia. Llegados a este punto quedan claras las zonas de trabajo para profesionales y amateurs. Estas condiciones son en las que el ciclista se mueve y trabaja para poder vencer los rozamientos existentes. Dichos rozamientos, son los que deberá ser capaz de realizar el motor eléctrico con el objetivo de conseguir un mayor realismo en las clases de spinning.

10 Simulación del sistema mecánico.

10.1 Introducción

El estudio anteriormente realizado permitirá programar diferentes tipos de frenado en el accionamiento; para ello se utiliza un software de simulación que nos permite introducir todos los conceptos anteriormente explicados (pendientes, masas, coeficientes de rozamiento, áreas medidas y dimensiones, velocidades, etc). También esta simulación permitirá observar las formas de onda de muchas de las variables utilizadas y ver el comportamiento dinámico de todo el sistema.
El programa utilizado para la simulación de los diversos elementos mecánicos ha sido Matlab – Simulink.
En primer lugar se muestra el esquema general de la simulación y posteriormente se explica en detalle cada una de las partes que componen dicho sistema.

10.2 Esquema general del sistema.

El sistema se compone de varias partes fundamentales para llevar a cabo la simulación. Estas partes son: el par ejercido por el bloque FRENO FIJO, el cual emula el funcionamiento del motor; el par ejercido por el ciclista, PAR HUMANO; y por último el bloque llamado SISTEMA MECÁNICO, que se encarga de relacionar todas las variables y llevar a cabo la simulación.
Para poder comenzar la simulación se introduce una cadencia inicial en rpm tanto al par de frenada y al par humano como al bloque Sistema Mecánico para que de esta forma se realice los cálculos necesarios para el estudio.

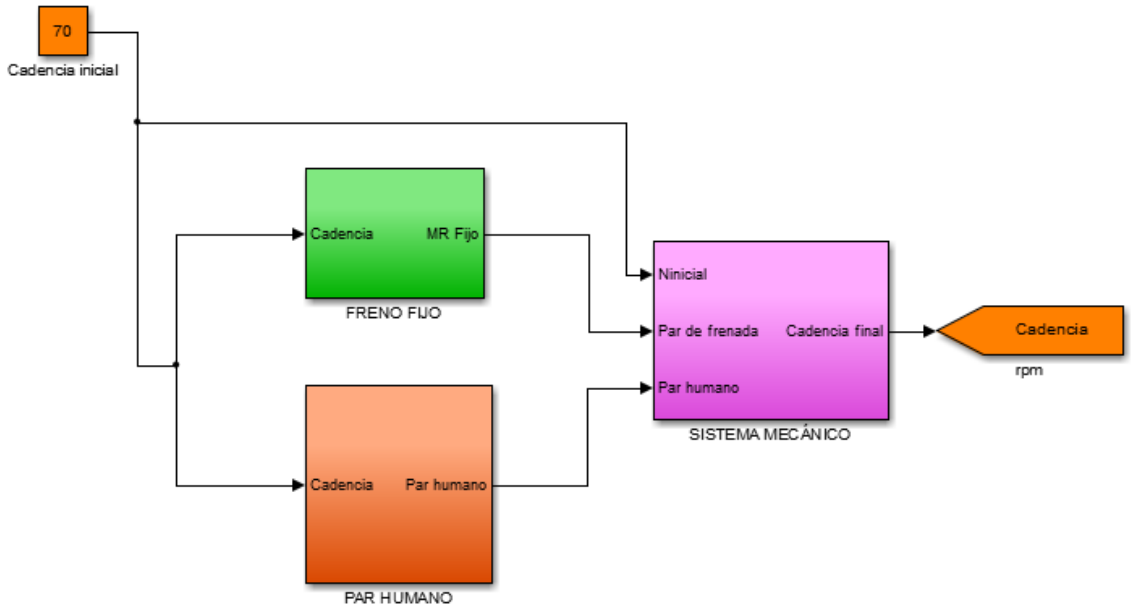


Figura 111. Plano General del sistema de simulación en Matlab - Simulink

A continuación se explica los diferentes bloques que componen el conjunto.

10.2.1 Freno fijo.

El bloque del sistema general llamado Freno Fijo es el encargado de simular el freno ejercido por el motor. Este freno genera un par en sentido contrario al movimiento que realiza el ciclista. Su funcionamiento consiste en proporcionar un par constante a una misma cadencia de entrada.

El sistema utilizado es el siguiente:

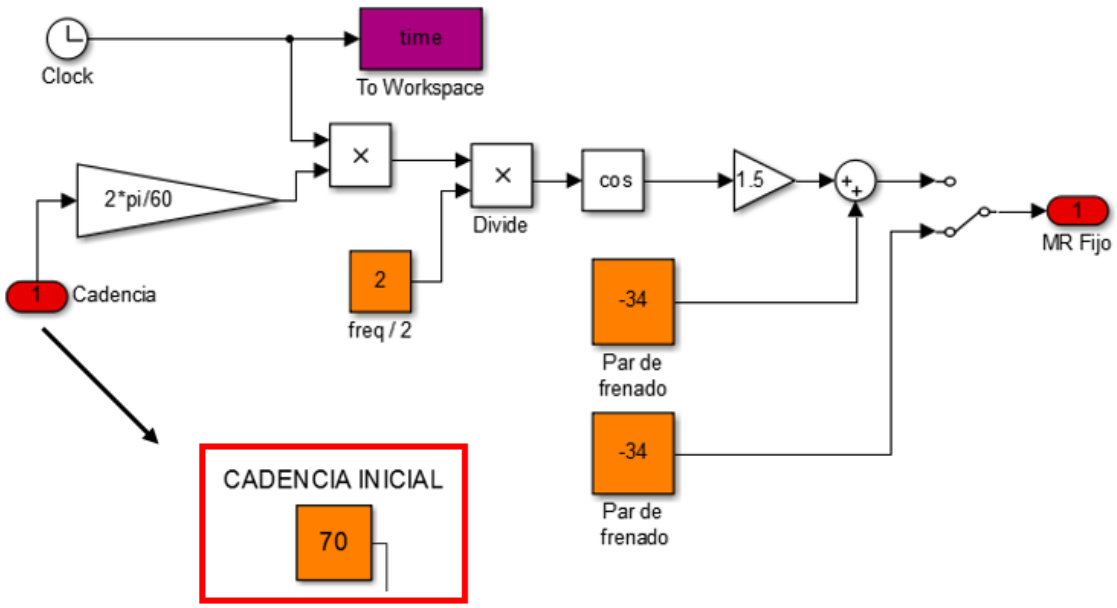


Figura 112. Funcionamiento del bloque: "Freno Fijo"

Este freno tiene dos modalidades de trabajo. En primer lugar se puede introducir un par constante de frenado. En segundo lugar, se puede introducir el mismo par constante pero con forma de onda sinusoidal. Partiendo de una cadencia, la cual proviene de la cadencia inicial del sistema, tal y como se muestra en la imagen, se multiplica por el tiempo para simular un par con una onda sinusoidal. De esta forma, la simulación es más parecida a como trabaja el motor.

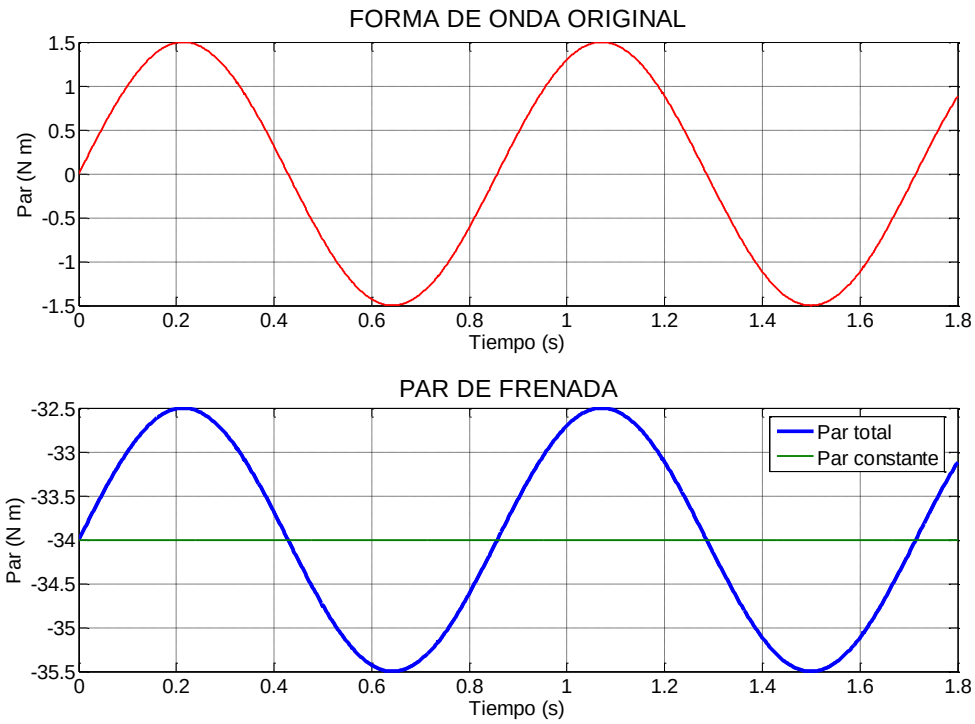


Figura 113. Entrada sinusoidal del par de rozamiento

La primera gráfica hace referencia a la forma de onda con la que trabaja el motor. Es una forma de onda sinusoidal, con una amplitud de 3 N m. En la segunda gráfica se muestra el valor constante de frenado (de 34 N m) y la onda resultante de sumar el par fijo con la forma de onda original. La onda resultante de este sumatorio, tiene la misma distribución que la onda original y con una amplitud de 3 N m, pero desplazada sobre una media de 34 N m.

10.2.2 Par humano.

El bloque denominado Par Humano es el encargado de simular el par realizado por la persona. En su interior se encuentran los siguientes enlaces.

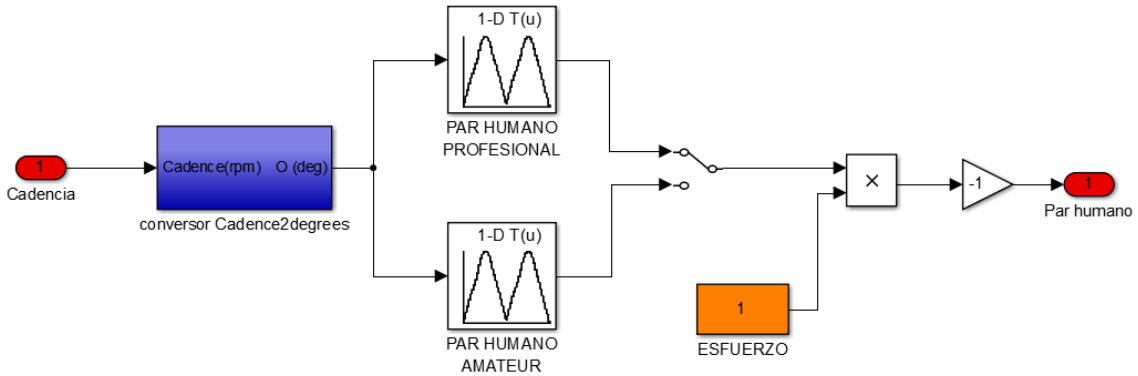


Figura 114. Funcionamiento del bloque: "Par Humano"

Introduciendo una cadencia inicial (rpm) y escogiendo el tipo de deportista (profesional o amateur), el sistema envía los valores de par generados al sistema mecánico.

Dentro de los bloques de Par Humano Profesional y Amateur, se encuentra el cálculo del par de cada uno de ellos. Este cálculo se realiza partiendo de la fuerza generada en el pedal y según la posición y longitud de la biela.

10.2.2.1 *Fuerza generada en los pedales.*

Los valores de par se han extraído tomando como origen la fuerza generada durante un ciclo de pedaleo por el ciclista. En el siguiente sistema se detalla su obtención.

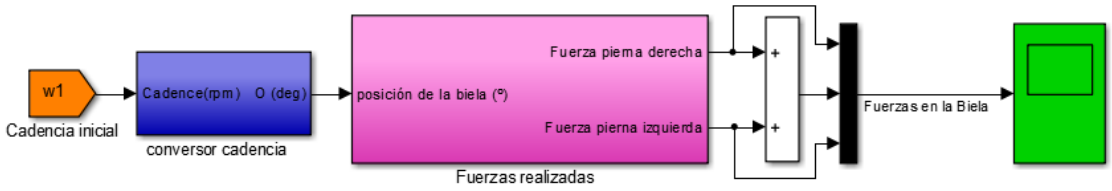


Figura 115. Simulación para la obtención de la fuerza ejercida en los pedales

Teniendo una cadencia inicial en revoluciones por minuto, y dada una distribución de fuerzas en el pedal durante un ciclo de pedaleo, se obtienen la gráfica con las fuerzas de cada pierna y el sumatorio de ambas.

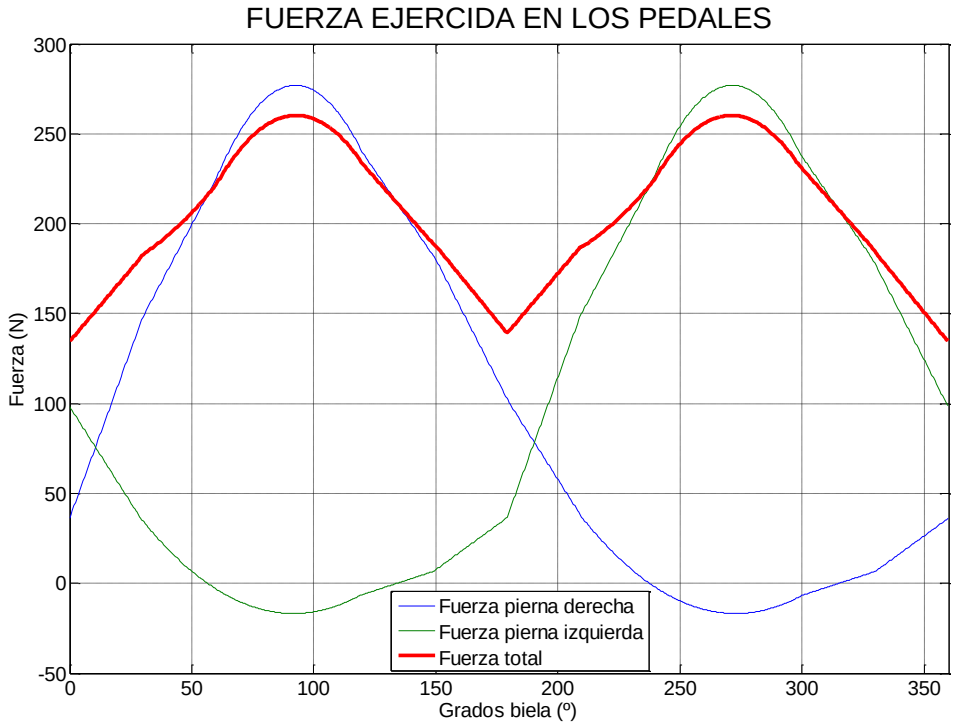


Figura 116. Evolución de la fuerza ejercida en los pedales, según la posición de la biela: Gráfica obtenida en Simulink.

Como se puede observar, cada pierna realiza la misma fuerza en todo el ciclo de pedaleo. Cuando el pedal se encuentra en la fase descendente del ciclo, se realiza más fuerza que en la fase ascendente, es por ello que el sumatorio de estas fuerzas es positivo, marcado en rojo. El valor máximo de la fuerza generada, en el caso de un profesional, es de 260,23 N, el mínimo es 134,53 N y la media resultante es 205,72 N.

10.2.2.1.1 *Variación de la fuerza según el rendimiento de cada pierna.*

Es muy común que el ciclista pedalee con mayor fuerza en una pierna que otra, sobretodo en ciclistas amateurs. Para simular esto solo es necesario multiplicar la fuerza de una de las piernas por un factor correctivo.

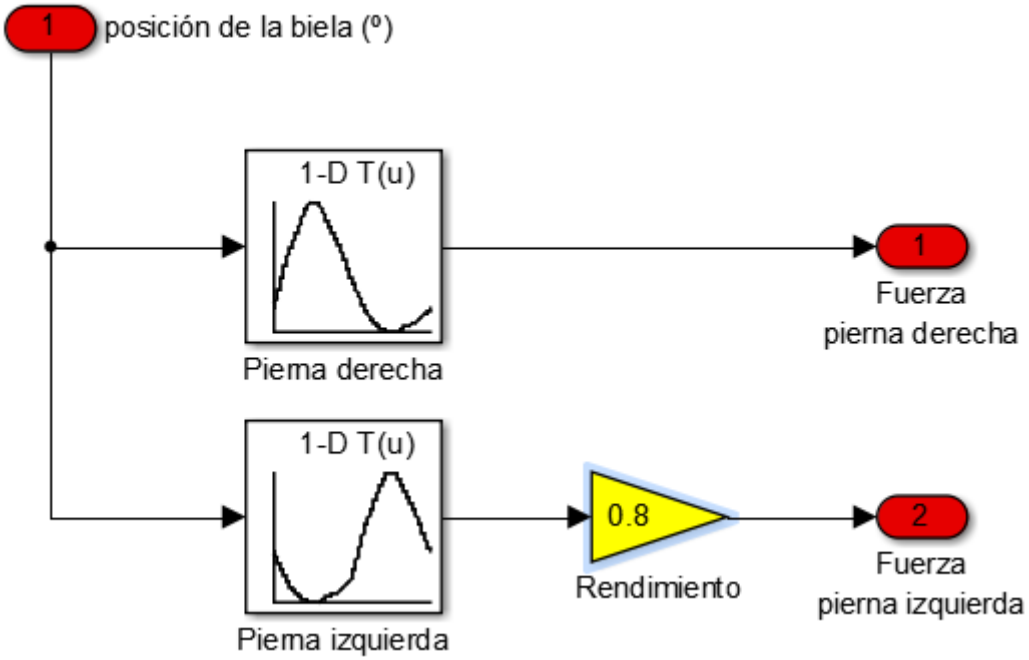


Figura 117. Simulación de la variación del rendimiento de una pierna

Suponiendo que con la pierna izquierda tan sólo se llegue a conseguir el 80% de la fuerza total que se hace con la pierna derecha, se obtiene una variación respecto a la anterior gráfica.

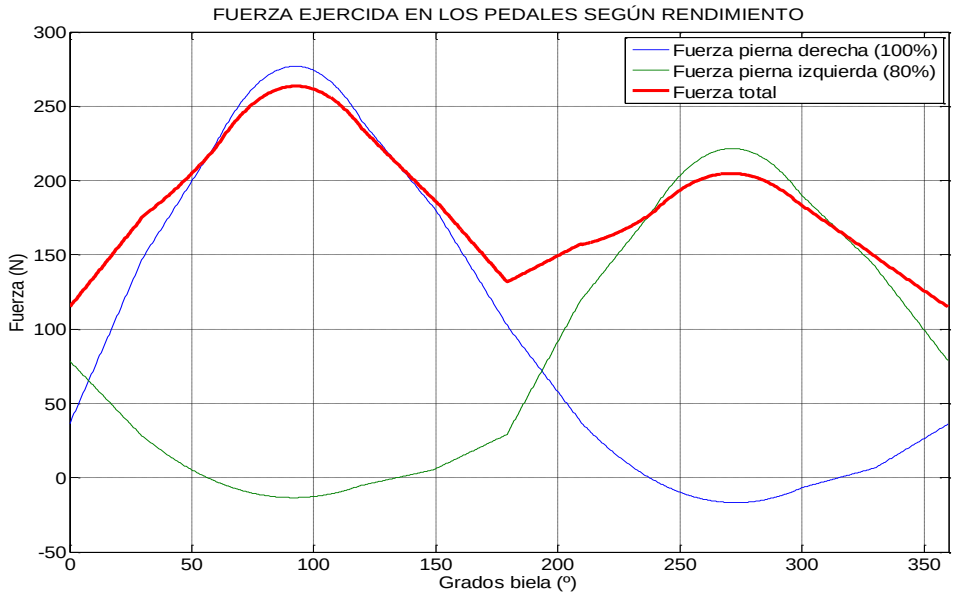


Figura 118. Evolución de la fuerza ejercida en los pedales, según la posición de la biela y según el rendimiento: Gráfica obtenida en Simulink.

Se puede observar la diferencia con respecto a la gráfica anterior, en la cual ambas pierna tenían el máximo rendimiento. En este caso, una de las piernas ejerce menos fuerza durante todo el ciclo, siendo más visible esta diferencia durante la fase descendente.
El valor máximo de la fuerza total generada es de 263,55 N, el mínimo es de 114,89 N y el valor medio es de 185,13 N.

10.2.2.1.2 *Comparativa de la fuerza total según el rendimiento de las piernas.*

Realizando la simulación correspondiente, se obtiene la fuerza ejercida por el ciclista según el rendimiento de cada pierna.

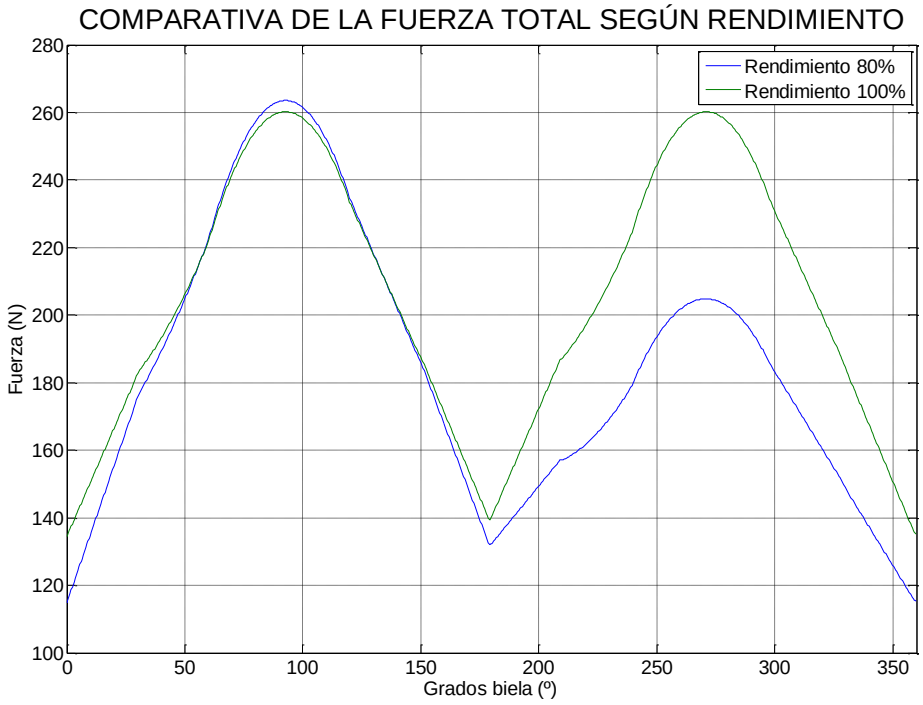


Figura 119. Comparativa de fuerzas según el rendimiento de cada uno: Gráfica obtenida en Simulink

Como se puede observar, existe una acentuada diferencia entre las fuerzas resultantes según el rendimiento, sobretodo, en una mitad del recorrido de la biela.

10.2.2.2 *Par humano ejercido en la biela.*

Para encontrar el par total generado por el ciclista simplemente hay que multiplicar la fuerza resultante de ambas piernas por la longitud de la biela. Contra más larga es la biela mayor es el par que se genera.

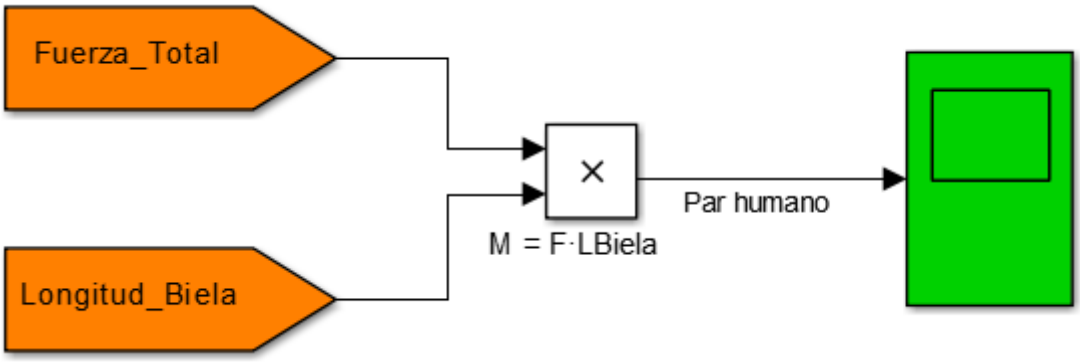


Figura 120. Sistema para el cálculo del par humano

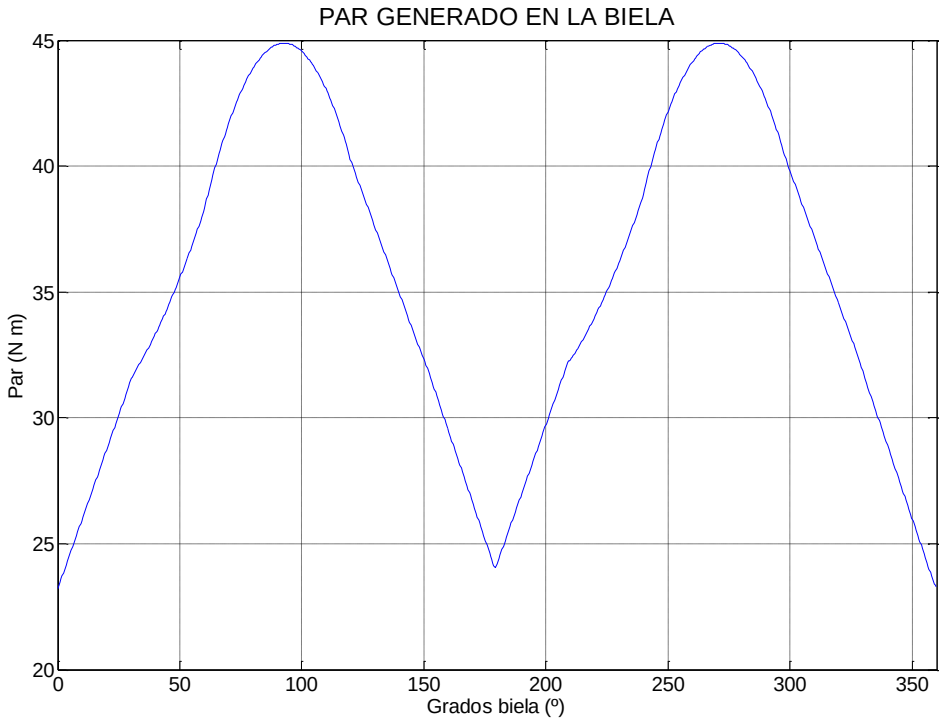


Figura 121. Par generado en la biela según los grados de esta: Gráfica obtenida en Simulink

Como se puede observar el par generado tiene la misma distribución que la fuerza generada. El par máximo generado es de 44,89 N m, el mínimo es 23,2 N m y la media es 35,48 N m.

10.2.2.2.1 *Variación del par según el rendimiento de cada pierna.*

Según el rendimiento de cada pierna se ejerce una fuerza distinta en el pedal y por lo tanto también se obtiene un par diferente. En la siguiente gráfica se ha seguido el mismo ejemplo que anteriormente. Una pierna trabaja al 100% de la fuerza y la otra tan solo al 80%.

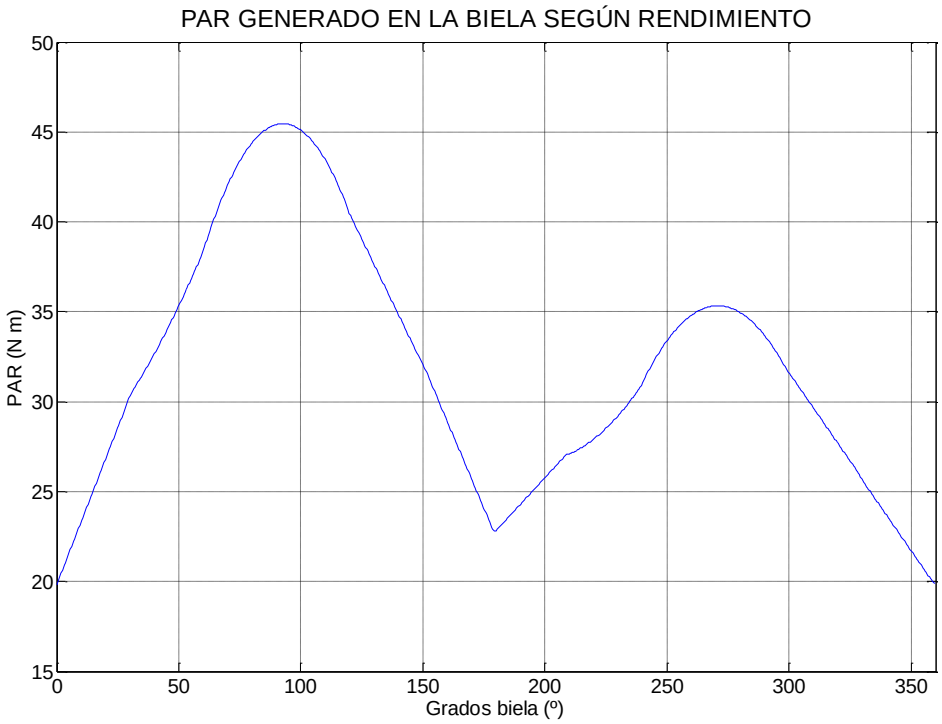


Figura 122. Variación del par según el rendimiento de cada pierna: Gráfica obtenida en Simulink

Con esta variación del rendimiento se obtiene un par máximo de 45,46 N m, un mínimo de 19,82 N m y un valor medio de 31,94 N m.

10.2.2.2.2 *Comparativa del par generado en la biela según el rendimiento.*

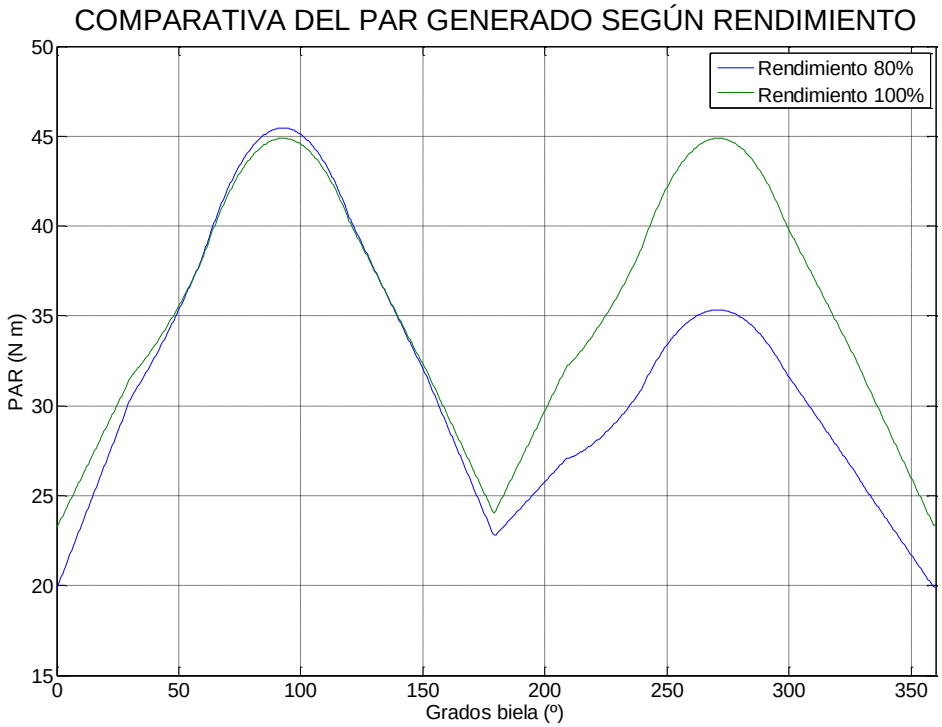


Figura 123. Comparativa del par según el rendimiento de las piernas: Gráfica obtenida en Simulink.

Se puede observar que si las dos piernas trabajan con el mismo rendimiento, el par generado en la biela es cíclico. Por el contrario, si su rendimiento es diferente, no se consigue tanto par.
Con ambas piernas al máximo rendimiento, se obtiene un par medio de 35,48 N m y con una pierna trabajando al 80%, el valor medio de par es de 31,94 N m.

10.2.3 Sistema mecánico.

El bloque denominado Sistema Mecánico es el encargado de relacionar el par humano y el par de frenado. Además tiene en cuenta otros factores como la inercia y el rozamiento viscoso del sistema. Todo esto, con el objetivo de simular las condiciones dando como respuesta o salida la cadencia resultante a la que iría el ciclista. La ecuación matemática en la que se basa el sistema es la siguiente:

$$\omega = \frac{1}{J}\int \left(T_h - T_f - B \cdot \omega\right) dt$$

En la siguiente imagen se muestra el interior de este bloque:

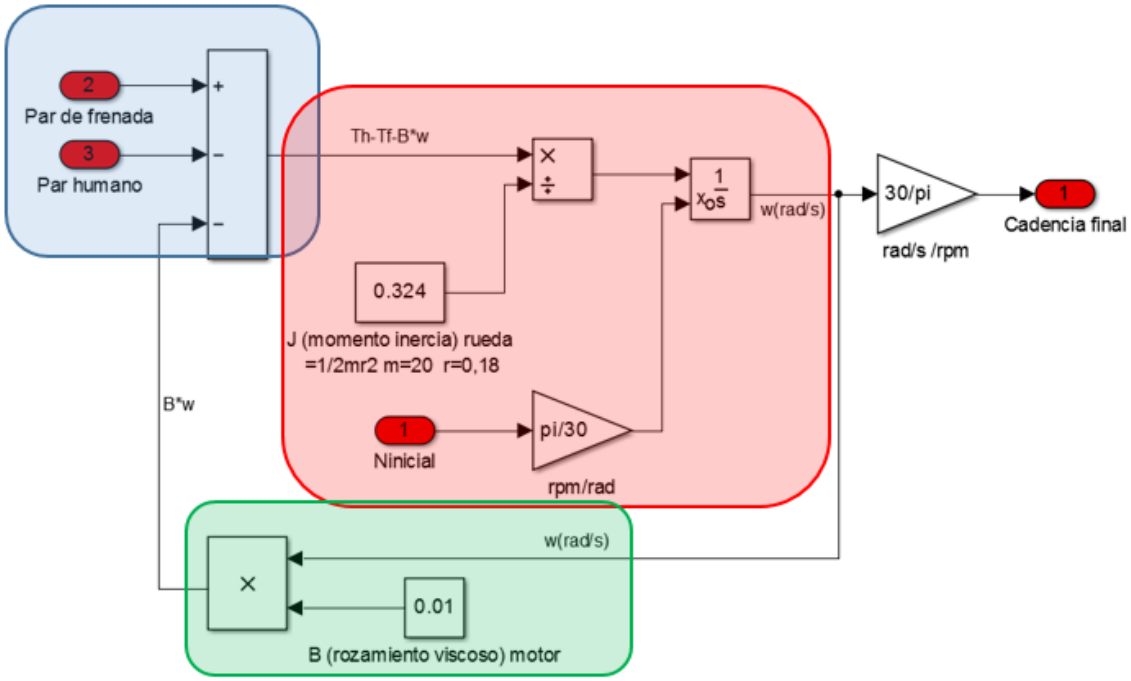


Figura 124. Funcionamiento del bloque: "Sistema Mecánico"

Para un mejor entendimiento, se ha separado el bloque en sus tres funciones principales.

Primeramente, la zona azul:

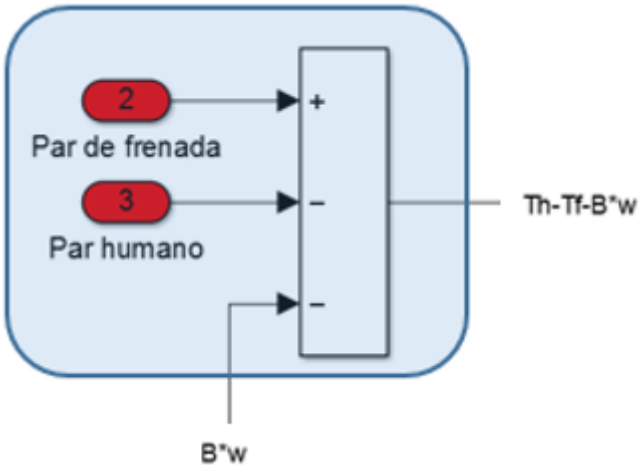


Figura 125. Parámetros de entrada

En esta parte se realiza el sumatorio del par humano, el par de frenada y el par generado por el rozamiento viscoso que lleva la bicicleta, que son las tres fuerzas que interactúan en el sistema. Las fuerzas existentes tienen sentidos opuestos. El par humano debe superar la fuerza resistiva del freno y del rozamiento viscoso para aumentar la cadencia final. Esto es debido a que además de tener en contra el par de frenado, la viscosidad también impide el avance. Es por ello, que tanto el par de frenado como el par viscoso van en el mismo sentido, y a su vez en sentido opuesto al par humano. Una vez realizado este sumatorio, el par resultante entra en la siguiente etapa.

En segundo lugar, la zona roja:

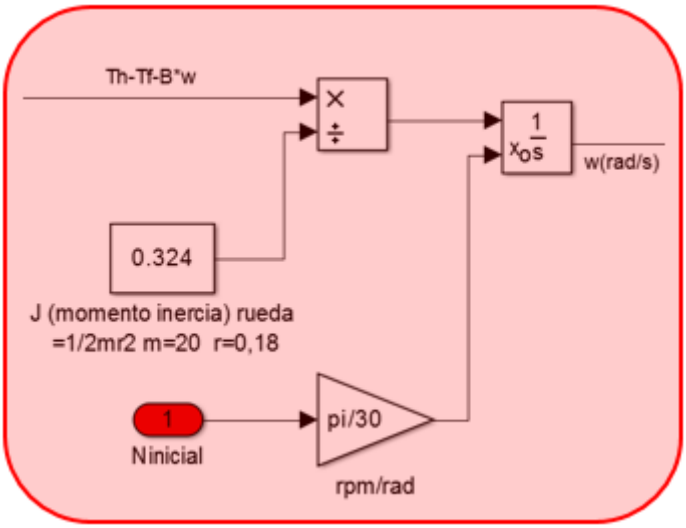


Figura 126. Efecto de la inercia en el sistema

Como entrada se tiene el par resultante proveniente del sumatorio anterior, el momento de inercia del volante y la cadencia inicial. Mediante la siguiente integral se obtiene la cadencia final del sistema.

$$\omega = \frac{1}{J}\int \left(T_h - T_f - B \cdot \omega\right) dt$$

Esta cadencia final es la resultante del sistema, además de realimentar al sistema (zona verde).

En tercer lugar, la zona verde:

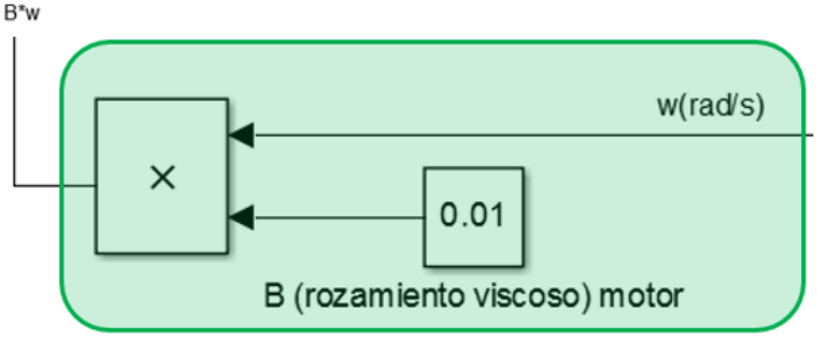


Figura 127. Cálculo del par realizado por el rozamiento viscoso

En esta fase, la cadencia final obtenida anteriormente sirve como parámetro de entrada. Multiplicada por el coeficiente de rozamiento viscoso del sistema, se obtiene el par de rozamiento viscoso.
Por último, este par es llevado de nuevo a la primera etapa del sistema (sumatorio de pares: zona azul).

10.2.4 Simulación de la parte mecánica.

En este apartado se ha realizado la siguiente simulación:

Se ha fijado una cadencia constante de 70 rpm, las cual alimenta al bloque “Sistema Mecánico”, también se ha fijado el esfuerzo que ejerce la persona. Con ello, lo que se quiere conseguir es obtener el par de frenado necesario para que el sistema se estabilice.

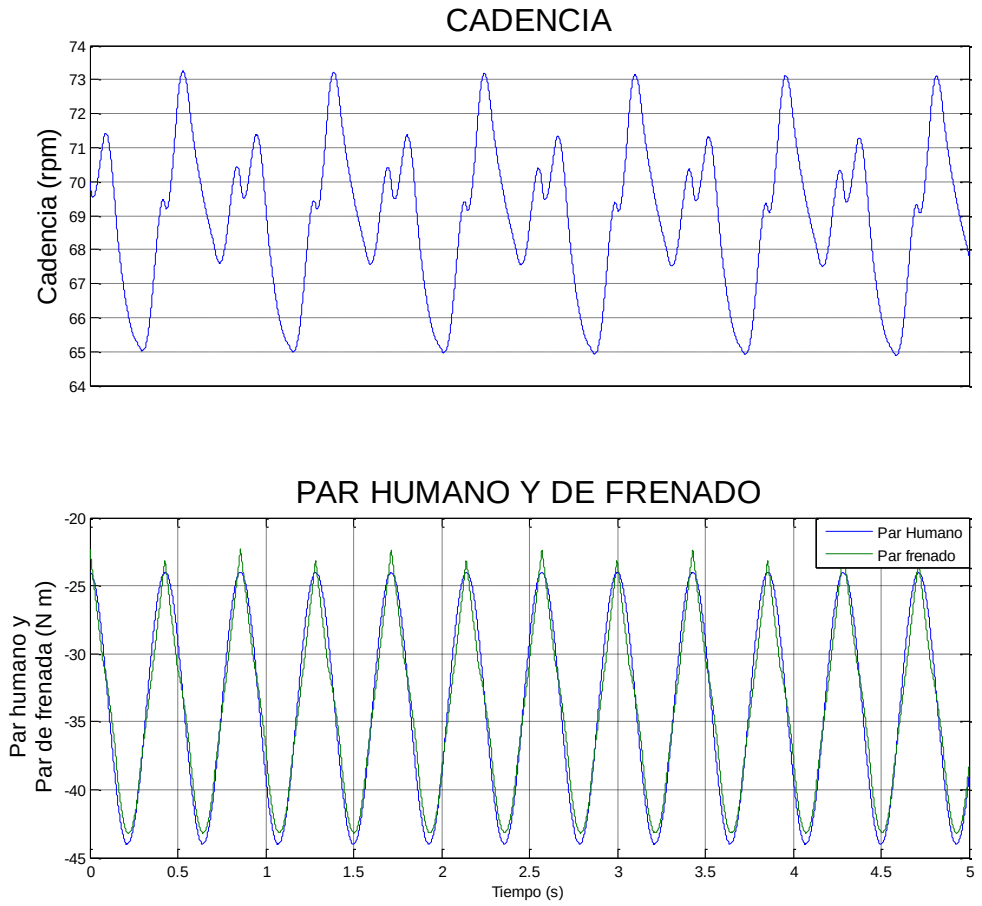


Figura 128. Simulación de la cadencia, el par humano y par de frenada (con esfuerzo constante)

Teniendo una cadencia constante de entrada, el sistema debe estabilizarse para que se estabilice en las 70 rpm. Teniendo un par de frenado de 34 N m de media y un valor del par humano de 35.48 N m.

11 Introducción al estudio eléctrico

Una vez se haya realizado el estudio de mercado para analizar en el margen en el que se enfoca este proyecto, observando las problemáticas actuales de las bicicletas en el mercado, y habiendo realizado el estudio biomecánica el cual analizara de qué manera actúan las fuerzas en el momento del pedaleo, se ha determinado que una adecuada opción para esta aplicación es la de diseñar un accionamiento eléctrico con un motor.
Se diseñara un motor que funcione como freno el cual pueda simular las fuerzas de resistencia de una bici standard, y así oponerse al pedaleo de la persona que utilice la bicicleta de spinning.
Para ello se estudiaran motores posibles para el uso de este accionamiento, por lo tanto se deberá realizar una comparativa entre los motores que podrían ser posibles para la implementación, y se justificara el uso de uno de ellos.

11.1 Elección de motor

La finalidad del el proyecto es mejorar lo que hoy en día se encuentra en el mercado de las bicicletas de spinning, por ese motivo se ha implementado un motor como sistema de frenado.
Para la elección del motor hemos tenido que seleccionar unos motores candidatos para este puesto y sacar unas conclusiones de cuál será el más óptimo.
Para ello se ha utilizado un estudio realizado por el departamento de Ingeniería Eléctrica, E.P.S.E.V.G. [31], donde se compara los principales motores y sus principales características, ponderando cara característica con un resultado final, así facilitando la elección del motor.

Propiedades	Máximo	BDCMD	SPMMD	SRMD	IMD
Densidad de potencia	10	9	10	8	7
Sobrecarga	10	7	7	8	9
Rendimiento	10	9	10	8	7
Rango de velocidades	20	10	16	18	16
Control	20	15	15	16	16
Ruido	10	8	8	6	8
Rizado de par	10	6	8	5	7
Dimensiones y peso	10	8	9	7	7
Robustez	20	14	14	17	16
Mantenimiento	10	8	8	9	9
Fabricación	20	14	12	18	16
Coste	30	20	18	26	28
Total	**180**	**128**	**135**	**146**	**146**

Tabla 89

BDCMD (Brushless D.C.)
SPMMD (Motor síncrono con imanes)
SRMD (Motor de reluctancia autoconmutado)
IMD (Motor de Inducción).

Para eso se han seleccionado 3 tipos de motores que podrían ser elegidos:

- Inducción
- Brushless
- MHR
- Motor síncrono con imanes

11.2 Posibles elecciones

Aquí se detalla el motivo por el cual se ha elegido o descartado un motor según sus parámetros de funcionamiento y de control y precio.

11.2.1 Inducción

El motor de inducción es un buen candidato ya que puede tener un alto par a altas velocidades, aunque nuestro motor trabaje a bajas velocidades cabría la posibilidad de insertar una reductora para trabajar en un nivel óptimo del motor.
Uno de los inconvenientes de este motor es su control, gracias a un control vectorial este motor puede controlar su par, el inconveniente es que el cambio de par no se produce de forma instantánea [e4] lo que será un problema ya que nuestro motor deberá ser rápido y preciso en cuanto al par. Además que este motor no permite cambios de estructuras.

11.2.2 Brushless

Este motor funciona con tiene un funcionamiento similar al motor MHR, explicado más detalladamente más adelante, con la diferencia que dispone de imanes en la parte móvil. Este motor puede ser controlado electrónicamente lo que nos puede proporcionar efectividad en el cambio de par, un inconveniente que se encuentra en este motor es que al estar dispuesto de imanes en el rotor encarecerá bastante el coste de este.

11.2.3 Motor síncrono con imanes

Estas máquinas tienen que funcionar a una velocidad de sincronismo por lo que en el momento de mucha variación de velocidad puede ocasionar problemas [e1], otro problema es que las variaciones de par muy bruscas pueden hacer perder el sincronismo.

11.2.4 MHR

Otra opción es el motor MHR, una mejora del motor SRM, es un motor de construcción sencilla, y 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, por lo cual el coste será mucho menor que el motor brushless, ya que el número de imanes también será mucho inferior., además este motor permite la variación de su construcción.
También es un motor el cual tiene muy buenas propiedades como generador, aunque en este proyecto no se contemple regenerar energía, puede que en líneas futuras pueda tenerse en cuenta.
Este 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.
Por lo tanto determinaremos que este motor será el mejor candidato para comprobar su implementación en la bicicleta de spinning.

11.3 Ubicación del accionamiento

Una vez elegido el motor por el estudio eléctrico que más se adecua a los requisitos determinados y teniendo en cuenta que este motor permite variaciones de su construcción se ha propuesto la ubicación del mismo en la posición del volante de inercia de esta manera aprovechar la simulación de la inercia y el espacio de la bicicleta estática.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo podría ser el motor y las posiciones donde se podría colocar.

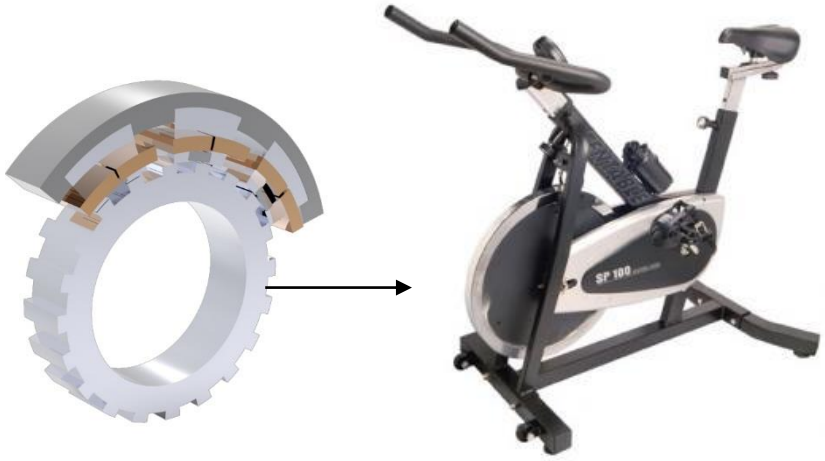


Figura 129. Incorporación del motor en el volante de inercia

Será situado en la posición del volante de inercia como se describe en el esquema anterior del sistema. O también podría situarse en la zona del pedal como en el ejemplo siguiente permitiendo ahorrar una gran cantidad de material, esto se determinara cuando se compruebe que el sistema es viable.

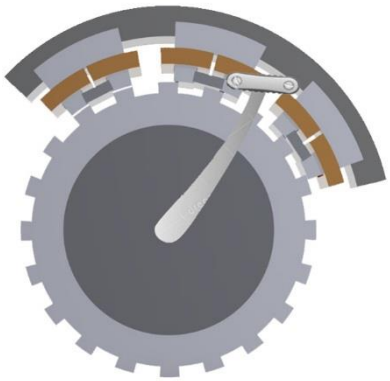


Figura 130. Incorporación del motor en el eje del pedal

11.4 Control del motor

Para el funcionamiento de este motor debe disponerse de una serie de componentes para controlar a este. A continuación se muestra un esquema donde se representa la conexión entre ellos.

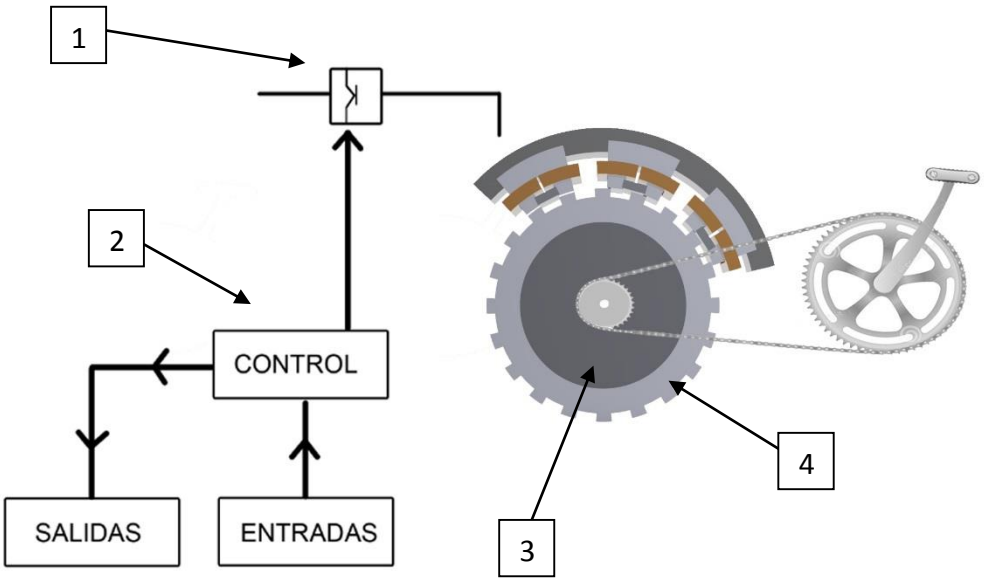


Figura 131. Esquema del sistema

1- Convertidor
2- Control
3- Volante de inercia
4- Motor

11.4.1 Materiales del volante

Un parámetro a tener en cuenta para llevar a cabo esta propuesta es considerar que el material del volante de inercia deberá tener una permeabilidad baja ya que se encontrara en contacto con el motor y debe evitar la disipación de flujo magnético. Esta permeabilidad magnética debe ser lo más próximo a la unidad.

12 Procedimiento

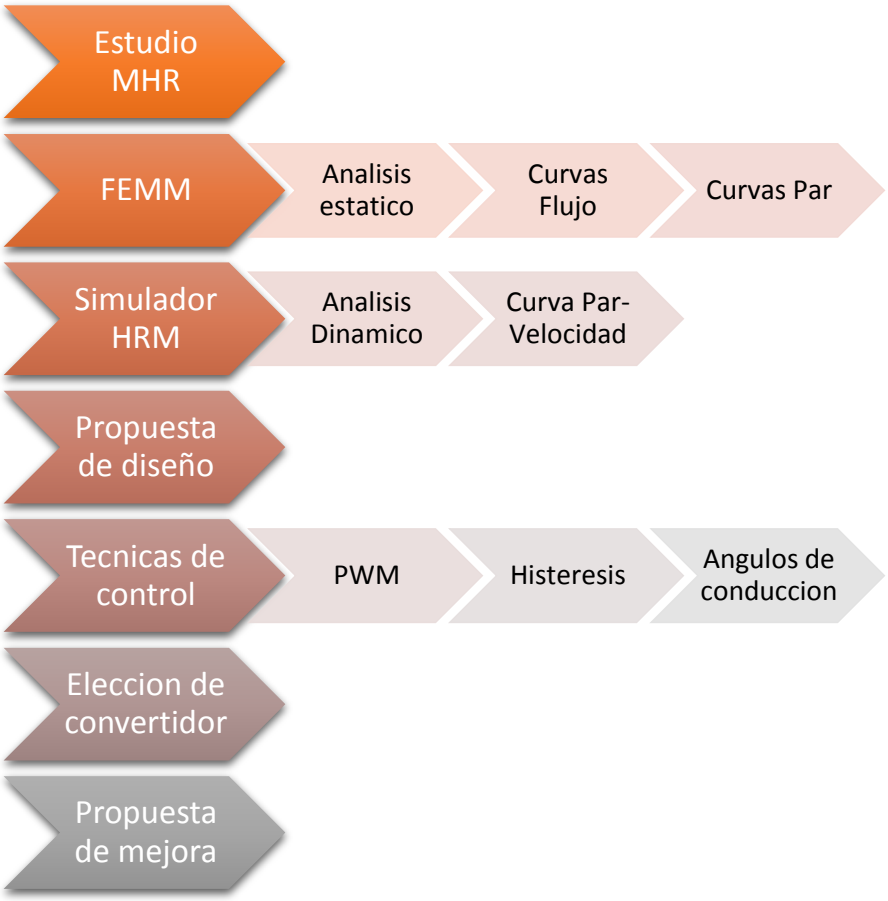


Figura 132.Procedimiento de trabajo

El procedimiento a seguir para el diseño desde el principio del proyecto ha tenido que ir ligado al estudio mecánico y al estudio de diseño, los cuales han marcado las pautas y los requerimientos necesarios para el diseño de este.

- El primer paso ha sido un estudio del motor, para familiarizarse y conocer su principio de funcionamiento, para de esta manera poder empezar a hacer un diseño inicial del motor.

- Seguidamente se ha hecho una introducción al programa FEMM (programa de elementos finitos) el cual analizara los motores diseñados de forma estática, además con este programa estará ligado el programa LUA, con el que facilita el análisis programando comandos para los movimientos de este.

- Se han realizado unos ensayos de tendencia para conocer cómo afecta las variaciones de diseño y de ver cómo estas afectan en el comportamiento del motor para de esta manera poder realizar el diseño final del motor.

- Sacando las conclusiones de los análisis realizados, se diseñara un motor para que cumpla con los requisitos estudiados por los mecánicos, y se obtendrán los datos de flujo concatenado y de par.

- Estos datos se introducen en un simulador de motor HRM, para la comprobación de su comportamiento dinámico y ver si corresponde con los requisitos, y se sacan nuevos análisis de cambios de variables en comportamiento dinámico.

- Se realizan nuevos diseños de motores hasta conseguir uno que se adapte a los requisitos de la curva Par-Velocidad obtenida por el estudio mecánico.

- Una vez obtenido el diseño final para la aplicación del motor, se realiza un análisis para obtener las mejores técnicas de control (PWM, Histeresis, ángulos de conducción) y que el motor funcione a un nivel óptimo.

- Se elige un tipo de convertidor que se pueda aplicar a este motor y sea capaz de funcionar como generador.

- Conociendo todos los parámetros que afectan en el diseño del accionamiento y las desventajas que tiene, se diseña una propuesta de mejora con la intención de mejorar las problemáticas que este ofrece, mejorar el funcionamiento del motor y reducir el coste del motor.

13 Accionamiento HRM

A continuación se describirá como está compuesto un accionamiento HRM, y una breve introducción en cada apartado, junto con una explicación de los principios de funcionamiento del motor HRM de esta manera conocer cómo funciona el motor y en que se basara el diseño de este.

13.1 Introducción a la Reluctancia magnética

Para facilitar el entendimiento de este motor antes habrá que entender que es la reluctancia, ya que este motor se basa en ella.
La reluctancia es la propiedad de un circuito o un material, el cual se opone al paso del flujo magnético cuando está sometido a un campo magnético, podría decirse que es una resistencia al flujo magnético.

13.2 Motor HRM

Hay diferentes tipos de motores MHR, los cuales funcionan insertándoles imanes en diferentes partes, estos condicionan el funcionamiento del motor así como sus propiedades.
El que nosotros utilizamos será un motor con imanes dispuestos en los polos estatoricos como el mostrado en la figura133, lo que estos hacen que se cree un flujo permanente aun sin estar activadas las fases, cerrándose este por el circuito. Al excitar la fase este flujo ayuda al flujo creado por la bobina.

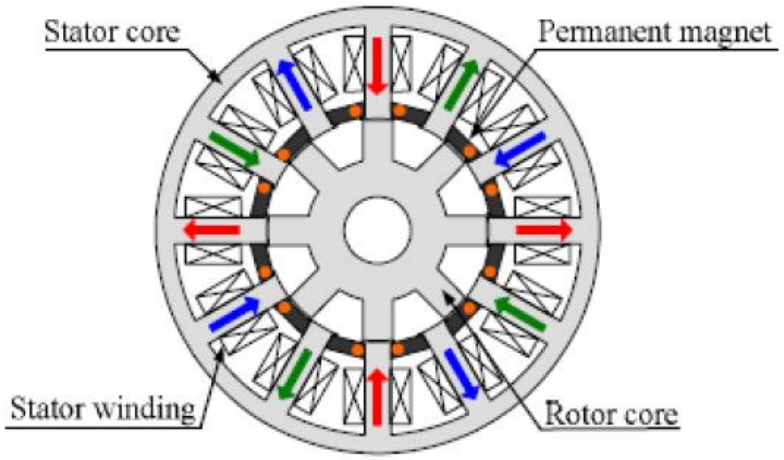


Figura 133.Ejemplo motor SRM

13.2.1 Diferencia MHR y SRM

Se pueden observar diferencies entre el comportamiento de un motor de reluctancia con imanes y sin imanes, una de las principales diferencias se observa en las curvas de magnetización del motor que indican la zona de trabajo del motor, debido a que la superficie que abarca el motor es mayor en la del motor sin imanes se sabe que el par será mayor en este caso, en el caso del origen de la curva de magnetización del motor con imanes empieza en valores bajo cero debido a la influencia del imán mientras que el motor sin imanes tiene su origen en la coordenada 0 [2], se puede observar este efecto en la figura134

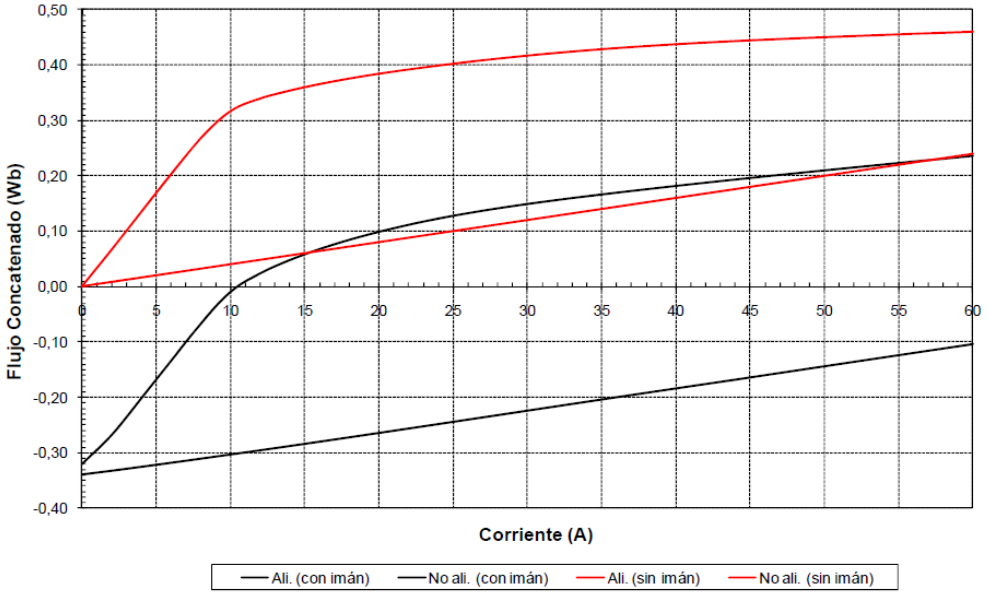


Figura 134.Diferencia de curvas de magnetización.

Otra diferencia que podemos observar es el efecto que tiene el par en influencia de los imanes, siendo la corriente nula el motor tiene un par mínimo y un par medio superior en comparación al motor sin imanes, como se observa en la figura135

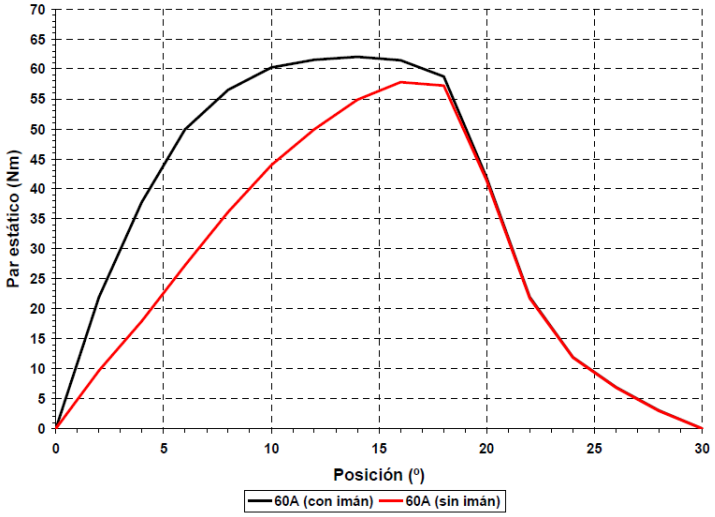


Figura 135.Diferencia curva de Par

13.3 Construcción

Hay diferentes estructuras que se pueden conseguir combinando la estructura de polos en el estator y el rotor, un parámetro a tener en cuenta en el momento de realizar los análisis, estos son los grados desde que el motor esta desalineado hasta que vuelve a desalinearse le llamaremos Stroke y cumplirá con la siguiente fórmula:

$$\tau_R = \frac{360}{N_R}$$

Figura 136.Muestra de Stroke

Los números de polos en el estator y el rotor pueden ser variables dependiendo la configuración que se elija, teniendo en cuenta que nunca puede haber una alineación completa con todos los polos, es decir cuando unos una fase se encuentre en alineación, las demás fases deberán estar desfasadas, esta configuración dependerá de la función que se busque, donde la explicaremos más adelante.
En el proceso de un Stroke es decir desde que el polo esta desalineado pasando por la alineación de la fase y vuelve a la desalineación, podemos observar las características del par del motor, la inductancia y el flujo que este tendrá en cada posición y de esta manera más adelante analizaremos las características de un motor desde una sola fase.
Se observa que el ángulo de cambio de fase (ε), se activara cuando el polo esta no alineado, en el punto de máxima reluctancia. Y durara un determinado ángulo, este vendrá dado por la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{360}{m \cdot N_R}$$

m: Numero de fases

N_R=Polos del rotor

ε= Angulo de cambio de fases

Para realizar el giro completo del motor habrá que realizar una secuencia de fases en las cuales cuando una termine su alineación la siguiente fase empiece a conducir y así sucesivamente, esta secuencia también dependerá de la construcción del motor, hay que tener en cuenta que a mayor número de polos en rotor menos será el ángulo de stroke y por los tanto menos el tiempo de secuencia de fase.
La fórmula para obtener la frecuencia de cambio de fase será la siguiente:

$$f_s = N_R \frac{\mathrm{N}}{60}$$

N: *Velocidad (rpm)*
N_R: *Polos del rotor*
f_s: *Frecuencia conmutación de una fase (Hz)*

Entonces pasa saber el número de cambios por revolución (s) lo obtendremos con la fórmula:

$$\mathrm{s} = \mathrm{m} \cdot N_R$$

s: *Numero decambios por revolucion*
N_R: *Polos del rotor*
m: *Numero de fases*

14 Principio de funcionamiento.

El principio de funcionamiento del motor MHR se trata en que el motor gira en busca de la mínima reluctancia posible, es decir, una fase alimentada por corriente continua genera un flujo donde este busca un paso por lo tanto hará que los polos rotóricos que se encuentren cerca de esa fase queden alineados, facilitando el paso del flujo y reduciendo la reluctancia.
De esta manera al reducir la reluctancia se aumenta la inductancia. Como podemos ver en la *figura 137* [43]
Siendo la Inductancia (L) una medida de oposición a un cambio de corriente de una bobina observamos en la figura que el momento de mayor inductancia (L) se produce en la alineación de los polos, a la vez que la reluctancia es mínima.

$$L = \frac{\Phi N}{I}$$

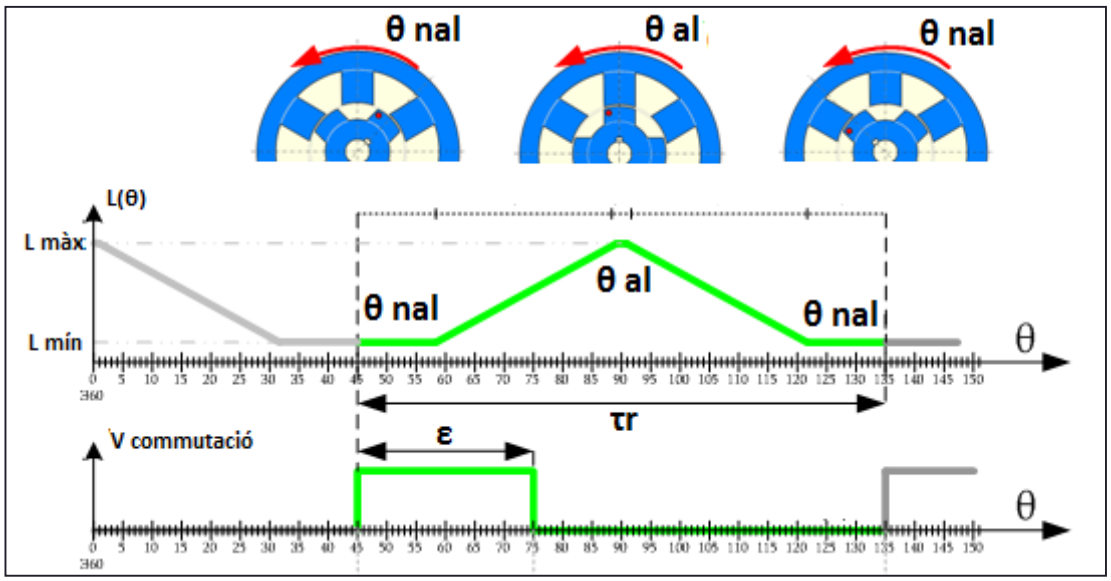


Figura 137. Perfil de inductancia

Encontrándose el rotor en la posición inicial se puede observar en la figura el punto rojo en el polo, el rotor gira en sentido anti horario, el sensor enviara la información para que se active la fase A (color verde) accionando el circuito A i A'
En esta posición el polo se encuentra desalineado con la fase, por lo tanto al entrar en contacto con la fase la inductancia irá creciendo hasta un punto máximo, el rotor girara hasta el momento que recorra el ángulo de paso que dependerá de la configuración polar.
Una vez se cumple ese ángulo la fase A dejara de conducir i los diodos se abren aplicándole una tensión negativa de la corriente acumulada en la bobina la cual se ira desmagnetizando.

Cuando el polo de referencia quede alineado el rotor quedara en posición desalineada con la fase B, por lo tanto se deberá activar la fase B para seguir con el giro igual que se ha realizado en la fase A activando las fases B i B', antes de que la inductancia de la fase A empiece a disminuir, a continuación pasara lo mismo con la fase C completando el paso rotórico (τ_R)
Para que el giro sea continuo se repetirá el conmutado con las fases A, B, C respectivamente.

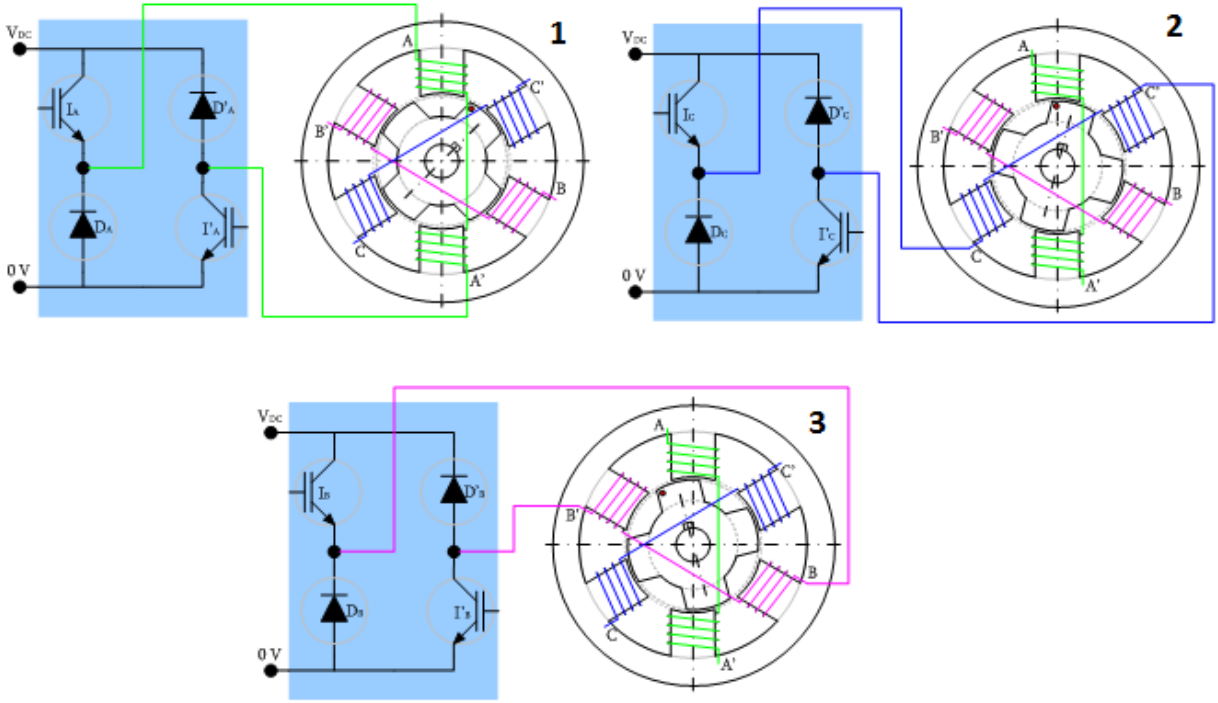


Figura 138.Secuencia de conmutación

14.1.1 Perfil de inductancia

La inductancia de las fases varía según la posición en la que se encuentre el rotor, siendo el valor máximo cuando se alinean los polos del rotor y del estator es el punto de máxima inductancia y el punto de desalineación entre en polo del rotor y del estator es la inductancia mínima donde:

$$L_{NA} = \frac{N^2}{\Re_{NA}}$$

$$L_A = \frac{N^2}{\Re_A}$$

Como se observa en la siguiente figura podemos observar que la producción de par del motor es debido al cambio de inductancia de la fase, se producirá un par positivo cuando la inductancia es creciente y un par negativo cuando esta decrece, por lo que cuando la inductancia se mantiene constante el par producido será nulo, como se puede ver en la formula y que corresponde con la figura 139.

$$M = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot i^2$$

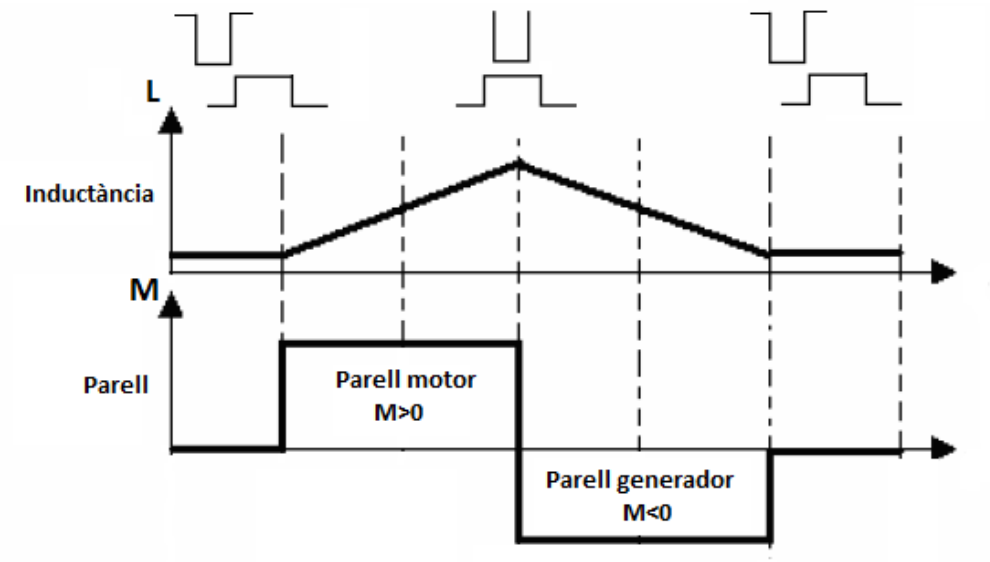


Figura 139.Perfil de inductancia

14.1.2 Característica Par-Velocidad

La característica es la curva de potencia que cumple el motor y dependerá de su construcción que se detallara más adelante, como se puede observar en la siguiente figura la primera zona es la zona de par constante donde el motor debe ser controlado ya que por sí mismo no puede llegar a trabajar en ese rango de velocidades, por otro lado en la segunda zona es donde el motor trabaja en su pulso único y a potencia constante.

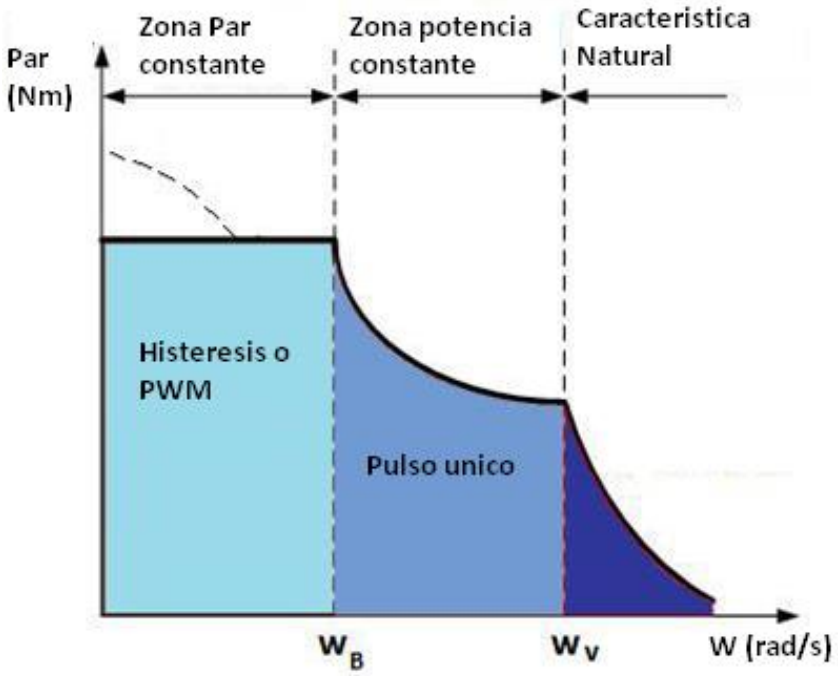


Figura 140.Grafica Par-velocidad

14.1.3 Saturación

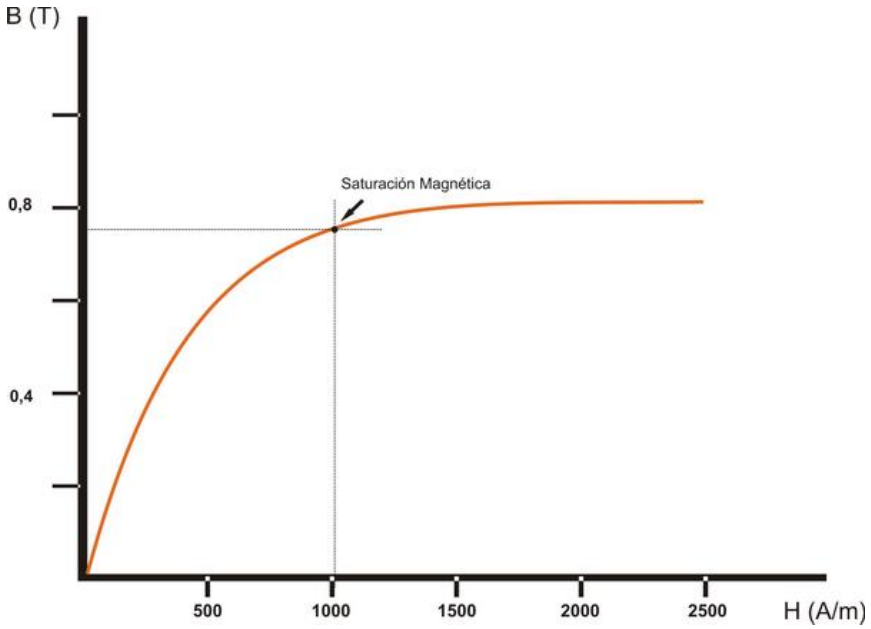


Figura 141.Curva saturación

Motor no saturado.

Considerando que la chapa del motor no está en saturación, podremos decir que la inductancia no depende de la corriente que traspasa la bobina y entonces tendremos el flujo concatenado:

$$\psi = L \cdot \theta \cdot i$$

Dónde:
θ = la posición rotórica.
L=inductancia
i= corriente

Se obtiene la ecuación principal será:

$$V = L \cdot \theta \cdot \frac{di}{dt} + \frac{dL}{d\theta} \cdot i \cdot \omega$$

Entonces para la obtención de la potencia habrá que multiplicar la tensión por el corriente.

$$P_{abs} = V \cdot i = L \cdot \theta \cdot \frac{di}{dt} \cdot i + \frac{dL}{d\theta} \cdot i^2 \cdot \omega$$

Esta se puede escribir de la siguiente manera.

$$P_{abs} = \frac{L \cdot \theta \cdot i^2}{2} \frac{d}{dt} \cdot i + \frac{1}{2} \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot i^2 \cdot \omega$$

Esta potencia se compone por 2 componentes, una la energía del motor en forma de campo magnético y la segunda la potencia mecánica del motor como fuerza electromotriz.

Si tomamos el término anterior como potencia mecánica y se asocia a la expresión que determina la potencia mecánica interna del motor encontramos que:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot i^2 \cdot \omega$$

Por otro lado tenemos la potencia mecánica interna del motor:

$$P_{mec} = M \cdot \omega$$

Obtenemos entonces el par del motor que viene dado por:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \cdot i^2$$

Gracias a las ecuaciones y observando las gráficas podemos saber:

- El par se produce por la tendencia a que el circuito magnético alinee los polos en busca de la mayor inductancia posible.
- El par será independiente de la corriente.
- Dependiendo de la secuencia de fases se genera un par motor o un par generador.

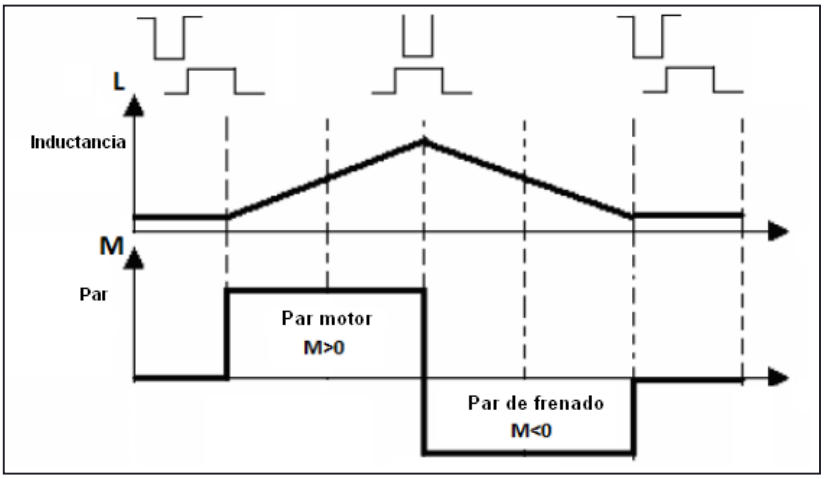


Figura 142. Produccion de par

Motor saturado.

Como se ha descrito anteriormente, el efecto de la saturación magnética provoca que no exista linealidad magnética en el material. Por ello vamos a ver la no linealidad de la inductancia y la relación inversa de esta con la corriente. Este hecho se produce por la saturación del circuito magnético. Lo podemos observar en las curvas de flujo concatenado.

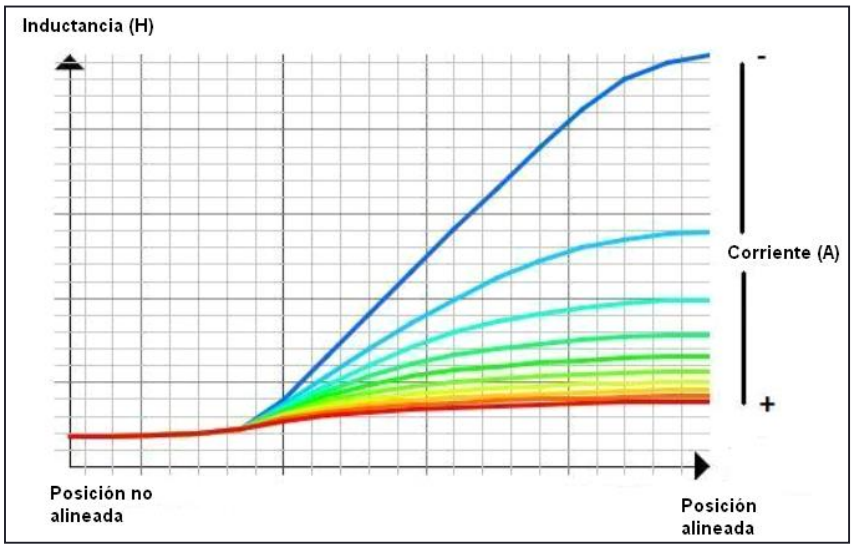


Figura 143. Inductancia en saturación

14.2 Componentes para un accionamiento MHR

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

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

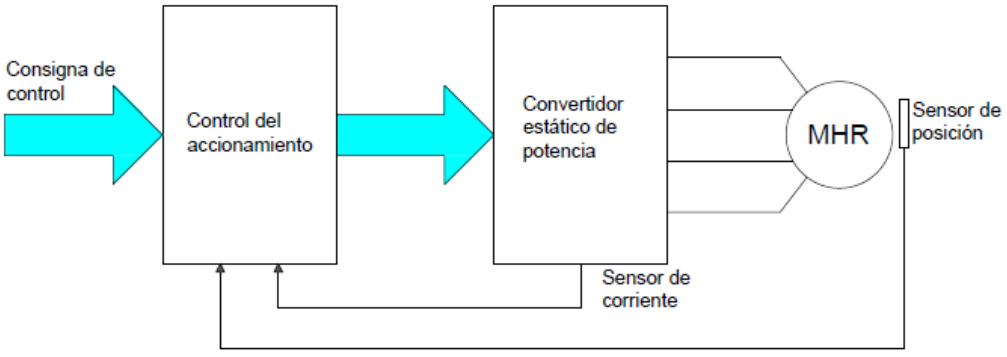


Figura 144.Esquema del accionamiento MHR

14.2.1 Convertidor estático de potencia

El convertidor estático utilizado en el motor MHR, será el mismo que se utilizara para el SRM (motor de reluctancia auto conmutado)
Este servirá para efectuar la conmutación de fases en el orden que le toca con la ayuda de un sensor de posición el cual indica donde está posicionado el rotor del motor, este cambio se realizara abriendo y cerrando interruptores, se pueden utilizar dos tipos de interruptores:

- IGBT's para potencias superiores de 1kW
- MOSFET's para potencias inferiores a 1 kW

Otra característica de el convertidor será el de desmagnetizar las fases, se utiliza un solo interruptor por fase, y la desmagnetización de esta una vez abierto el interruptor se realizara con un diodo que conducirá la corriente hacia una resistencia donde esta disipara la energía.

Para el convertidor hay dos formas principales las cuales utilizar para el motor HRM:

- Convertidor de puente asimétrico
- Convertidor clásico

14.2.2 Sensores

Los sensores de posición son los dispositivos que dan la información de las variables del motor tanto eléctrica como mecánica, para de esta manera poder cerrar el lazo de control del accionamiento.
En accionamientos eléctricos es importante que este suministre la información de corriente que es consumida por el motor, esta medida se utilizara en el lazo de regulación de corriente o en el control del convertidor que se encarga de proteger consumos elevados
Es importante además disponer de un sensor de posición, el cual se utiliza para poder implementar en el accionamiento un control de velocidad o de posición en lazo cerrado, puede ser necesario para realizar la secuencia de control del motor.
Las características de los sensores dependen de las especificaciones del accionamiento, dependiendo a la finalidad para la cual se diseña el accionamiento.
Cuando se escogen sensores se tienen que tener en cuenta una serie de parámetros dependiendo del uso que se le vaya a dar.
Este dispositivo como medidas eléctricas debe permitir:

- Medidas de corrientes iguales o mayores a cero en el valor de fase
- Medidas de corriente algo superior al pico de corriente máxima de la que soporte el convertidor.

El sensor de posición deberá permitir:

- Detector incrementos y decrementos de posición.
- Conocer la posición en el momento de arranque
- Soportar la velocidad máxima i mínima del motor.

14.2.3 Control del accionamiento

El bloque de control tiene la función de generar señales de disparo en los interruptores del convertidor acorde con la configuración deseada. Esta se puede configurar dependiendo del tipo de consigna exigida, puede ser de corriente, par, velocidad, etc. De esta manera determinaremos el tipo de controlador.
La variable a regular será de tensión o de corriente, la función del convertidor nos aumentara o nos restara tensión, a las fases del motor, en cuanto a la corriente se podrá regular a la activación y desactivación de los interruptores que están incluidos en el convertidor estático de potencia.
El controlador tiene tres tipos de funcionamiento, los cuales explicaremos detalladamente más adelante:

- Funcionamiento a pulso único:
- PWM
- Histéresis

15 Diseño del motor

Para el diseño del accionamiento habrá que tener en cuenta los parámetros principales de cada uno de los componentes, los cuales habrá que tomar una decisión en su elección conforme con la utilidad.
Este motor actuara como freno es decir como generador

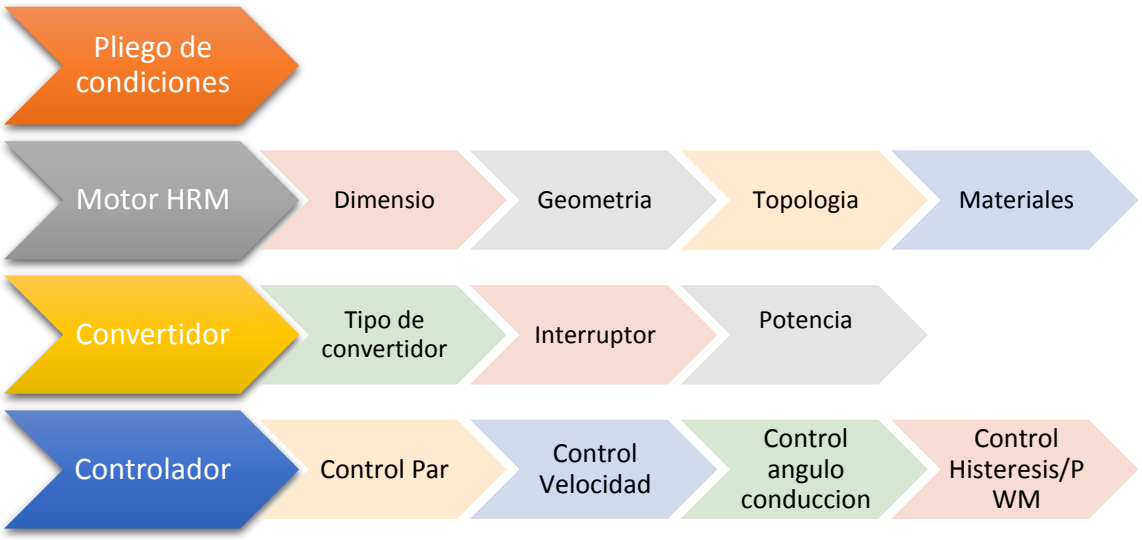


Figura 145.Procedimiento de diseño

15.1 Pliego de condiciones

Para realizar el estudio se estudiara un accionamiento MHR, el cual se ha encontrado adecuado para esta aplicación. Se deberá diseñar un accionamiento el cual cumpla unos objetivos básicos propuestos para el buen funcionamiento de la aplicación, este accionamiento está compuesto de varios componentes, detallados a continuación junto con los principales objetivos que estos deben cumplir:

Rectificador: Conseguir una tensión de corriente continúa

Motor eléctrico: Instalado en el volante de inercia de la bicicleta de spinning el cual deberá cubrir los requisitos del estudio mecánico.

- Cumpla con las dimensiones de un volante de inercia
- Curva Par-Velocidad

Convertidor de potencia: adecuado al uso del motor

Controlador: Deberá cumplir los requisitos, para un funcionamiento óptimo del motor los cuales serán:

- Bajo rizado de Par
- Control de velocidad con alta exactitud
- Control de Par de alta exactitud

A continuación muestran las características que este motor debe soportar en las condiciones nominales de funcionamiento, no solo es un par a una velocidad específica, ya que tiene que soportar diferentes cargas a diferentes velocidades, por lo tanto el motor será muy versátil.

Aquí mostramos unas graficas de par velocidad con los extremos donde trabajara el motor. Por lo tanto el motor tiene que soportar las condiciones más desfavorables.

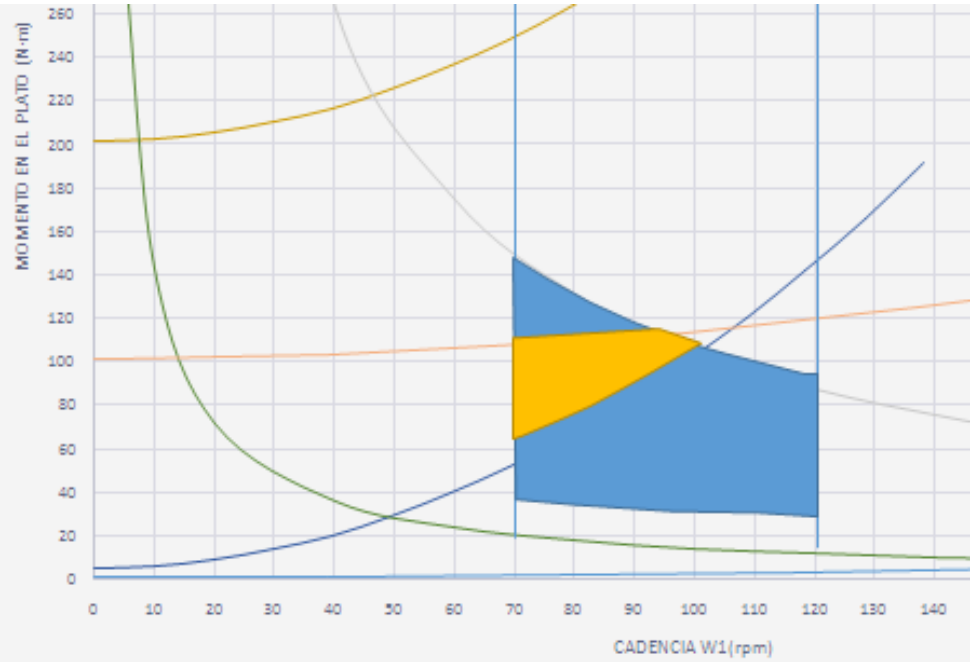


Figura 146. Curva Par Velocidad

- Esta curva de par velocidad estará determinada como parte superior en 1100W.
- Y la inferior está definido en 100W.
- Aunque el motor está limitada esta de 70 a 120 rpm, contemplaremos que el motor trabaje entre unas velocidades de 50 hasta 160 rpm, para que se puedan apreciar mejor las curvas.
- La tensión de alimentación del motor se podrá definir durante el diseño según las necesidades.
- La intensidad máxima la marcara el diseño del motor la cual estará detallada más adelante.

La construcción de este motor no se asemeja a una construcción estándar, ya que el rotor realiza la función de volante de inercia de la bicicleta de spinning, los polos del rotor estarán ubicados alrededor del volante.
Las dimensiones de este dependerán de los requisitos que se quieren obtener, limitando la longitud de las chapas en 8cm
La ubicación del motor está por definir ya que esta afectara en el diseño de la bicicleta, y este proyecto se basa en la viabilidad por lo tanto no podemos definir exactamente su ubicación.

15.2 Materiales

15.2.1 Introducción curva histéresis

Cuando en un material se varía el campo magnético puede haber efectos que no se desean, como corrientes de Foucault que son perdidas de energía disipadas en forma de calor. Estas pérdidas están indicadas en el ciclo B-H de la perdida de histéresis. Para

esto habrá que tener en cuenta la curva de magnetización del material y evitar que el motor pueda quedar saturado en su rango de trabajo nominal.

15.2.2 Curva de magnetización

La curva de magnetización de un material, es la característica magnética que representa la inducción magnética (B) del material respecto a la excitación magnética (H), esta grafica nos indicara en qué punto se saturara el material, podemos observarlo en la figura149.

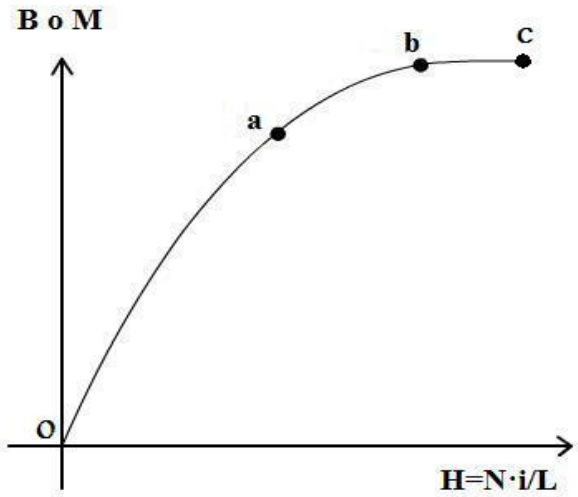


Figura 147.Curva de saturación

Como se observa en la figura 147 a medida que se aumenta la excitación magnética H, a consecuencia habrá un aumento de inducción, se observa que el segmento 0-a es casi proporcional, se debe a que la permeabilidad es constante y alta.
En el a-b la permeabilidad del material deja de ser constante, en este tramo es donde el material entra en saturación, es el punto de la gráfica en el que debemos trabajar.
Una vez estamos en el tramo b-c el material está completamente saturado, significa que aunque se produzcan aumentos en la excitación (H) no se detectan cambios en la inducción (B)
Para un buen funcionamiento del material se intentara trabajar a una inducción en el tramo a-b procurando que sea más cercana al punto “b”
Para la elección del material habrá que tener en cuenta el valor de saturación de este material, este vendrá dada por su calidad, a mayor calidad de material mayor nivel de saturación por lo tanto aceptara mayor excitación magnética.

15.2.3 Tipos de materiales

Cada material ferro magnético tiene una diferente inducción de saturación, puede oscilar desde 1.5T para aleaciones de Níquel hierro, 1.9T para aleaciones de acero silicio i 2.3T para aleaciones de Cobalto-hierro, la elección dependerá del coste del material y su aplicación.
El material más utilizado en motores es una aleación con silicio y acero, que también es llamado acero eléctrico, es un material no orientado que tiene propiedades magnéticas isotrópicas, similar para todas las direcciones, por ese motivo es adecuado utilizarlo para aplicaciones donde la dirección magnética del flujo no es rectilínea, es decir en máquinas rotativas.
Podemos utilizar distintas chapas comerciales que midan desde 0,35 mm hasta 0,65 mm. Si queremos saber las características de la chapa habrá que fijarse en la nomenclatura del nombre, como por ejemplo la chapa M600-50A, indica que la primera cifra (600) indica que el material tendrá una perdida 6W/kg de pérdidas a una frecuencia de 50Hz y a 1,8T, la segunda cifra indica que el grosor de la chapa será de 500mm, hay que tener en cuenta que para este diseño no podemos guiarnos por las pérdidas ya que nuestro motor es de continua y este dato está indicado para alterna.

15.2.4 Rotor y estator

Para la construcción del rotor y del estator utilizaremos una chapa FeV 600 un material con un nivel de saturación de 1,76T, es un material de alta calidad ya que tiene un nivel de saturación elevado, lo que esto le permite tener un campo magnético mayor.

	Densidad g/cm³	Inducción de saturación (T)	Espesor de chapa (mm)	Tensión de ruptura (N/mm²)
FeV 600	7,75	1,76	0,5	450

Tabla 90.Propiedades chapa

15.2.5 Soporte fases

En el soporte de las fases es importante que el material a utilizar tenga una permeabilidad baja, siendo la permeabilidad la capacidad de un material a conducir un campo magnético, se escogerá un material paramagnético donde su permeabilidad será ligeramente mayor que la unidad, por lo tanto en este caso interesa que la conducción sea casi nula para procurar que las líneas de flujo no se disipen por el soporte.
El material a utilizar será el aluminio ya que tiene una permeabilidad de 1.000 021Wb / A.

15.2.6 Tipo de imán

Al ser un motor HRM utilizaremos un imán insertado en las fases el cual será un imán de neodimio cuya nomenclatura es NdFeB, siendo un imán permanente de aleación de neodimio, hierro y boro, siendo uno de los mejores imanes existentes, con una alta resistencia a la desmagnetización, y una saturación magnética de 1,3T.

15.3 Ensayos y su finalidad

El motor a diseñar es un motor con una estructura no estudiada, por un lado el principio de funcionamiento será el mismo que cualquier otro motor HRM, pero las fórmulas para su dimensionado no podemos hacer uso de ellas, por lo tanto realizaremos ensayos empíricos para definir que parámetros habrá que tener en cuenta en el momento del diseño del motor.
Se realizaran 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.
Los resultados mostrados aquí son las conclusiones de los ensayos realizados.
Para estos ensayos utilizaremos el programa FEMM visto en Anexo C.2. Programa de análisis de elementos finitos, con el fin de obtener datos numéricos a partir de una estructura diseñada.

15.3.1 Influencia de los Polos

Una de las pruebas realizadas ha sido una variación de polos rotóricos y ver como este afecta en el par del motor, podemos ver como con el aumento de los polos rotóricos el par de pico aumenta aunque también se disminuye el rizado ya que el paso del diente por al polo estatórico es menor, lo que es una ventaja en el motor.

Por lo tanto se puede decir que a mayor número de polos mayores será el par pero también mayor habrá de ser la frecuencia de conmutación en el convertidor.

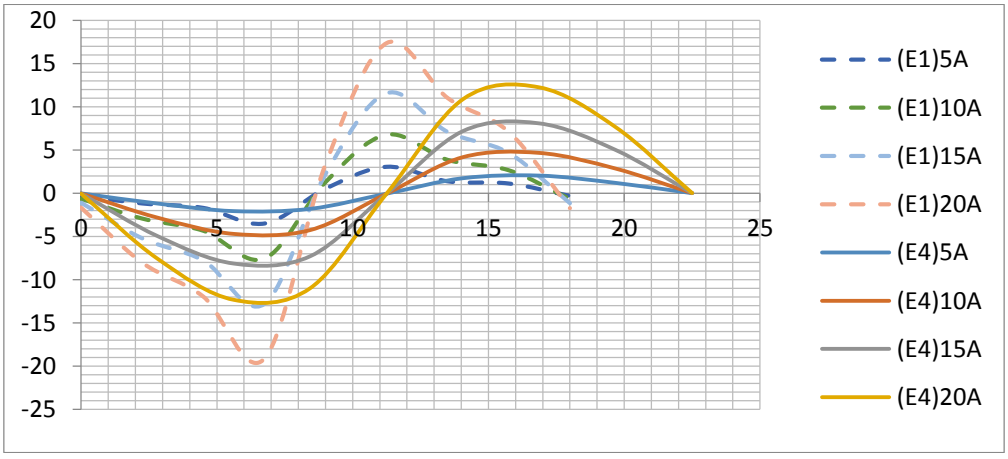
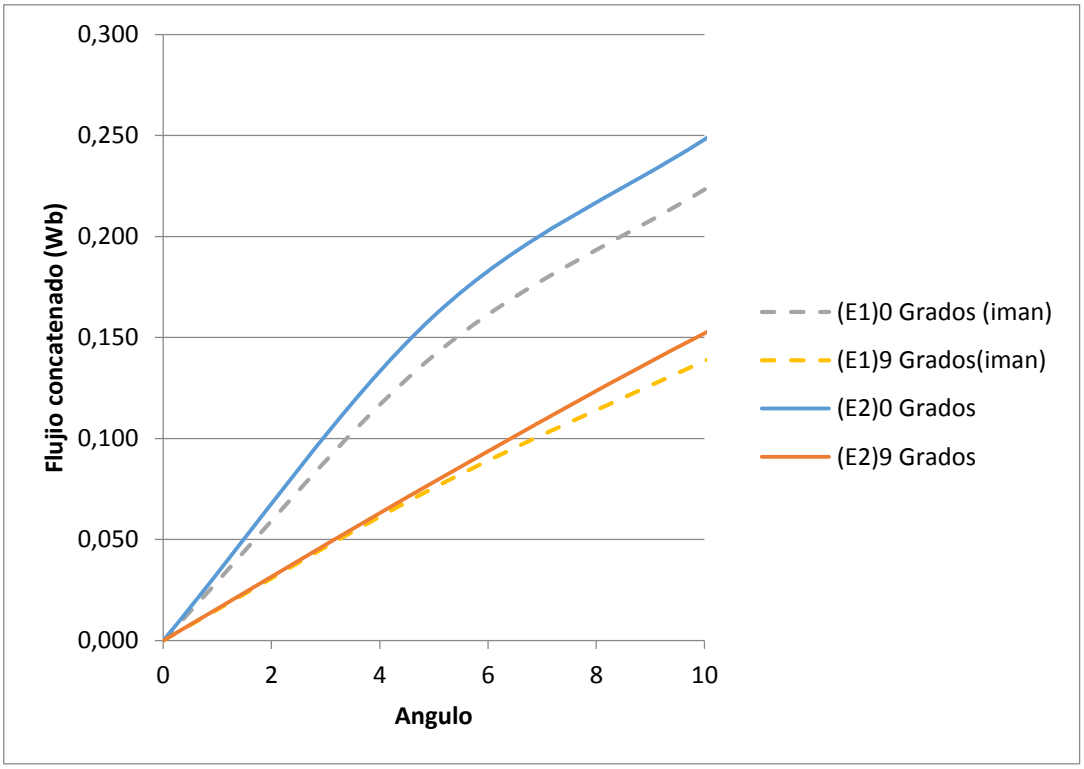


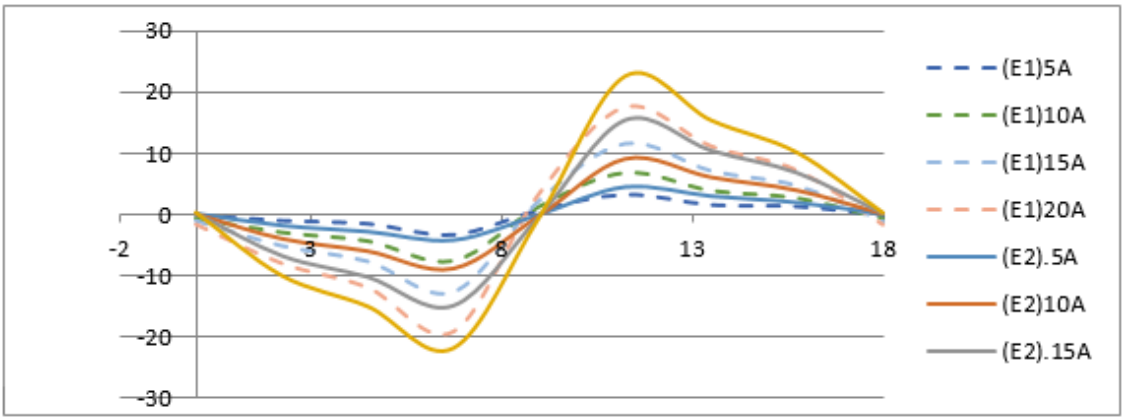
Figura 148.Variacion del Par en función de los Polos

15.3.2 Influencia del ancho de la corona estator y rotor

Es importante saber ajustar le dimensión de las coronas del rotor y del estator ya que puede ocasionar problemas de saturación si estos no son de la dimensión adecuada, por lo tanto la dimensión de tanto la corona del rotor y del estator deberá ser tal que en un funcionamiento nominal la chapa no llegue al punto de saturación.
En un estudio de comparación entre la variación de corona del estator realizado siendo la línea continua de la gráfica la prueba con mayor corona, se observa que cuando la corona aumenta o dicho de otra manera que no se encuentra limitada respecto a su intensidad de funcionamiento el área de trabajo del motor aumenta y trabaja a un flujo mayor.



En cuanto al Par a causa de que se aumenta el flujo concatenado el par también aumentara como se observa en la siguiente grafica en la línea continua.



Habrá que tener en cuenta que esta medida tiene que tener una relación entre la economía del producto y su funcionamiento, si hacemos una dimensión excesiva esta repercutirá en el precio de la construcción del motor en cambio si la dimensión es pequeña esta afectara a la funcionalidad del motor.
En la Figura 149.Ejemplo de fase saturada se observa como la fase está en saturación debido a que la excitación magnética es mayor de la que puede permitir de la dimensión de esta chapa, se observa que le inducción esta sobre 2,21T cuando debería estar sobre 1,8T que es el punto máximo de saturación.

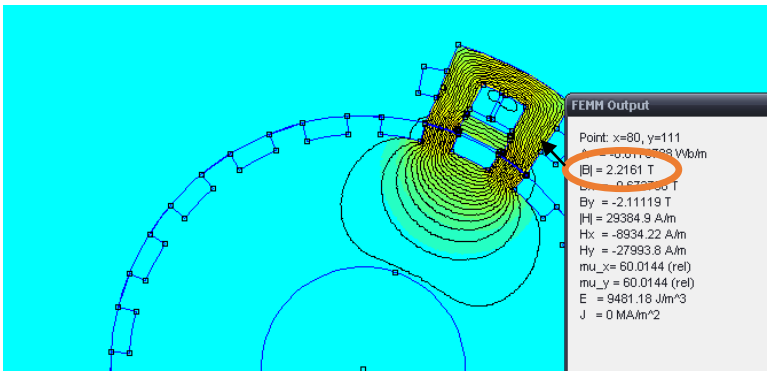


Figura 149.Ejemplo de fase saturada

Por otro lado si observamos el nivel de saturación en la corona del rotor se observa que la inducción se encuentra en 1,08T ya que la superficie de la chapa es superior.

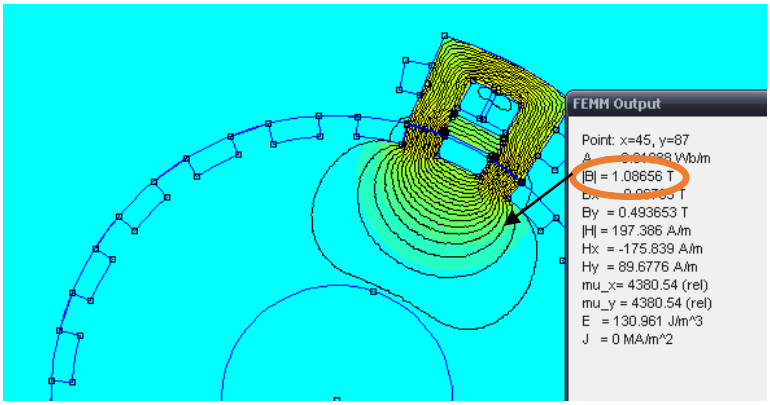


Figura 150.Ejemplo de corona no saturada

15.3.3 Influencia del ancho de polos del rotor y estator

La anchura del polo del rotor tendrá una influencia reflejada en perfil de inductancia, cuando la anchura de los polos del rotor y del estator son de la misma dimensión, el punto máxima de inductancia o mínima reluctancia, solo se encontrara en un instante ya que justo después del momento de alineación de los polos empieza su desalineación,

este será el caso de la línea superior que se observa en la Figura 151.Inductancia del Stroke
Cuando reducimos la anchura del polo rotórico, el momento de alineación es mayor ya que pasa mayor tiempo en alineación con el polo estatórico, pero por otro lado al permitir menos paso de campo magnético también la inductancia será menor, por lo tanto se observa en la figura como en la línea inferior del punto de alineación la inductancia se mantiene constante durante el paso del polo rotórico en frente al polo estatórico, aunque siendo menor la inductancia.
Esta decisión afectara en los aspectos constructivos del motor dependiendo de sus dimensiones.

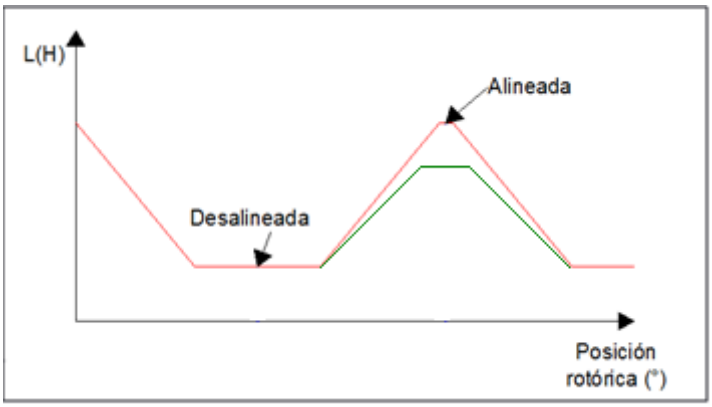


Figura 151.Inductancia del Stroke

Otro parámetro observado en el diseño del motor en cuanto al ancho de polos se puede observar en dos casos:
1º) Polo rotórico mayor al ancho estatórico:
Cuando el polo del rotor es mayor al polo del estator tendremos la ventaja de que en la posición de desalineación el polo se mantendrá durante muy pocos grados en esta posición, ya que en cuanto pierda contacto con el polo de una fase enseguida entrara en desalineación y enseguida volverá a entrar en contacto con el otro polo de la fase.

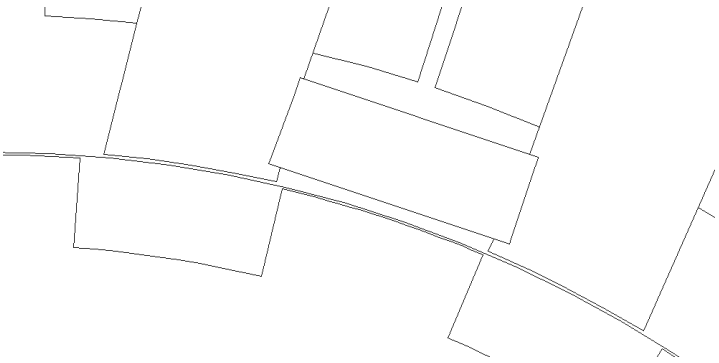


Figura 152.Polo desalineado I

Una desventaja que da es que en el momento que se encuentre alineado este alineamiento será más prolongado ya que el ancho será mayor como se representa en la figura 154 por lo que el momento de la inductancia en ese punto quedara estable representado en la figura 154, si la inductancia queda estable quiere decir que su derivada es cero por lo tanto el Par es cero, la forma del par quedara como se puede ver en la figura…

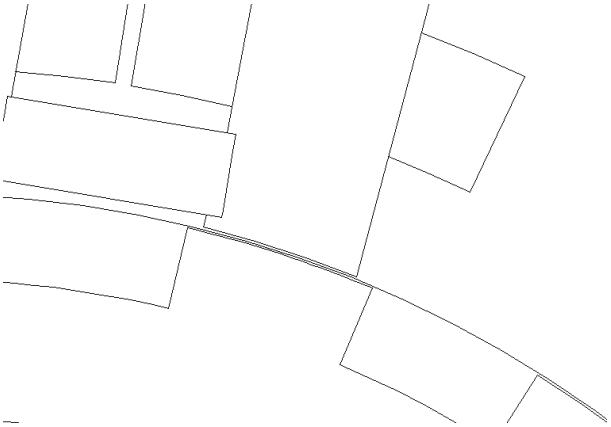


Figura 153. Polo alineado I

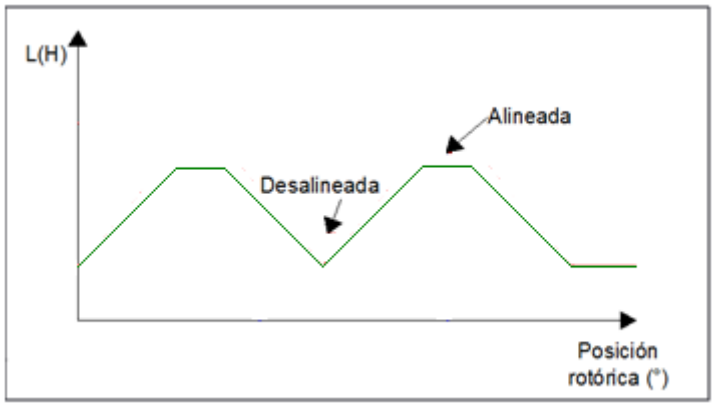


Figura 154.Inductancia Polo rotor > Polo estator

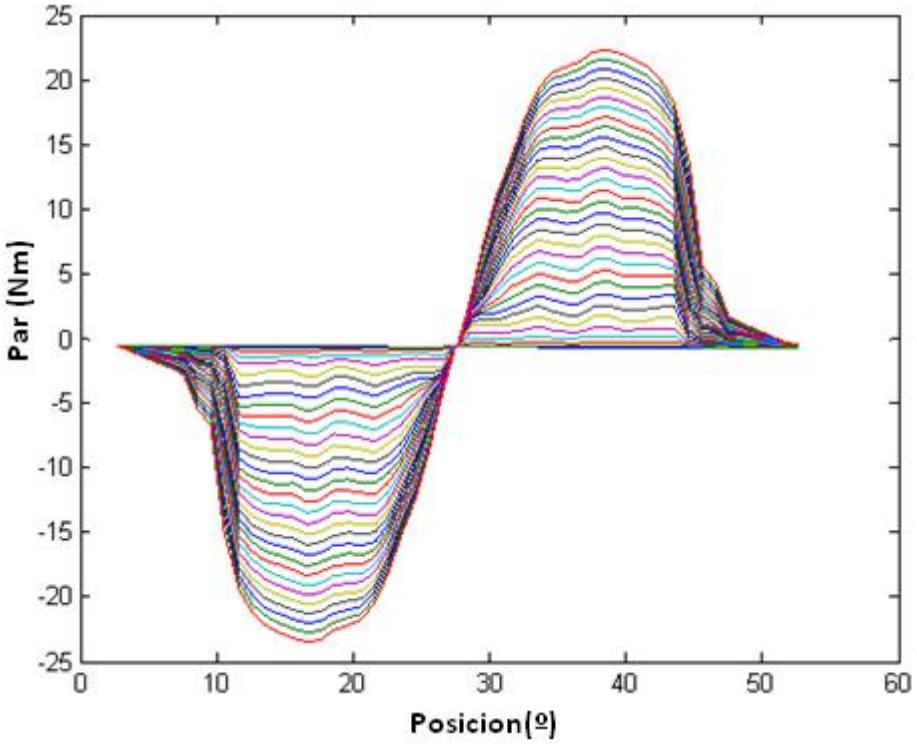


Figura 155.Par Polo rotor > Polo estator

2º) Polo estatórico mayor al polo rotórico:

En este caso ocurre lo opuesto al anterior, el momento de la desalineación es muy prolongado como se puede representar en la figura 156 por lo tanto durante los grados de desalineación la inductancia se mantendrá constante observado en la figura157 y por lo tanto el par será cero, como se observa en la figura158

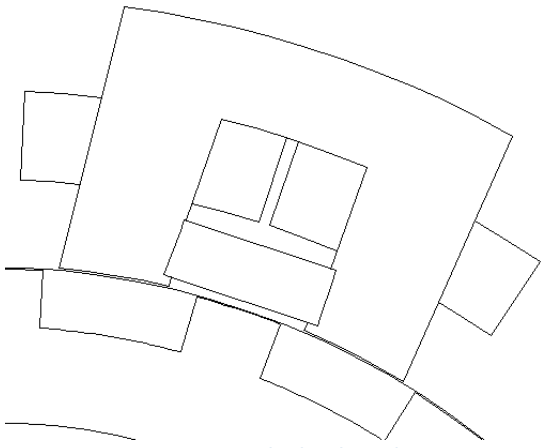


Figura 156.Polo desalineado II

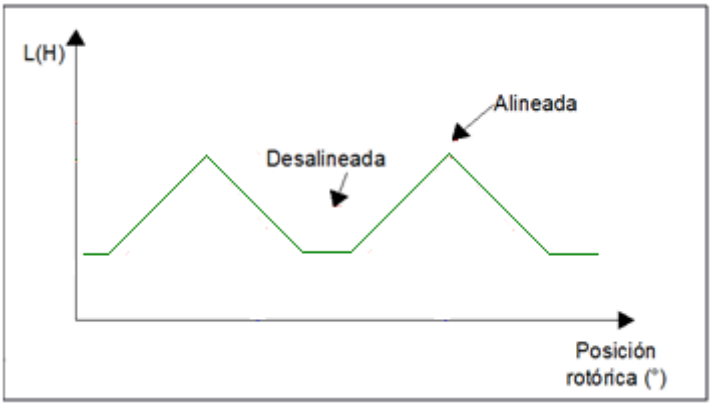


Figura 157. Inductancia Polo estator > Polo rotor

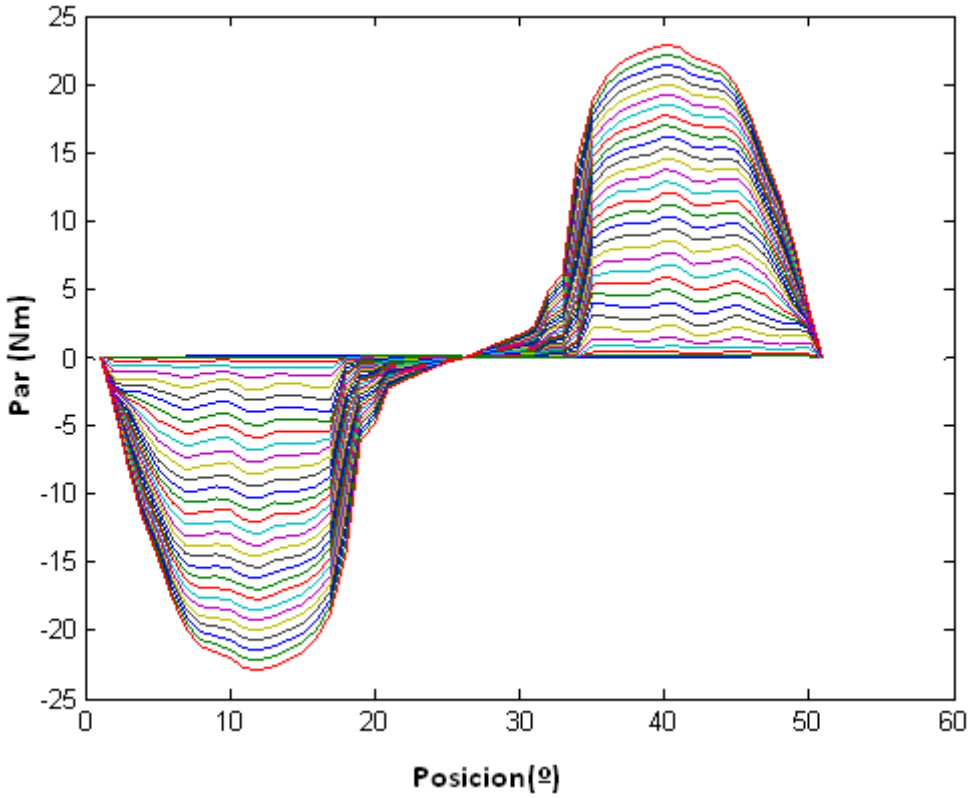


Figura 158.Par Polo estator > Polo rotor

Con los estudios realizados se llega a la conclusión de que la estructura más favorable dentro de los posible es que el ancho de polos del rotor y del estator sean en mayor medida parecidos, teniendo en cuenta que el momento de desalineación y de alineación no sea muy prolongado, para que de esta manera la inductancia no se mantenga constante y esta haga disminuir el par.

Esta medida sería una combinación entre ambos casos donde el momento de alineación y desalineación sea un instante, claro que conseguir esto en un motor no siempre es posible ya que dependiendo de la estructura del motor las medidas no siempre son exactas.

15.3.4 Influencia de número de espiras

En el caso de las espiras afecta de manera que cuando aumentamos el número de espiras hay un aumento de par y por lo tanto mejora la relación par/corriente, este tendrá un problema siendo que al aumentar la cantidad de espiras aumenta también el espacio ocupado por estas en este caso esto no será un gran problema ya que, en este motor hay cierta libertad de dimensionado.
Como se puede ver en la siguiente figura al aumentar el número de espiras también aumenta el flujo concatenado y a su vez el par del motor.

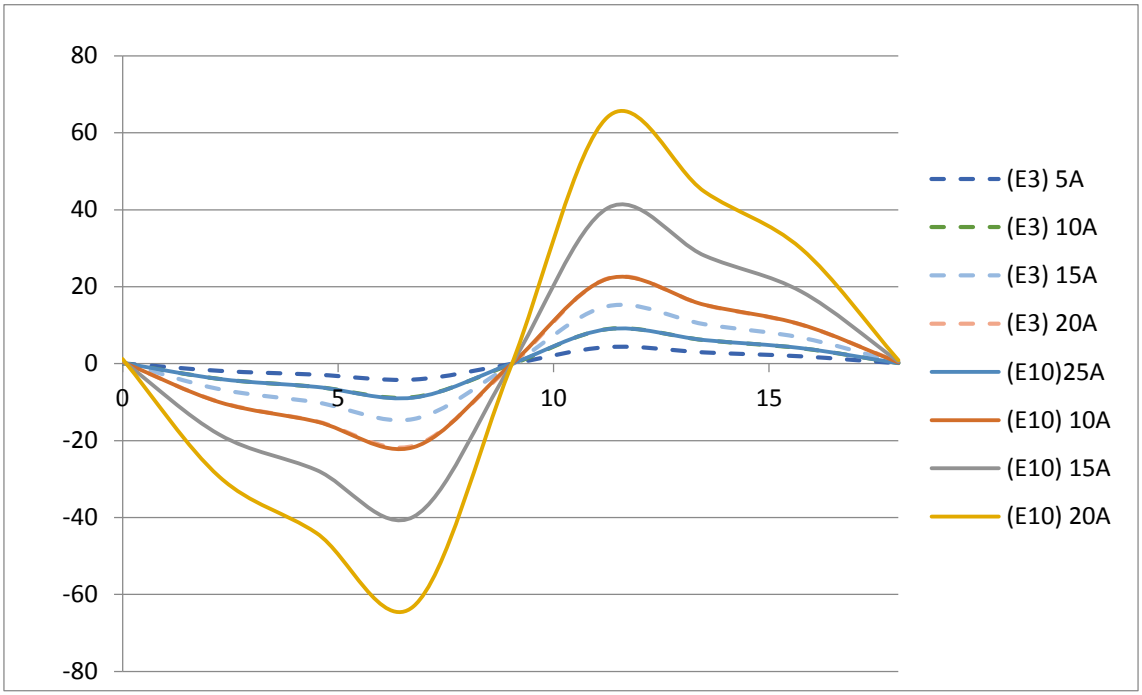


Figura 159.Perfil de par con diferentes espiras

Otra característica en el aumento de espiras es que el par aumenta en bajas velocidades y disminuye en las altas, lo que hace que la curva par velocidad del motor tenga una mayor pendiente.
Se ha realizado un ensayo donde con la misma estructura de motor se ha cambiado el número de espiras por fase y ver como esta afecta en el comportamiento dinámico del motor.
Se observa en la curva par velocidad donde la estructura con mayor de espiras tiene una mayor potencia a bajas velocidades y cuando se aumenta de velocidad esta potencia disminuye respecto al motor de menos espiras

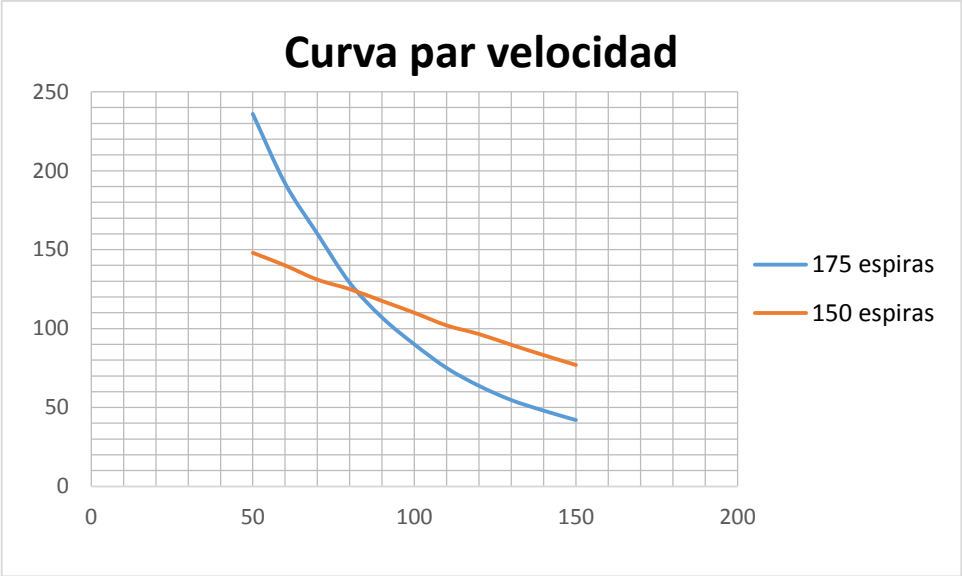


Figura 160. Curva par velocidad en función de espiras

15.3.5 Influencia en la variación del entrehierro

El entrehierro es un factor importante a la hora del diseño del motor, ya que cuando disminuimos el entrehierro aumenta el nivel de par además de disminuir la corriente necesaria para llegar a este valor, el par en máquinas oscilan entre 0,2mm a 0,6mm, dependiendo de la construcción del motor ya que un entrehierro muy pequeño podría llegar a dificultar aspectos constructivos y mecánicos.

Por otro lado una de las características que tiene la variación del entrehierro es la variación en el nivel de saturación de la maquina [42] a menor entrehierro este aumentara la curva de saturación, dándole a la vez una mayor área de energía a la máquina. En la posición no alineada este apenas se variara, por lo tanto la variación de la saturación solo se verá afectada en la variación del entrehierro, como se puede observar en la figura 163[42]

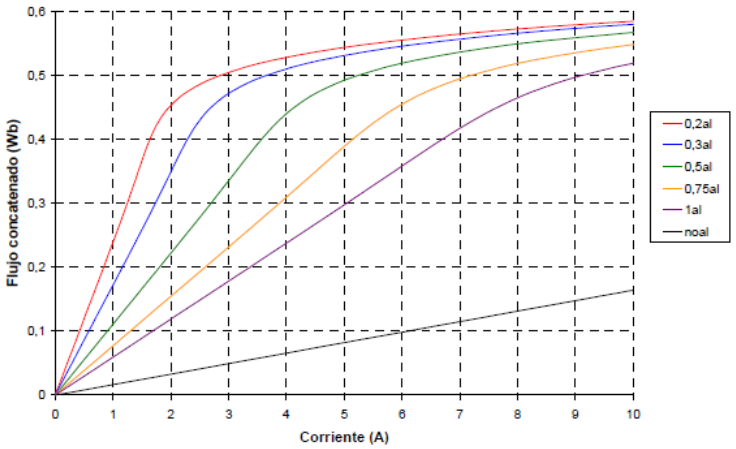


Figura 161.Curva magnetización en función de entrehierro

15.4 Propuesta motor a analizar

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 la menor posible.
A continuación se indicara como hemos diseñado el motor parte por parte y detallando el motivo de su diseño en cuanto a la adaptación de la bicicleta.
A continuación en la tabla 3.1 se detalla cómo afectan los parámetros en el momento del diseño de un motor HRM [27], en referente a la Figura 164

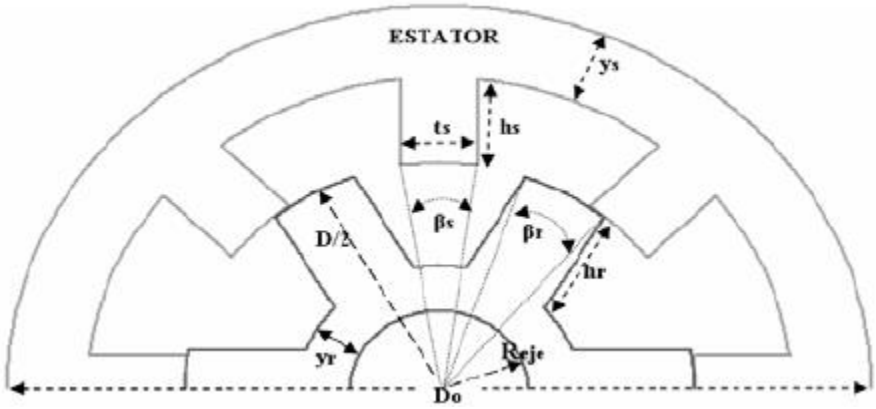


Figura 162. Esquema de medidas

Aumento de potencia		
Tp	Nº de espiras	Al aumentar el número de espiras por polo: • Disminuye wb (velocidad del rotor donde la potencia es máxima) y la velocidad critica wc. • Implica una disminución en el rango de valores de velocidad para el cual la potencia se encuentra en un rango aproximado al máximo
g	Entrehierro	Disminuir el entrehierro, conduce a un aumento de Potencia a baja velocidad (<4000rpm).
ys/ts	ys/ts >0.55	• 0.5<ys/ts <1.3 • Aumentar el ancho del yugo del estator en lo
hr/hs	0.65<yr/ys<1.2 0.8<hr/hs<1.3	Disminuir hr solo si opera a baja velocidad. A alta velocidad la variación de la potencia es mínima.
D/Do	0.55<D/Do<0.65	En lo posible disminuir Do con respecto a D
βr y βs	βr >= βs	Cuando se trabaja a altas velocidades, conviene disminuir el arco del polo del rotor (βr) y el arco del polo del estator (βs) para aumentar la potencia y wc. A velocidad constante, corresponde un valor óptimo de βs para un valor óptimo de Pmax.

Tabla 91. Tabla de variación de parámetros

15.4.1 Numero de Polos

Como se ha visto anteriormente los polos afectaran en el par del motor, por lo que a nosotros nos interesa tener un par elevado ya que el motor deberá resistir un par elevado como se observa en la curva par- velocidad realizada por el estudio mecánico.
El número de polos del rotor será de 20 ya que este nos proporcionara un elevado par, además otro detalle importante de esta elección será el ángulo de disparo del motor.
En cuanto al pedaleo redondo observamos que en 180 grados del giro del motor, es decir en una pedaleada deberá haber un cambio de par en un corto periodo, como el que se puede observar en la figura 165, no es el mismo esfuerzo cuando el pie está en posición vertical a cuando el pie está en posición horizontal, por lo tanto con el motor deberemos simular esta cambio de esfuerzo.

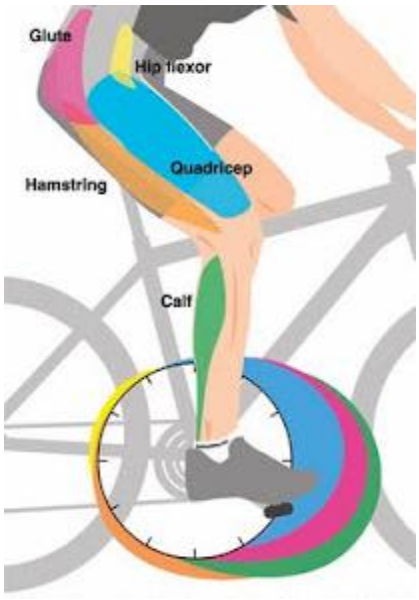


Figura 163.Pedaleo

Como se ha indicado anteriormente el stroke del motor tendrá 18º es decir que en una fase pasaran 18º grados para volver a repetir la secuencia de alineación esto será debido a que el rotor tiene 20 polos, teniendo en cuenta que el motor tendrá 3 fases, este stroke se debe dividir entre 3 para averiguar los grados para que el rotor pueda encontrarse con la siguiente fase, esto nos da 6º lo que significa que cada 6 grados nos podemos permitir un cambio de par en el giro del motor lo que será adecuado para una simulación de un pedaleo redondo.

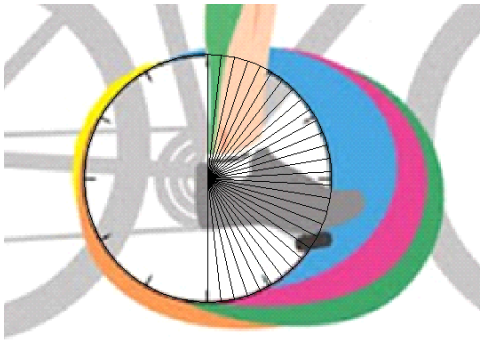


Figura 164.Grados de control del motor

15.4.2 Ancho de corona estator y rotor

La corona del rotor y del estator será un factor importante en el diseño del motor ya que nos permitirá ajustar la saturación del motor dependiendo a que intensidad queremos que esta trabaje, para ello se ha ajustado gracias al programa FEMM, donde analizamos a que intensidad se satura el motor implementando una intensidad en el bobinado el cual nos proporciona una pico de Par suficiente para el que nosotros queremos conseguir, y aumentar la dimensión de este hasta que la chapa se encuentre por debajo del nivel de saturación.
La siguiente imagen esta realizada a una intensidad de 30A, y se observa como la saturación se mantiene por debajo de una inducción de 1,8T.

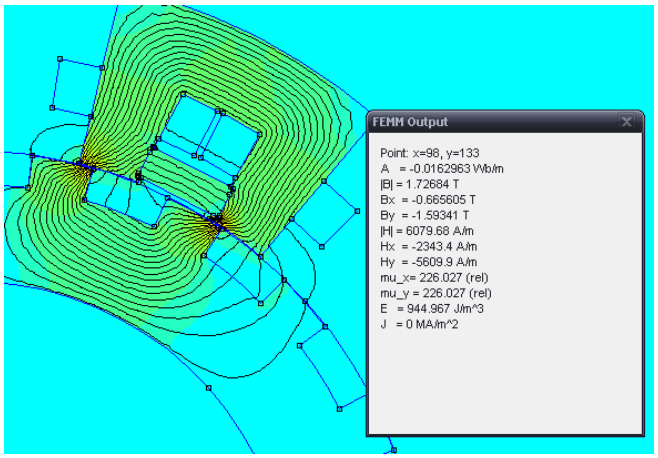


Figura 165.Influencia de corona del rotor y estator

Se observan las medidas de la corona del rotor y del estator en la figura 33, la corona del rotor es algo superior ya que tendrá que superar una mayor excitación magnética debido a la excitación que produce el imán que recorrerá por la corona del rotor.

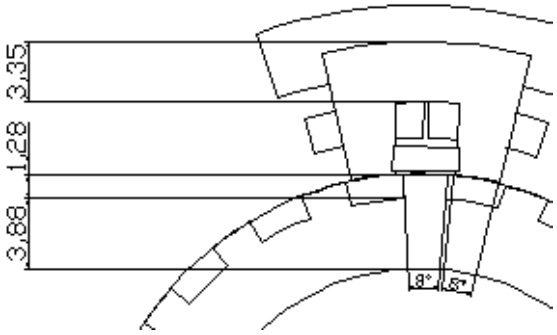


Figura 166.Medidas de las coronas

15.4.3 Ancho de polos rotor y estator

El ancho de los polos ha sido en función de los polos escogidos, el ancho de los polos ha sido inferior al ancho de las ranuras como se observa en la figura, se ha intentado que la relación entre la anchura del polo y la anchura de las ranuras sea lo más próxima a la unidad, para que la zona de desalineación sea mínima.
Por otro lado los anchos del polo del estator los hemos igualado al ancho de polos del rotor para que de esta manera el punto de alineación también sea mínimo para que durante el stroke mantenga durante todo su periodo un par superior a cero, es decir que $\beta r = \beta s$

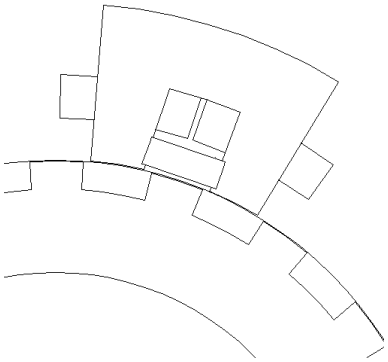


Figura 167.Anchura de polos

Por otro lado si reducimos la altura de los polos del rotor (hr) optimizara el funcionamiento

15.4.4 Numero de espiras

El número de espiras elevado hará que la potencia a bajas sea mayor es decir tendrá una pendiente mayor, por eso el número de espiras se elegirá de manera que se adapte mejor a la curva de potencia obtenida por el estudio mecánico.
En este caso el número de espiras será de 140 para que la curva par velocidad en bajas no tenga mucha pendiente.

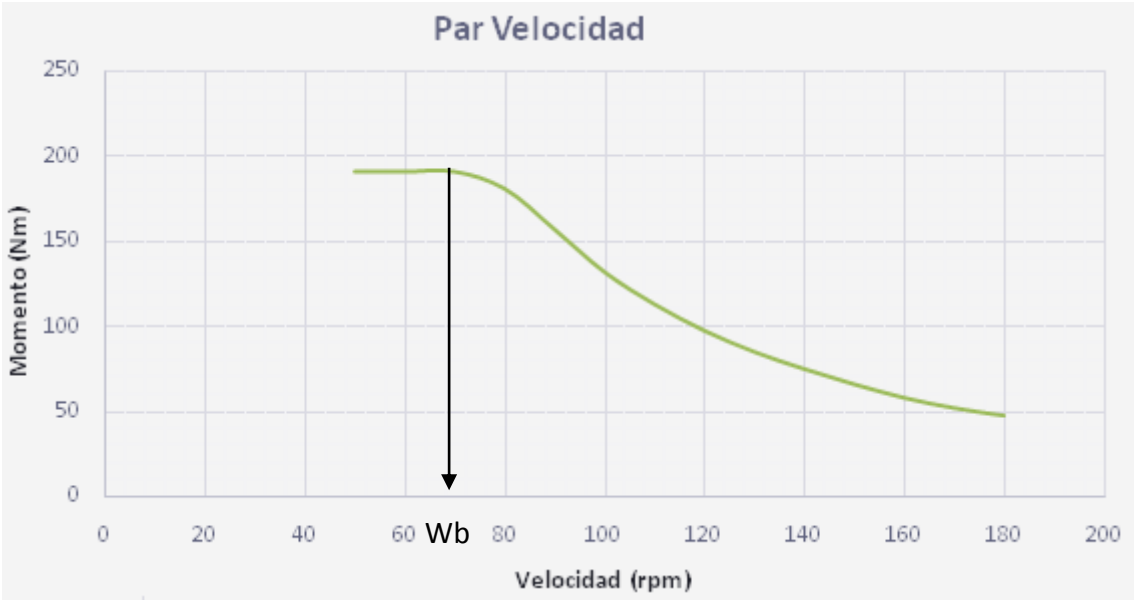


Figura 168. Velocidad Base del motor y pendiente de la curva

En la curva Par Velocidad se puede apreciar que la velocidad base del motor es de 70 rpm.

15.4.5 Entrehierro

El entrehierro elegido para la maquina será de 0,4 mm, un intervalo medio entre el margen exigido, para el nivel de saturación no sea muy grande y a su vez evitar posibles desalineaciones mecánicas a causa de las fases ya que estas solo están colocadas en un sentido de la rueda del rotor.

15.4.6 Características

Aquí se muestran las medidas del motor seguidas de una tabla más específica

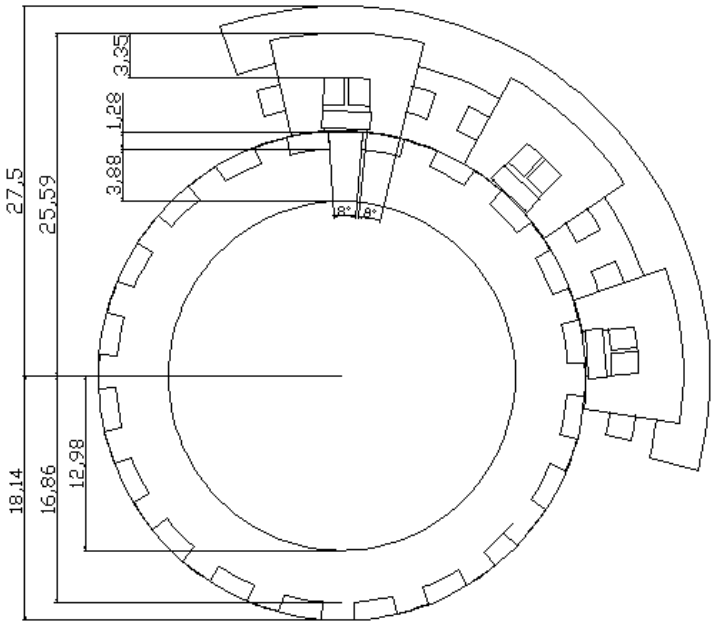


Figura 169. Medidas del motor

Parámetro	Longitud	Unidades
Diámetro exterior	55	cm
Diámetro rotor exterior	36,28	cm
Diámetro rotor interior	25,96	cm
Diámetro estator exterior	51,18	cm
Diámetro estator interior	36,44	cm
Corona rotor	3,35	cm
Corona estator	3,88	cm
Arco polar rotor	8	º
Arco polar estator	8	º
Entrehierro	0,4	mm
Numero de polos rotor	20	-
Numero de fases	3	-
Stroke	18	º
Tipo de chapa	Chapa FeV 600	
Alimentación	150	Vcc
I nom	20	A
Imax	40	A
Velocidad base	70	rpm

Tabla 92.Caracteristicas del motor

15.4.7 Resultados

Con la utilización del programa FEMM (análisis de elementos finitos), se han obtenido los datos necesarios para saber el comportamiento del motor en estado estático y dinámico.
La siguiente figura es un ensayo realizado a 10A y se puede observar el recorrido del flujo como pasa por la corona del rotor y del estator y no existe una dispersión por la corona rotórica que podría ocurrir en el momento en que la intensidad fuera muy alta.

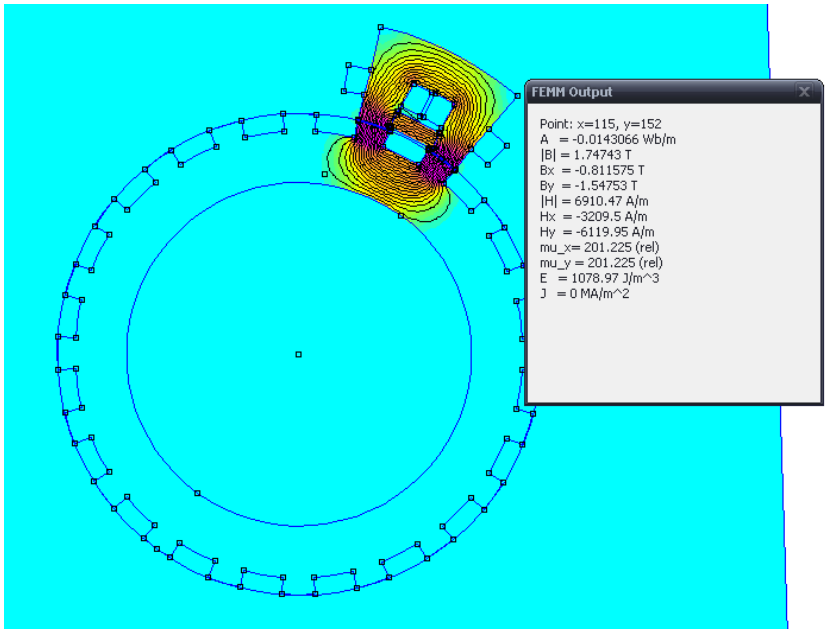


Figura 170.Densidad de Flujo del motor

Estos datos han sido el comportamiento del par en todo un stroke de una sola fase, como se puede observar en la figura 173, siempre hay un notable aumento de par hasta la mitad de la gráfica que es donde se produce la desalineación, esto quiere decir que la inductancia es siempre creciente hasta esta primera mitad y luego decrecerá negativamente.

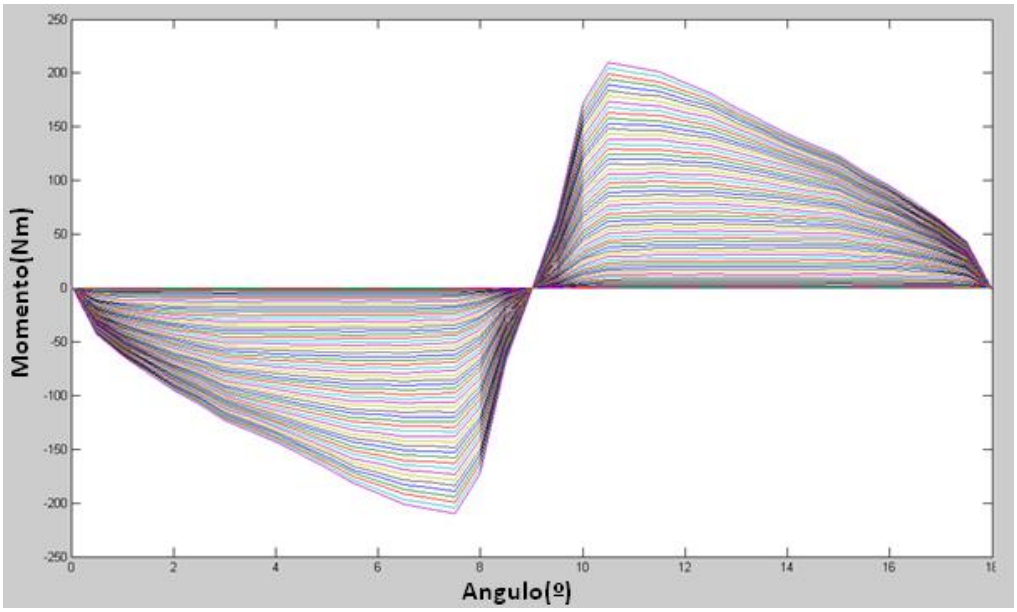


Figura 171.Grafica de Par del motor

Por otro lado se observa en la figura 174 el flujo concatenado que es el resultado del flujo de todas las espiras en conjunto, donde esta representa el flujo magnético por fase en función de la posición de los polos.

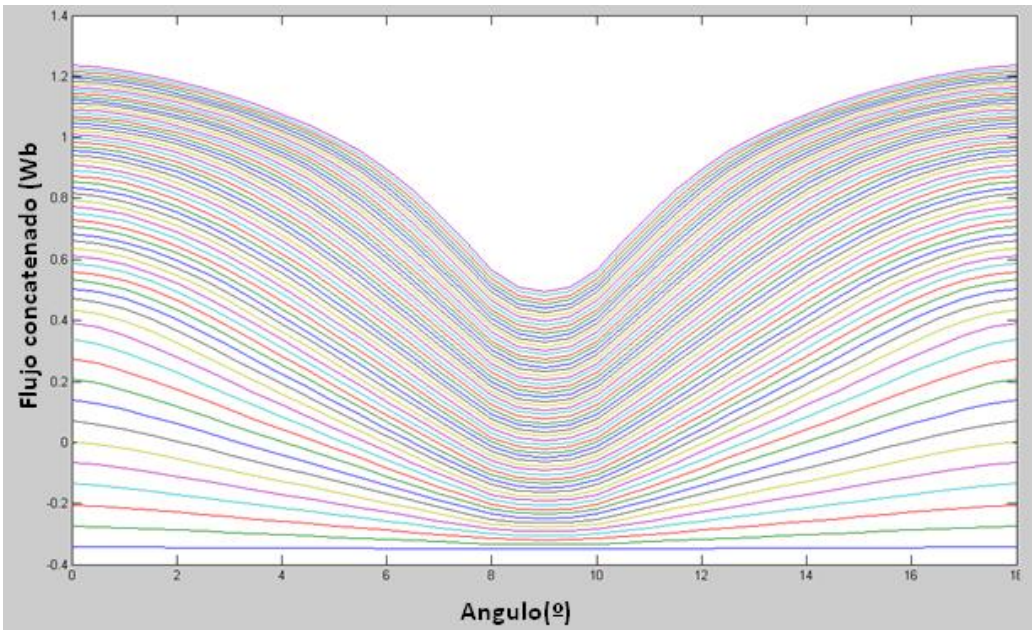


Figura 172.Grafica de Flujo concatenado del motor

Con estas dos graficas se puede obtener también la gráfica de las curvas de magnetización en la figura 175 del motor donde nos indicara cuál será su área de trabajo, además de también saber cuál será su intensidad límite de trabajo, indicándonos su nivel de saturación, esta se puede observar que está cerca de los 8 A.

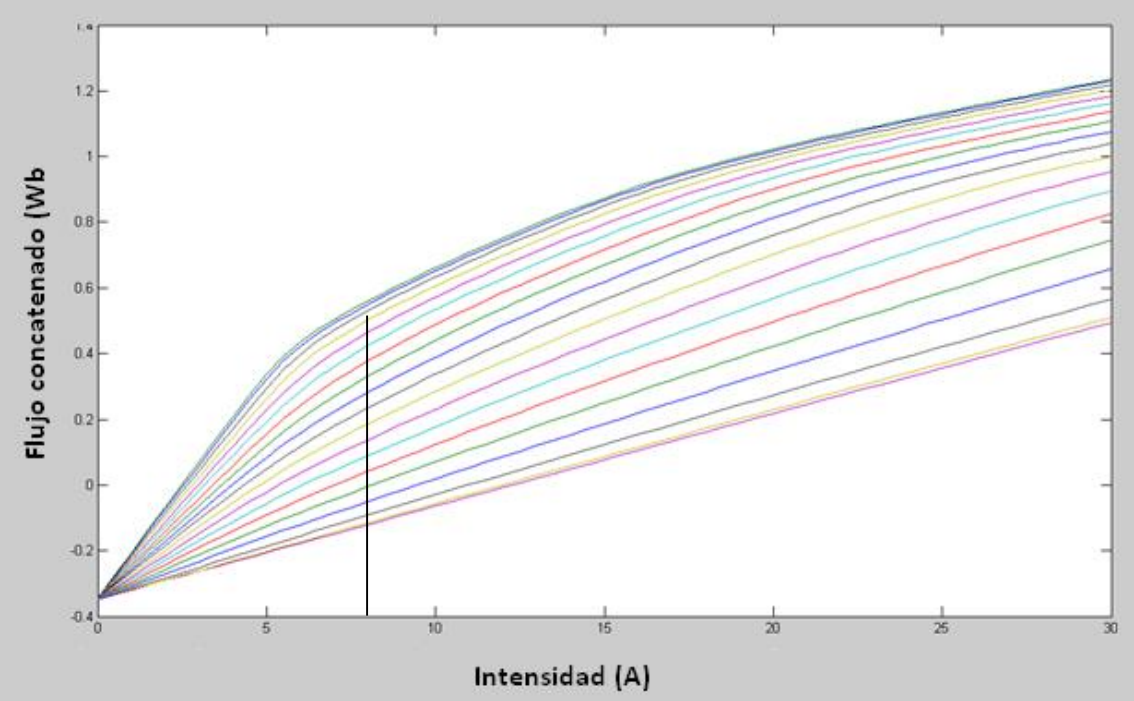


Figura 173. Curva de magnetización del motor

Una vez obtenidas las gráficas estáticas, se introducen los datos en un simulador de motor HRM donde se obtienen las características dinámicas de este.
Se han obtenido las curvas par velocidad del funcionamiento natural del motor, es decir sin aplicar ningún tipo de control, únicamente el convertidor.
En la figura 176 se observa la curva par velocidad obtenida del motor en régimen de comportamiento natural.

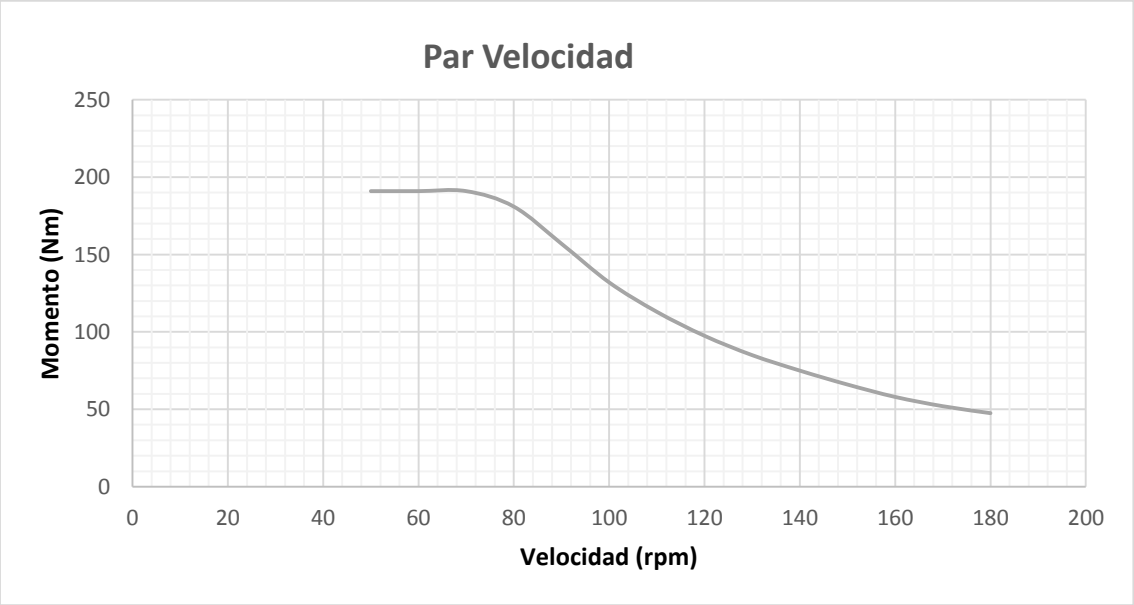


Figura 174.Curva Par velocidad del motor

Una vez se ha obtenido la curva de potencia del motor se realizara los ensayos para ver como este motor responde al control y si será capaz de alcanzar los valores mínimos establecidos por lo estudios mecánicos de la bicicleta.

15.5 Otras aplicaciones

Gracias a los estudios y análisis realizados anteriormente para el diseño del motor se ha llegado a las conclusiones con el motor utilizado, que por la versatilidad de este en cuanto a su construcción, puede permitir su uso para otras aplicaciones, en las cuales, se precisen requisitos ya mencionados los cuales da el motor.
La aplicación mencionada en este proyecto, la cual no se ha podido abarcar debido a ser de menor prioridad, ha sido el campo de la rehabilitación.
En cuanto al accionamiento deberá cumplir unos requisitos similares a los exigidos por la bicicleta estática, con la diferencia que no será necesario un par tan elevado, una velocidad menor y a la vez una alta precisión del movimiento.
Para que estas condiciones se cumplan deberán haber pequeñas variaciones en el motor en cuanto a su construcción como:
-Para que el control del par en cuanto a su movimiento aumente su precisión, pueden haber dos maneras:

$$Paso\ polar = \frac{360}{Polos\ rotor \cdot num\ fases}$$

-Aumentar el número de polos, manteniendo el número de las fases, para que el paso polar se reduzca y por lo tanto el control se podría realizar en un fragmento menor de movimiento, teniendo en cuenta que al tener mayor número de polos el ancho del polo quedaría reducido por lo tanto esto afectaría a la reducción del par ya que la inducción no podría llegar a un punto tan alto, aunque esto no sería un problema ya que este motor no requiere un par muy elevado.

-Si es posible el aumento de número fases se puede mantener la estructura del motor, añadiendo otra fase y de esta manera reduciríamos el paso polar siendo el objetivo a conseguir.

16 Control.

Para el control del accionamiento se utilizara un modelo Matlab/Simulink [30] el cual está diseñado para analizar motores de reluctancia autoconmutada. Dicho sistema de simulación se muestra en el anexo C.3.
A continuación se detallara una breve introducción a los métodos de control para familiarizarse con diferentes técnicas y ver cuál será la más adecuada para el control de este motor y su eficiencia.

16.1 Angulo de disparo.

La función del ángulo de disparo (θ_d) será el ángulo indicar cuál es el ángulo en el que el interruptor del convertidor se activara
Gracias a este ángulo podremos definir si el motor trabaja como motor o como generador.
Esto dependerá si escogemos la primera mitad del Stroke o la segunda ya que uno de ellas nos dará un Par positivo (funcionamiento motor) y la otra un Par negativo (funcionamiento generador)
Cuando analizamos nuestro motor de forma natural es decir a pulso único, sin ningún tipo de regulación, se analizaran los ángulos desde la zona alineada a la zona no alineada se obtendrá la mayor relación par-velocidad y un rendimiento alto.
Cuando se cambian los ángulos de forma que el interruptor trabaje a menos grados el rizado de par será menor y el par medio disminuirá.

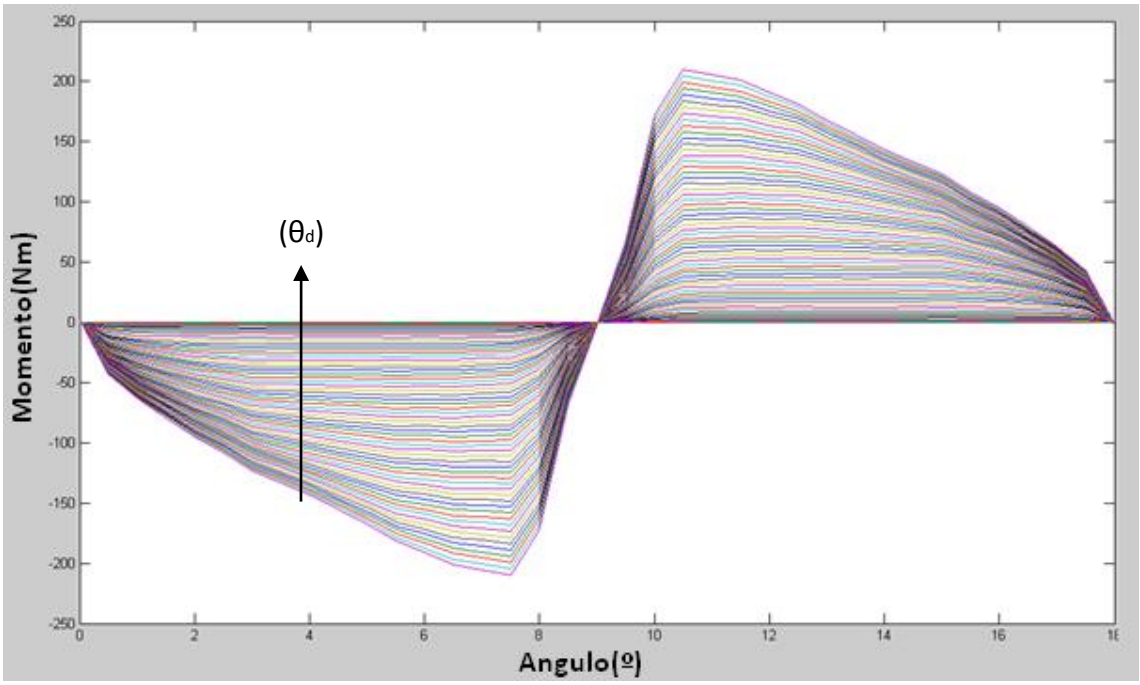


Figura 175. Muestra de ángulo de disparo

Cuando el ángulo de disparo lo establecemos en su forma natural el rizado de par es mayor, el cual podemos obtener.

16.2 Angulo de conducción.

El ángulo de conducción indicara (θ_c) durante cuantos grados conducirá el interruptor, dependiendo de la geometría del motor, este ángulo no podrá sobrepasar el ángulo de paso (ε) del motor.

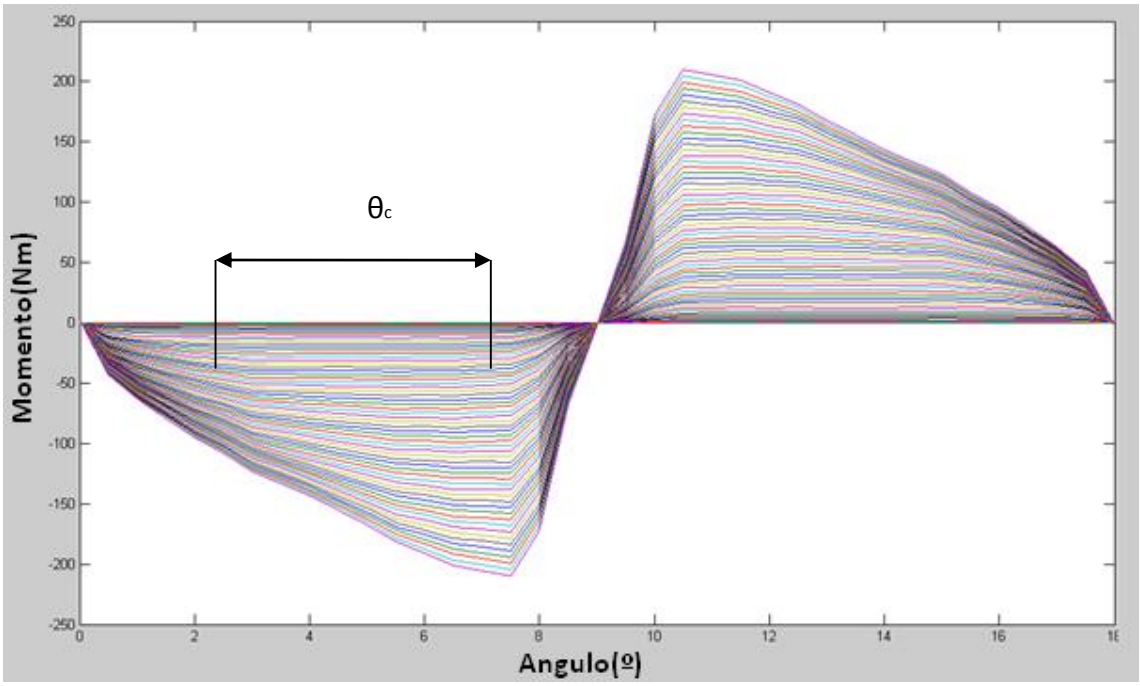


Figura 176. Muestra ángulo de conducción

Este ángulo de conducción cuando trabaje en su ángulo de paso, abarcando la zona motora o generadora del motor, dará su mayor relación par-corriente.
Si el ángulo de conducción es pequeño el rizado de par aumentara, el máximo ángulo de conducción será el ángulo de paso del motor

Trabajando con el control por histéresis el incremento del ángulo de conducción producirá un aumento del par y disminuirá el rizado de este, hay que tener en cuenta que se cumpla $\theta_c \leq \varepsilon$, como en el caso de pulso único.

16.3 Intensidad de referencia.

Cuando establecemos la intensidad de referencia el par y el rendimiento del motor aumentara, aunque si esta referencia está por encima del trabajo nominal del motor, este tendera a que se caliente el motor, ya que este trabajara sobresaturado para el material ferro magnético.

16.4 Control del accionamiento.

Hay tres maneras distintas para el control del motor para que este pueda trabajar a un par o una velocidad deseada, estableciendo una de estas como referencia, se distinguen tres tipos de control más utilizados:

16.4.1 Control de pulso único.

Este control mantiene constante el pulso de conducción constante en cada fase durante todo el periodo de ángulo de conducción.

Variando el ángulo se puede obtener una potencia constante.
Utilizando el ángulo de conducción como en ángulo de paso obtendríamos la característica natural del motor estudiado.

16.4.2 Control de histéresis.

Este es un control simple usado para procesos de evolución lenta, donde se puede admitir oscilaciones entre dos valores,
El control de histéresis trata de establecer un valor de corriente fijo, al cual se le llama valor de referencia, se establece un par constante al que queremos que el motor trabaje, esta lectura real del valor es introducido en un en un regulador de histéresis donde tiene un margen mínimo y máximo de error prefijado, y se obtiene la señal deseada.

16.4.3 Control PWM.

El control PWM (Pulse Width modulation) se utilice cuando queremos trabajar a un par deseado, el error de esta medida es obtenido de la comparación del valor de referencia de corriente del motor se compara con una señal triangular, donde la señal establece la frecuencia de conmutación de los interruptores del convertidor,
El resultado que este da es la apertura y cierre de los interruptores del convertidor.

16.5 Modos de conmutación.

La conmutación de las fases depende de la posición del rotor que es conmutada en cada momento por el giro, la manera de mantener la intensidad para obtener el par deseado se debe trocear la intensidad y los métodos de troceado son:

16.5.1 Soft Choping.

Este método de troceado soft choping trata de abrir y cerrar los interruptores superiores del convertidor para controlar la corriente que necesita el motor en esa fase.
El método del soft choping o “conmutación unipolar” consiste en abrir y cerrar los Interruptores superiores para cada fase en función de si se necesita más o menos corriente en dicha fase. Tomando la función de un troceador. Mientras que los interruptores inferiores únicamente son utilizados para la conmutación, como observamos en la figura 177 [43] Esta estrategia de conmutación no debe de ser implementada mientras el modo de funcionamiento del accionamiento sea el modo generador debido a que siguiendo esta estrategia de conmutación la energía se disipa en forma de calor a través de la resistencia del motor. Por lo tanto en nuestro motor no podemos utilizar este método ya que trabajaremos en modo generador.

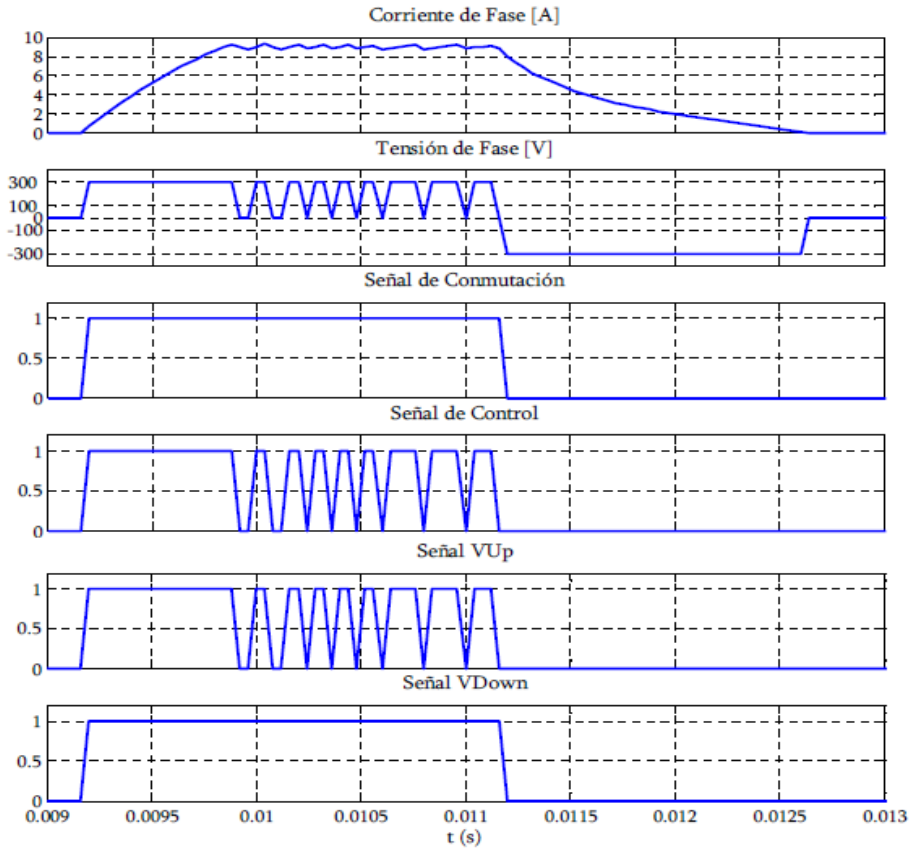


Figura 177. Ejemplo Soft-Chopping

16.5.2 Hard Choping.

El hard choping o conmutación bipolar consiste en abrir y cerrar los interruptores superiores e inferiores a la vez. Respondiendo a la señal de regulación de corriente y conmutación de fases ambos interruptores. Este método de conmutación es el indicado para utilizar con velocidades bajas debido a que el trabajo de los interruptores es bastante elevado. Este método de conmutación únicamente se puede utilizar con convertidores que tengan 2 interruptores de estado sólido en la misma rama observados en la figura180 [43]

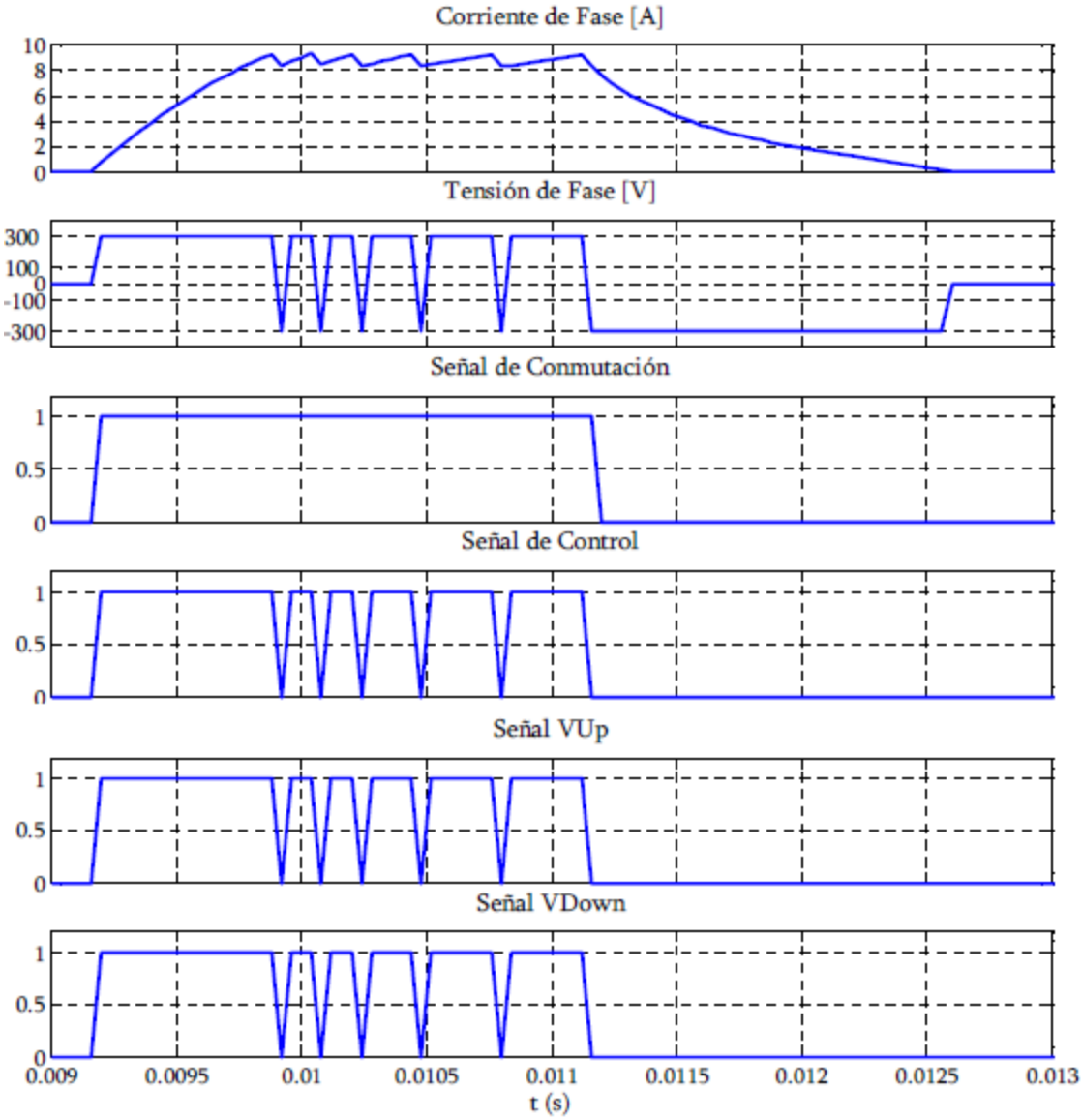


Figura 178. Ejemplo Hard Chopping

16.6 Consideraciones de diseño del controlador.

Para realizar un control sobre el motor para que actúe tanto en la forma motora como en la forma generadora se deben de tener en cuenta diferentes aspectos.

- El controlador debe permitir una alimentación reversible, para hacer posible tanto la alimentación de energía del motor, como la absorción de energía del mismo.

- Para que se pueda almacenar y alimentar a la vez el convertidor debe de contener elementos de almacenamiento de energía. Estos elementos pueden ser tantos baterías como baterías de condensadores. Siempre teniendo en cuenta que la tensión de estos elementos de almacenamiento deben de tener la misma tensión de alimentación del motor.

- Para el funcionamiento como generador, previamente se deben de magnetizar las fases y para ello se debe de inyectar corriente sobre ellas, por ello es necesario contar con algún elemento con carga que sea capaz de llevar a cabo la operación de magnetización.

16.7 Control utilizado

16.7.1 Rizado de Par

Uno de los objetivos de este control es la reducción del rizado de Par en el motor, como se observa en la figura181 este rizado es la oscilación que produce el par para conseguir un valor medio, en el caso de que el rizado sea muy elevado este se puede apreciar en el momento del pedaleo, y lo que se quiere conseguir es que este sea lo más suave posible.

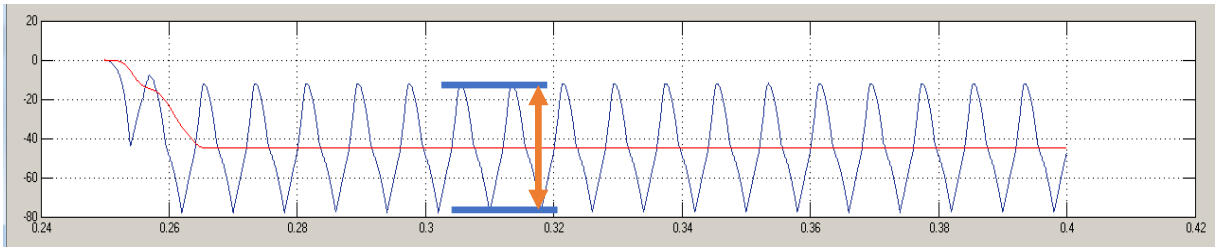


Figura 179. Muestra del rizado de Par

16.7.2 Curva de Potencia

Una vez se ha obtenido la curva par-velocidad natural del motor, se adaptara al estudio mecánico para ver si el motor puede abarcar el estudio mecánico previsto.
Como se puede observar en la figura 182 el motor está sobredimensionado y puede alcanzar el máximo de la gráfica.
Por otro lado se observa que gracias al controlador esta curva par velocidad la podemos rectificar al punto de trabajo que se desee, como límite hemos marcado el punto más bajo de la gráfica el cual se conseguirá ajustando el controlador.

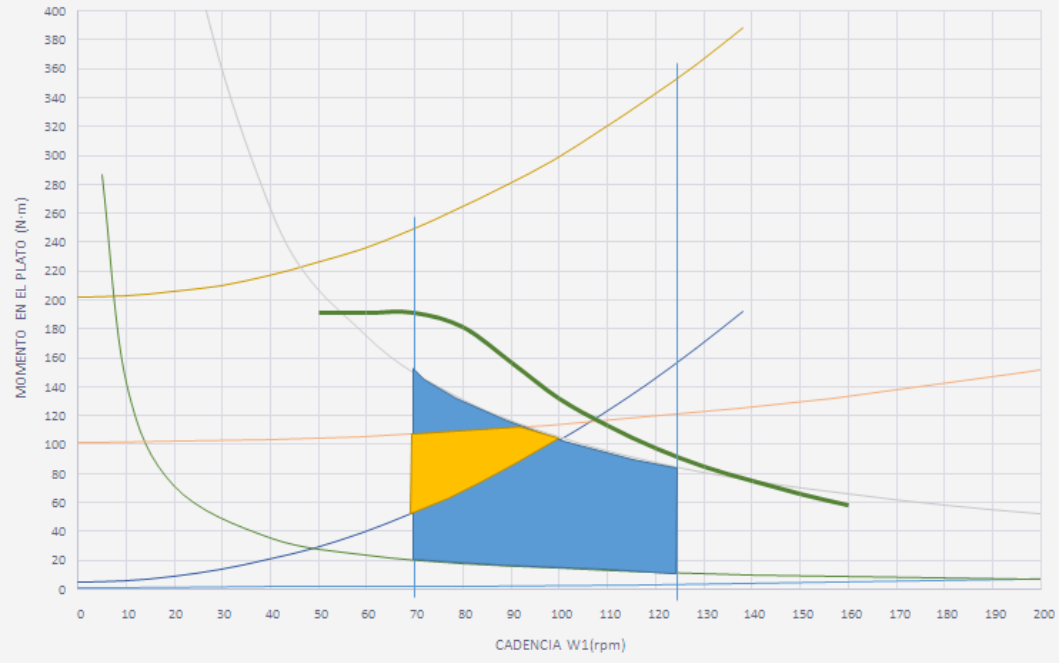


Figura 180.Curva Par velocidad sobre estudio mecánico

16.7.3 Ensayos

Antes de todo se realizara unos ensayos para ver como el motor reacciona en estado dinámico, viendo de qué modo el motor puede desplazarse por toda la zona de trabajo gracias al controlador.
Estos ensayos serán unos ensayos de tendencia los cuales se han tomado valores extremos y viendo los resultados comparados se ha podido observar la tendencia hacia el cambio de la variable.

Otro objetivo a conseguir es que además que el motor trabajo en un determinado punto es decir a un par y velocidad deseada, lo haga de una forma óptima con un rizado de par mínimo, para eso se realizaran los siguientes ensayos:

16.7.3.1 *Variación del Angulo de conducción*

En primer paso se obtendrán las curvas de par velocidad con ángulos de conducción natural y a pulso único, y se compararan con otros ángulos de conducción y ver cómo reacciona la curva de par velocidad respecto a los ángulos de conducción.

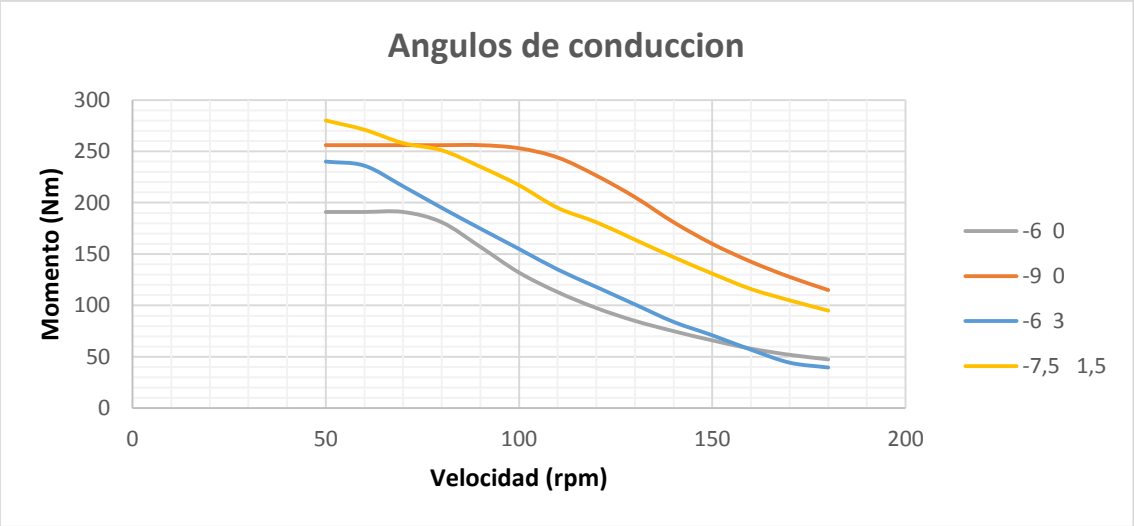


Figura 181.Influencia ángulos de conducción sobre curva par velocidad

Como se puede observar en las siguientes graficas se han tomado las dos curvas par velocidad, donde se apreció que cuando se modifica el ángulo de conducción manteniendo una intensidad constante, la curva de par velocidad también varía dependiendo de los ángulos modificados.
Se puede observar que en ángulo de conducción natural es decir a "(-6 0), es donde el motor da el par inferior. A partir de ahí pueden haber varios comportamientos se han variado 3 grados el ángulo de conducción de varias maneras y ver como esta varía en la curva Par-Velocidad:

- Adelantar el ángulo de disparo (-9 0):

Cuando se adelanta el ángulo de disparo respecto al ángulo natural el par tiende a aumentar casi paralelamente al ángulo natural

- Atrasar el ángulo de disparo (-6 3)

Cuando el ángulo de disparo se retrasa respecto al ángulo natural el par aumenta ligeramente a bajas velocidades pero en el momento en que se aumenta la velocidad el par disminuirá respecto al ángulo de conducción natural

- Combinación de modificación de ángulo (-7,5 1,5):

La última opción es atrasar y adelantar los ángulos de manera igual, se ha observado que de esta manera obtenemos un mayor par a bajas velocidades respecto al ángulo de conducción (-9 0) que hasta ahora había sido el mayor obtenido, pero por otro lado a medida que aumentamos la velocidad el par se verá inferior respecto a la misma

16.7.3.2 *Intensidad de referencia*

Con el ángulo de conducción más óptimo en este caso será el de conducción natural se verá cómo la curva varia cuando le variamos la corriente de referencia limitándole a valores inferiores, en este caso como límite superior se utilizara la intensidad de referencia 40A que es la que el motor soporta como pico y como inferior escogeremos una intensidad de referencia de 5A con la técnica de control hard chopping, detallado más adelante.

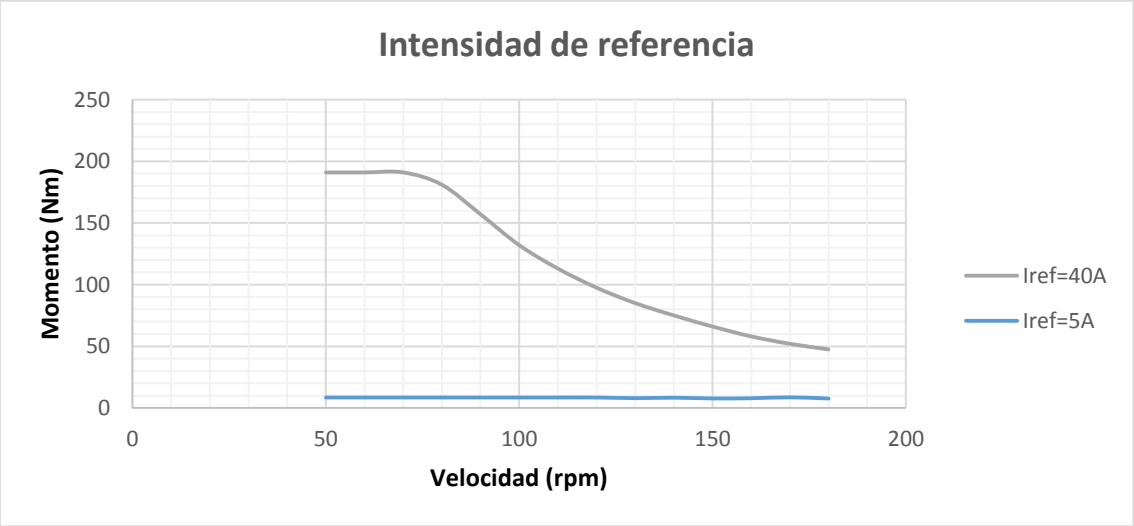


Figura 182. Influencia Intensidad de referencia sobre la curva par velocidad

Por otro lado se han realizado unos ensayos dinámicos donde manteniendo una velocidad y un ángulo de conducción constante se ha variado la intensidad de referencia observado de qué manera aumenta el par, se ha repetido el ensayo para diferentes ángulos, está representado en la figura 185 y se observa que el par responde a la corriente de forma lineal,

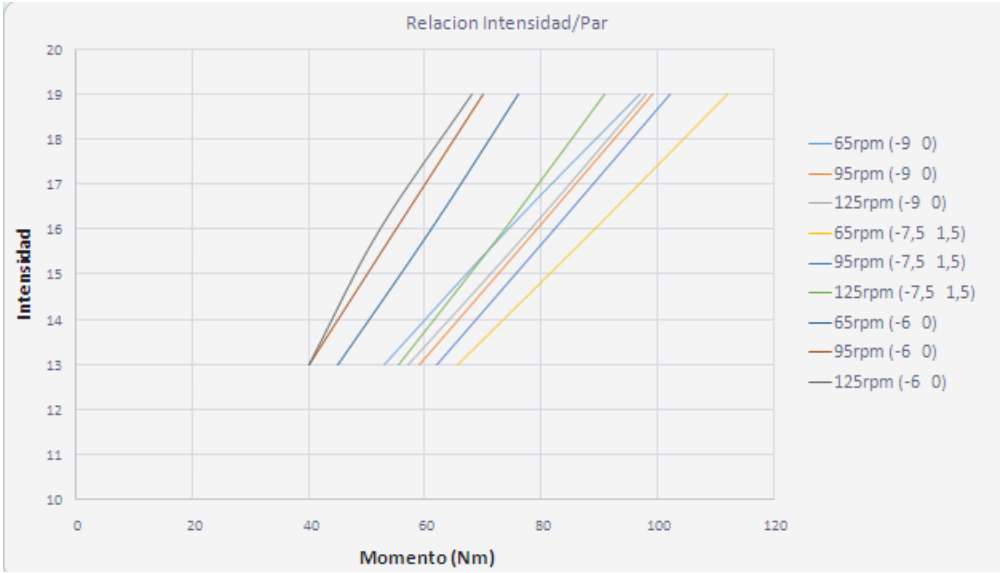


Figura 183. Relación Intensidad Par

16.7.3.3 *Hard-chopping Soft-chopping*

Se analizara gráficamente con la ayuda del SIMULINK como afectan las diferentes técnicas de control y como se consiguen niveles óptimos de control en función de la velocidad par que se quieran conseguir.
Para empezar se analizara una regulación de control de corriente a una corriente de 10A con una conmutación soft choping y ver como esta actúa gráficamente, a continuación con la misma intensidad de referencia se utilizara una conmutación hard chopping.

- Soft chopping

  Como se observa en la siguiente figura186 la fase representada con la línea amarilla, la flecha verde representa el corte cuando llega a una intensidad de 10A aunque esta sigue subiendo hasta aproximadamente 20A, esto es debido a que cuando la corriente llega a su valor de referencia la alimentación deja de alimentar, aunque el problema es que por la magnetización de la bobina la corriente sigue aumentando, con el problema de que el par no se puede controlar con precisión

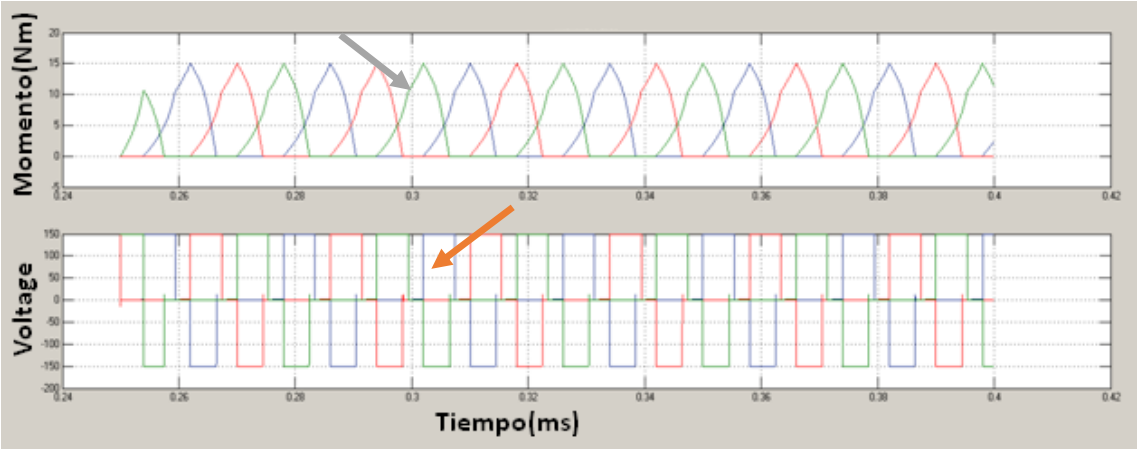


Figura 184. Muestra Soft Chopping en el motor

En la siguiente figura187 donde se representa la intensidad mostrada anteriormente y como esta afecta al par del motor, debido a que la intensidad llega a 10A y luego sigue aumentando, esto también afecta al par del motor ya que este sigue aumentando junto con la corriente, teniendo un rizado de más de 45Nm.

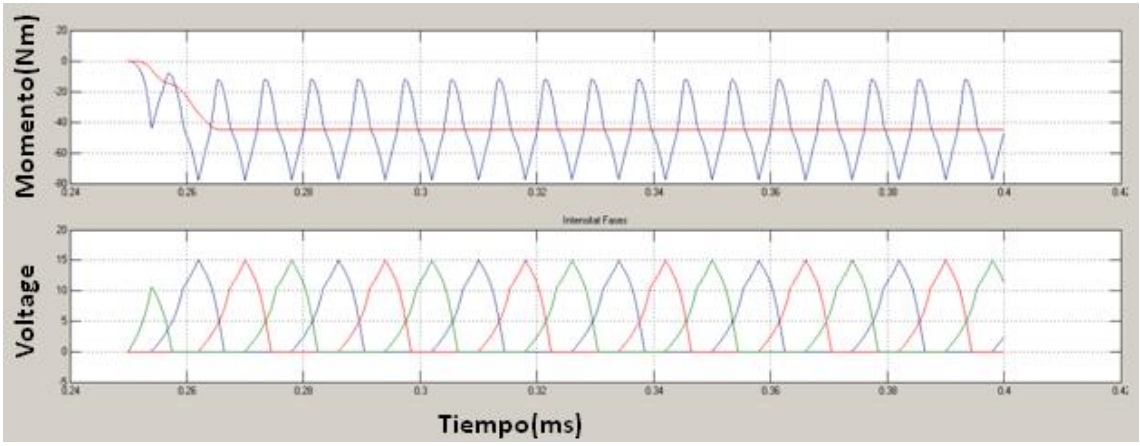


Figura 185.Muestra del rizado de par influenciado por la corriente

- Hard chopping

Por otro lado se analizara del mismo modo el hard chopping con los mismos ángulos y la misma corriente de referencia y ver la diferencia entre ambos y como este afecta en las gráficas.
Como se observa en la figura la intensidad de referencia está marcada en 10A con la diferencia que esta se mantiene en 10A oscilando durante el ángulo de conducción, esto es debido a que la alimentación no solo deja de alimentar sino que además da una alimentación negativa evitando que la corriente aumente con una histéresis de ±0,5.

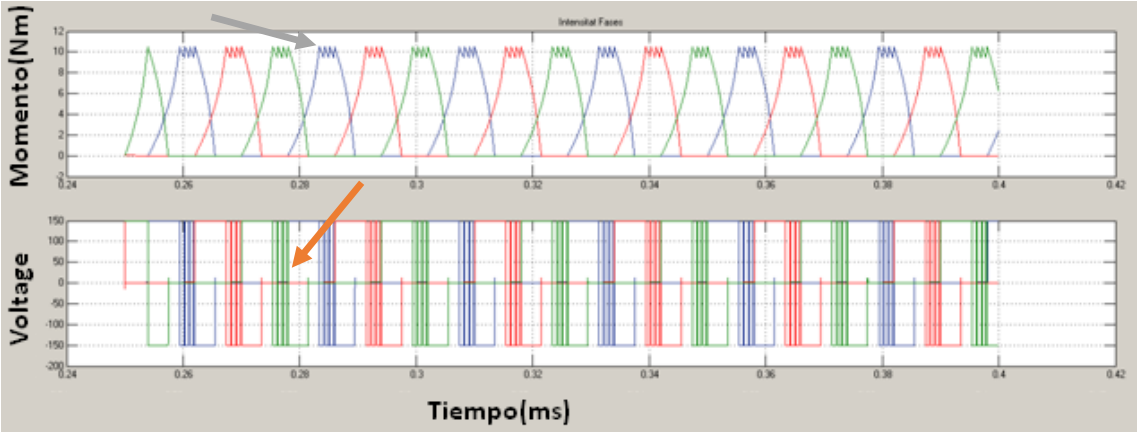


Figura 186.Muestra Hard chopping en el motor

En este caso al tener la corriente acotada a 10A fijos, se consigue disminuir el rizado de par aproximadamente en unos 27Nm estando este más controlado con el inconveniente que la media de este también es menor.

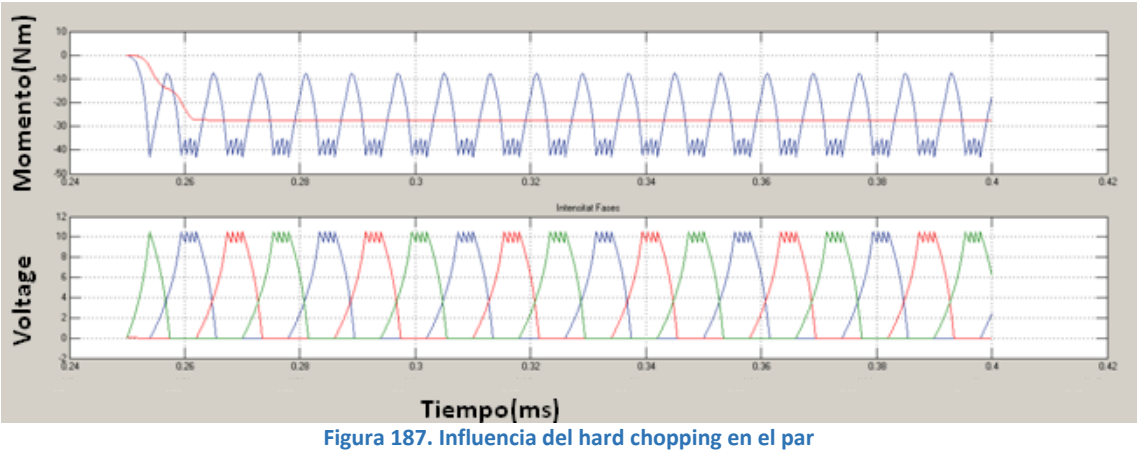


Figura 187. Influencia del hard chopping en el par

En conclusión podemos se puede decir que para esta aplicación es mejor la utilización del hard chopping ya que se controla más el par y con un rizado mucho menor que es uno de los objetivos a conseguir.

16.7.3.4 *Control de Angulo de conducción con Intensidad de referencia variable*

Una vez elegido el método de conmutación a utilizar y entendiendo la cómo funciona la intensidad de referencia y el ángulo de conducción hay una relación en cuanto al aumento de intensidad de referencia, observando la figura190 cuando fijamos una intensidad de referencia, se sabe dónde cortara esta intensidad pero no durante cuando tiempo conducirá, por lo tanto realizando ensayos a diferentes intensidades manteniendo la velocidad fija, y se observa como al aumentar la intensidad de referencia esta aumenta conllevando que la distancia entre los picos sea mayor como está indicado en la figura, lo que esto se refleja en el par haciendo que haya un mayor rizado como se puede observar en la figura que en la segunda parte cuando se aumenta la intensidad el rizado de par aumenta.

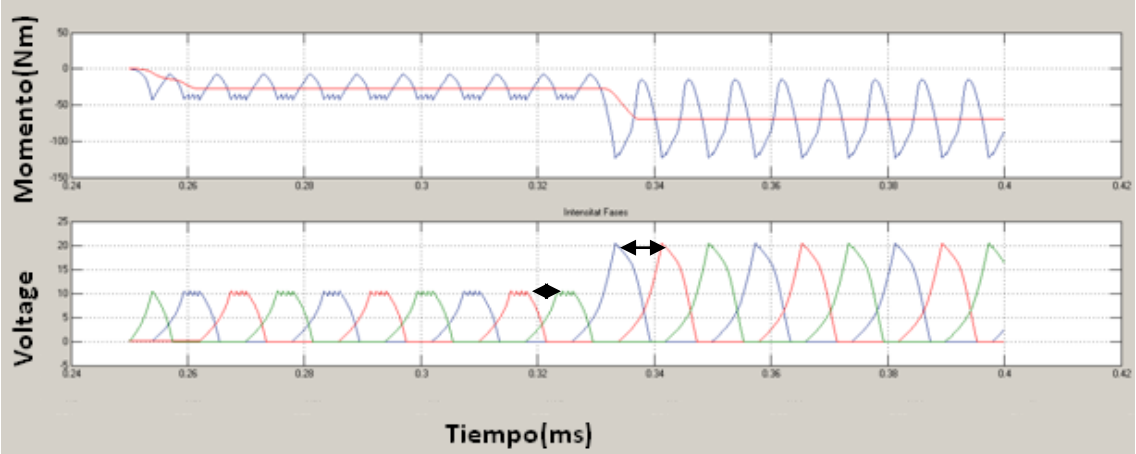


Figura 188.Angulo de conducción en relación intensidad de referencia

Por lo tanto para rectificar este rizado de par y visto lo analizado anteriormente, a medida que aumenta la intensidad se deberá aumentar el ángulo de conducción para que los picos de corriente se mantengan lo más aproximados posibles y de esta manera el par no oscile.

16.7.3.5 *Control de Velocidad con Ángulos de disparo variables*

En este apartado se ha estudiado la relación que tienen los ángulos de conducción en cuanto a la velocidad a medida que aumenta la velocidad hay un ángulo óptimo para esta en la cual tendrá un funcionamiento más óptimo, menor rizado de par
Para empezar se han tomado 3 velocidades de nuestro motor, estas serán 65, 95 y 125 rpm las cuales cubren todo el rango de trabajo, con cada una de estas velocidades se les ha hecho un ensayo a tres niveles de corriente distintas y ver como aumenta el par respecto a estas intensidades, además este ensayo de corriente también se ha analizado con diferentes ángulos de conducción y de este modo ver los ángulos más óptimos de conducción en relación con la velocidad de funcionamiento.
Aquí se muestran los ensayos realizados con sus respectivos gráficos de los ángulos más óptimos:

- **Velocidad de 65rpm**

65,5Nm			89Nm			112Nm		
ON	OFF	I	ON	OFF	I	ON	OFF	I
-7,5	1,5	13A	-7,5	1,5	16A	-7,5	1,5	19A

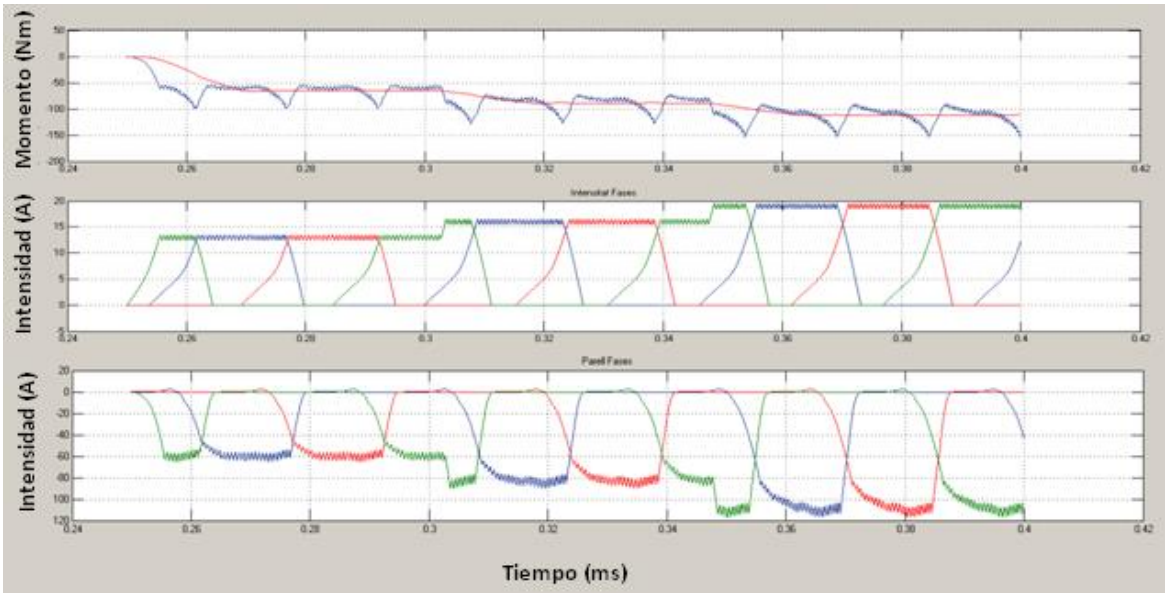


Figura 189. 65 rpm (-7,5 1,5)

Se puede observar a 65 rpm el nivel más óptimo conseguido es donde el ángulo de conducción es (-7,5 1,5), como mostrado anteriormente es el ángulo que funciona a mayor par en bajas velocidades, además que con este ángulo conseguimos que el par (primera grafica) tenga una oscilación pequeña que es uno de los objetivos que se quiere conseguir, por otro lado observamos como en la gráfica de la corriente entregada por el accionamiento (tercera grafica) entra poco en la zona motora, lo que significa que la mayoría de la energía puede ser entregada a la red.

- **Velocidad de 95rpm**

62Nm		
ON	OFF	I
-7,5	1,5	13A

82Nm		
ON	OFF	I
-7,5	1,5	16A

102Nm		
ON	OFF	I
-7,5	1,5	19A

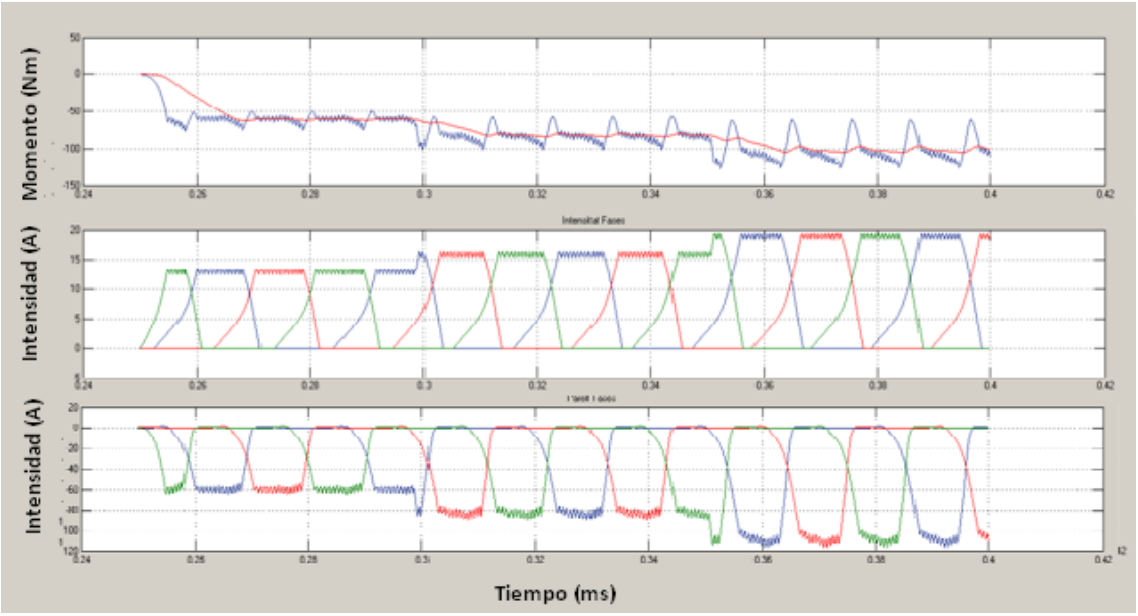


Figura 190. 95 rpm (-7,5 1,5)

59Nm		
ON	OFF	I
-9	0	13A

79Nm		
ON	OFF	I
-9	0	16A

99Nm		
ON	OFF	I
-9	0	19A

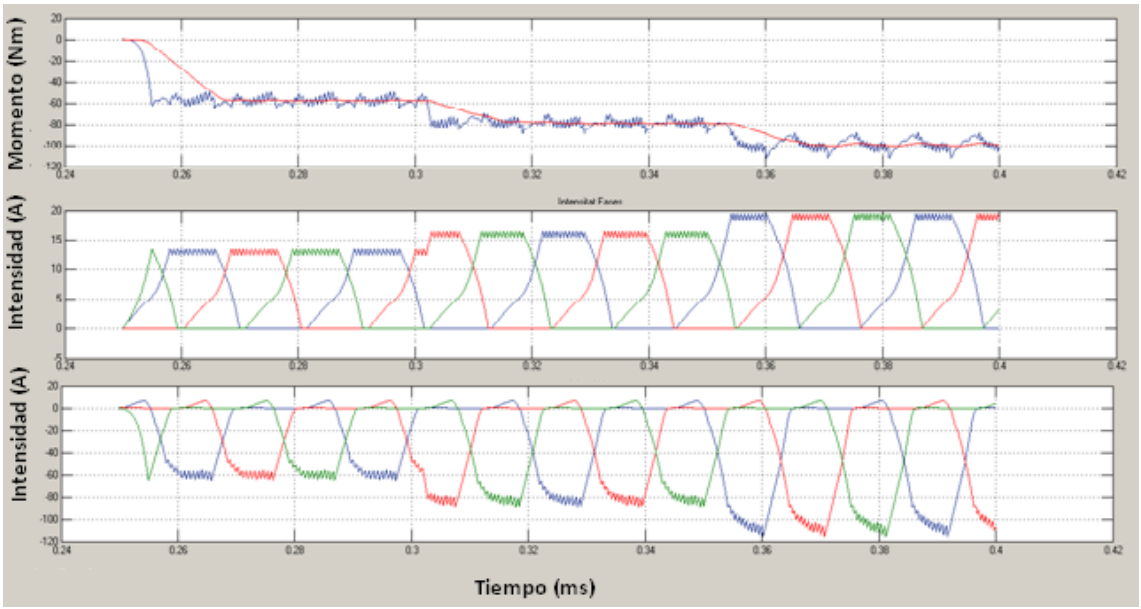


Figura 191. 95 rpm (-9 0)

En la velocidad de 95 rpm se puede observar como hay dos ángulos de conducción (-9 0) y (-7,5 1,5) en los que el valor de par y su rizado es aproximadamente el mismo, esto se puede apreciar en la gráfica mostrada anteriormente donde se observa que la curva par velocidad de ambos ángulos corta en una velocidad aproximadamente de 80 rpm lo que quiere decir que a esa velocidad ambos ángulos dan el mismo par, por lo que podemos decir que a esta velocidad el ángulo más óptimo es el de (-7,5 1,5) por las razones de que el par es mayor aunque el rizado de par es similar y otra razón es que entra poco en zona motora (tercera grafica).

- **Velocidad de 125 rpm**

57Nm		
ON	OFF	I
-9	0	13A

79Nm		
ON	OFF	I
-9	0	16A

98Nm		
ON	OFF	I
-9	0	19A

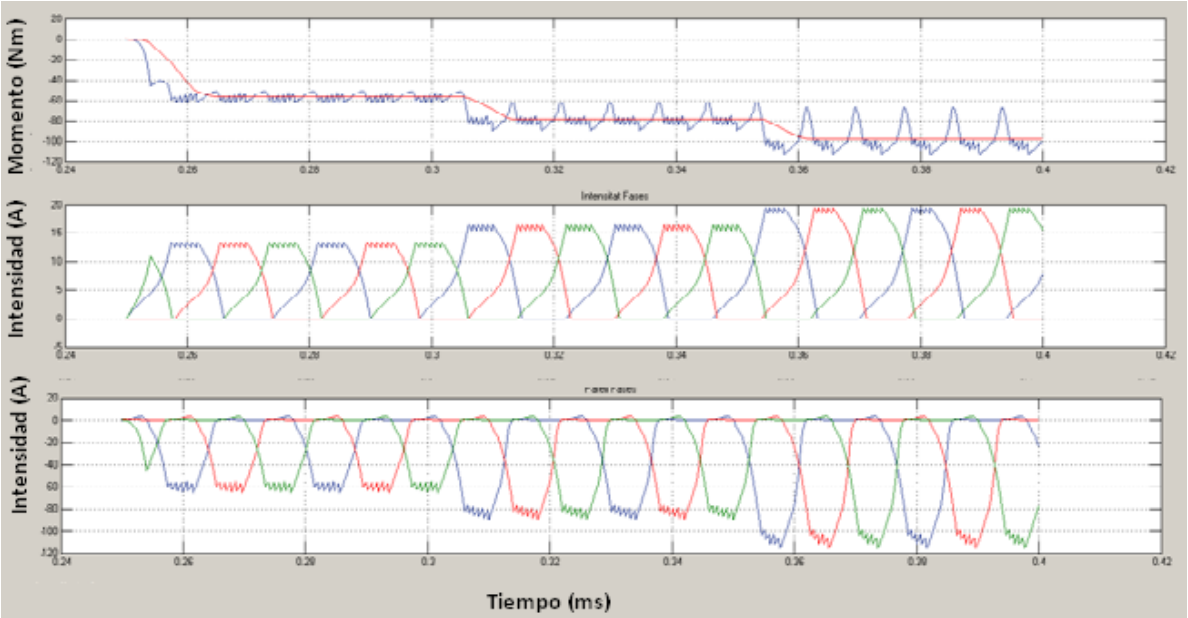


Figura 192. 125 rpm (-9 0)

La ultima de los ensayos, realizado a 125 rpm, figura 194 Obtenemos que el mayor par y a la vez un rizado de par optimo lo obtenemos cuando los ángulos de trabajo están en (-9 0), es decir al haber aumentado la velocidad de trabajo cambia el ángulo de trabajo optimo, tal y como se ha observado en figura190 de la curva par velocidad

16.7.4 Variables de control utilizadas

Como conclusión de los ensayos realizados con el fin de conseguir un control el cual permita que en el momento de obtener un Par a una cierta velocidad, este Par sea con el menor rizado posible, ya que al este ser muy grande este rizado puede ser notorio en cuanto al pedaleo, por lo tanto intentaremos que sea lo más suave posible.
En cuanto al modo de control, se descarta utilizar el control de Par, ya que este control de Par se relaciona directamente con la corriente sin tener en cuenta el ángulo de conducción y como comentado anteriormente afectara en el rizado de par.
Por lo tanto con la intención de conseguir un par deseado a una velocidad con el menor rizado posible se debe:

- Establecer en ángulo de conducción para la velocidad de trabajo y la intensidad de referencia, ya que este será el que afectara en cuanto a que la corriente entre fases quede de manera continua una con la otra.

  Cuando mayor sea la intensidad mayor será la corriente de fase por lo tanto tendera separar una fase de la otra, y lo que se consigue con el aumento de ángulo de conducción es que al disparar esta fase en unos instantes antes hará que la señal de corriente quede más continua y a consecuencia el Par tenga una menor oscilación.

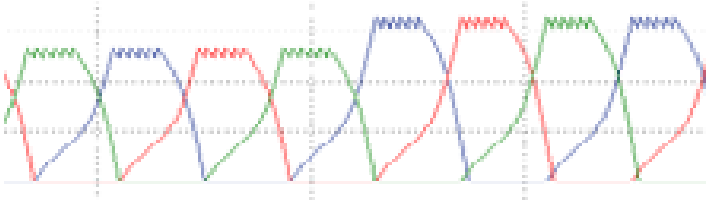


Figura 193. Angulo de conducción

  Con el aumento de velocidad ocurre lo mismo que en el caso anterior que estas señales de corriente tienden a separarse por lo tanto habrá que realizar un aumento del ángulo de conducción

- Establecer un ángulo de disparo, como ya se ha mencionado anteriormente, para cada velocidad es más óptimo un ángulo de disparo, para bajas velocidades es más óptimo unos ángulos de (-7,5 1,5) y para altas velocidades (-9 0)

16.7.5 Sensibilidad de respuesta

Por último se analizara como responde el motor en cuanto a la variación de par y comprobar así si será capaz de variar su par en un corto periodo de revolución.
Para esto a continuación se realizara una combinación del sistema eléctrico con el sistema mecánico en Matlab-Simulink, donde se podrá apreciar la sensibilidad con la que reacciona el motor ante la variación de corriente.

17 Convertidor

17.1.1.1 *Elección de convertidor*

La elección del convertidor será una parte importante, ya que es un componente imprescindible en el accionamiento, como se ha descrito anteriormente hay varios tipos de convertidores, nuestro convertidor deberá poder regenerar energía ya que nuestro motor actúa como freno
EL convertidor a elegir será el convertidor clásico, este convertidor es el mejor en relación calidad precio, además cumple que sea un convertidor capaz de regenerar energía.

17.1.1.2 *Convertidor clásico*

Primero de todo se muestran ventajas e inconvenientes que pueden presentar este tipo de convertidores:
Ventajas:

- La alimentación puede ser mediante corriente continua directamente o a través de un convertidor de corriente alterna a corriente continua intercalando un rectificador y un filtro.
- Sobre la bobina puede circular corriente hacia los dos sentidos es decir puede tener tensiones positivas y negativas.
- Tiene una alta tolerancia a las faltas.
- Buena posibilidad de control.
- Puede permitir trabajar como motor y generador

Inconvenientes:

- Necesita un elevado número de interruptores de estado solido
- Cada fase del motor soporta la tensión que le proporciona la fuente menos la caída de tensión producida por los interruptores. Por lo tanto si la tensión que se le aplica es muy baja se reducirá la tensión aplicada en bornes de la fase.

17.1.1.3 *Funcionamiento*

Este convertidor tiene el mismo número de ramas como fases tiene el motor, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** cada una de estas fases incorporan dos interruptores sólidos los cuales se controlan con dos diodos

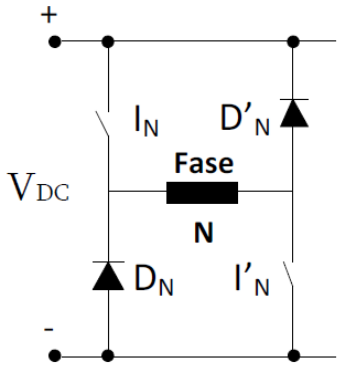


Figura 194. Fase del convertidor clásico

Este controlador es alimentado por una tensión de corriente continua, suministrada por una fuente o por un convertidor de AC/DC con un rectificador y un filtrado.
Hay 5 estados en cada fase de este convertidor:

- 1er Estado: Reposo.

Este estado es el inicial en el que el motor esta inactivado o en funcionamiento en otra fase del convertidor.

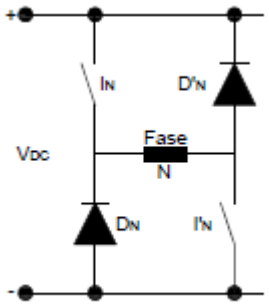


Figura 195. Reposo

El interruptor IN e I'N no están activos.

- 2º Estado: Conducción de la fase

Este estado se encuentra en el momento en que conducen los dos interruptores de estado sólido. IN e I'N La energía transcurre desde la fuente de alimentación hasta la fase del motor, llamándole a la tensión de la fase V_{DC}.

Figura 196. Conducción de fase

- 3er Estado: Libre circulación fase IN

Este estado conduce el interruptor de estado sólido IN y un diodo D'N, esto hace que la bobina quede cortocircuitada y que la corriente en la fase mantenga la dirección de la corriente que tenía en el estado 2. La energía que se almacena en la bobina se disipara en forma de calor y la tensión será 0V, por lo tanto la corriente se disipará hasta que el convertidor se encuentre en estado de reposo.

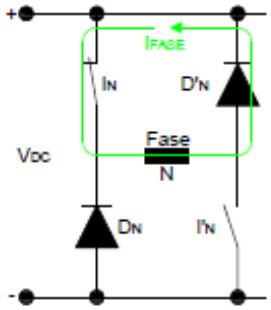


Figura 197. Circulación de la fase IN

- 4º Estado: Libre circulación de la fase I'N

Este estado conduce el interruptor de estado sólido I'N junto con el diodo DN.
Si hay corriente en la fase esta se descarga sobre la misma fase en forma de calor igual que ocurre en la fase anterior y esta pasa a quedar en estado de reposo.

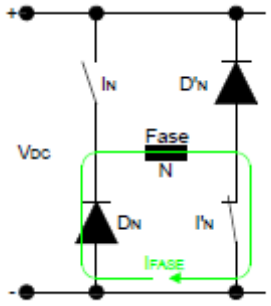


Figura 198. Circulación de la fase I'N

- 5º Estado: Desmagnetización de fase.

Este estado es similar al 1er estado aunque la corriente pasa por los dos diodos y de forma inversa, aquí la energía que esta almacenada en la bobina se devuelve a la fuente de alimentación por lo tanto la tensión en esta fase será $-V_{DC}$.

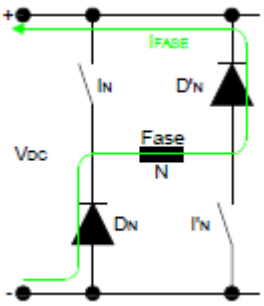


Figura 199. Desmagnetizacion de la fase

A continuación se muestran todos los estados para que sea más visual el entendimiento de este:

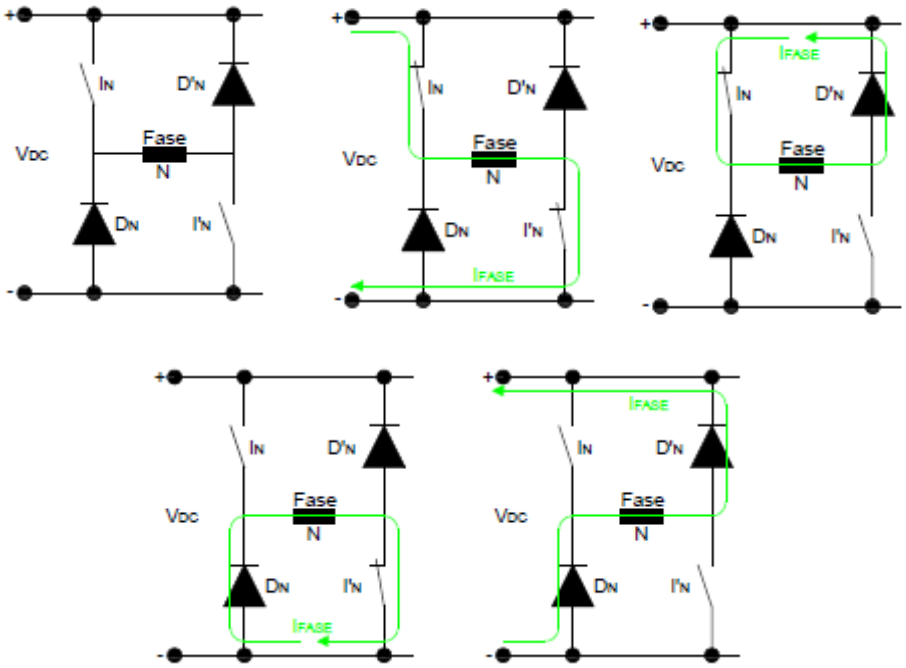


Figura 200. Secuencia de conducción completa

Por otro lado los interruptores utilizados para este convertidor se trataran de IGBT's ya que la potencia del motor excede de 1Kw y su tensión de alimentación será por encima de los 100V, y es un interruptor que permite un mejor control.

18 Sensores

Para que el controlador reciba información sobre el motor se debe instalar unos sensores que nos faciliten esta información y realimenten al controlador y actuar en función de esta variable.
Las variables que necesita el controlador serán:

- Par
- Velocidad
- Posición
- Corriente

Para conseguir estas variables el accionamiento estará dispuesto de dos sensores:

- Sensor de corriente: medirá la corriente del motor, y este sensor se encontrara en el convertidor
- Sensor de posición: dará la posición en la que se encuentra en cada momento el motor, este sensor estará instalado en el motor

Para conseguir la variable de Par se podrá obtener en la gráfica de Par-Posición en función de la corriente, gracias a tener el sensor de posición y de corriente.
Para obtenerla variable de velocidad se puede conseguir derivando la variable de la posición, proporcionada con el sensor de posición del motor.

19 Propuesta de mejora

Después de haber realizado todos los ensayos, se ha podido se ha podido ver que el diseño es viable mediante la implementación de un accionamiento MHR para el frenado, de una bici estática y los requerimiento reclamados.
Dada la experiencia adquirida en el manejo de todo el software utilizado y con los conocimientos adquiridos después de las diversas simulaciones se realizará una propuesta de optimización del accionamiento, fruto de las recomendaciones del equipo de trabajo.

19.1 Alimentación del motor

Con los estudios realizados hasta ahora el motor ha sido alimentado a 150Vcc, para ello es necesario la instalación de un transformador continuado por un rectificador para transformar la corriente alterna en corriente continua, y de esta manera obtener los 150 Vcc rectificados.
Por lo tanto lo propuesto es que el rectificador se alimente directamente de la red y alimentando al motor con la tensión de salida de este, y de esta manera ahorrando la instalación de un transformador.
De esta manera el motor también trabajara a una corriente inferior, y esto hará que el motor trabaje a una inducción inferior lo que significa que tendrá menos perdidas y el rendimiento también aumentará.
En la instalación utilizaremos un rectificador no controlado monofásico.
Estos rectificadores también son llamados convertidores estáticos de energía, siendo la función de estos convertir la corriente alterna en corriente continua, el rectificador a utilizar será monofásico ya que la alimentación de este será monofásica.
La función de los rectificadores es usar componentes electrónicos donde solo permitan pasar la corriente en un sentido, impidiendo el paso de corrientes contrarias, para estos se usaran diodos semiconductores, hay diferentes tipos de rectificadores no controlados, de media onda, rectificador con transformador de toma media y rectificador de puente, por su facilidad de uso y eficiencia utilizaremos el rectificador de puente.

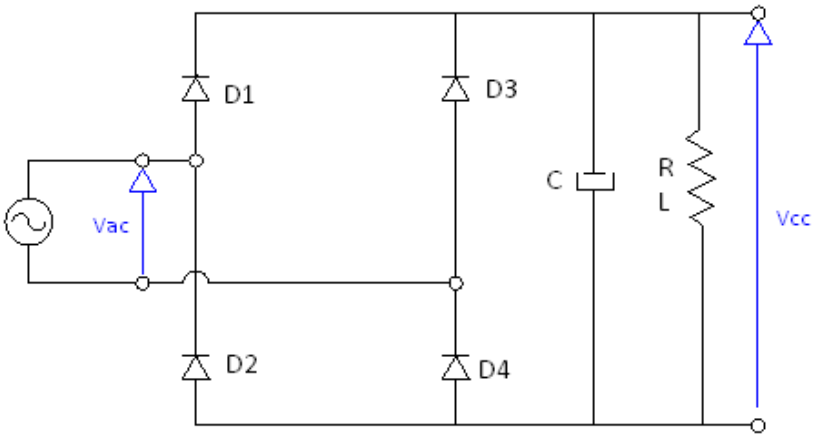


Figura 201. Rectificador no controlado de Onda completa

Dispone de 4 diodos en una configuración de puente completa y a diferencia del rectificador de toma media este no necesita transformador.

Cuando se alimenta de la tensión alterna se activara en el ciclo positivo D1 y D4 y para el ciclo negativo D3 y D2. Se puede observar en la figura la función del rectificador actuando sobre la tensión [e2].

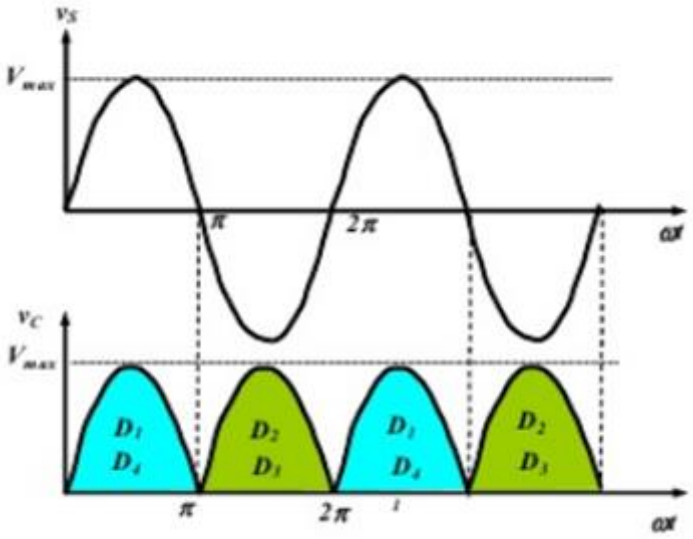


Figura 202. Forma de onda del rectificador

Agregando el condensador en el rectificador el condensador la forma de onda continua será la de la siguiente figura 203 para esto deberemos saber cuál será la tensión media del rizado producido por la onda, para ello habrá que realizar un cálculo.

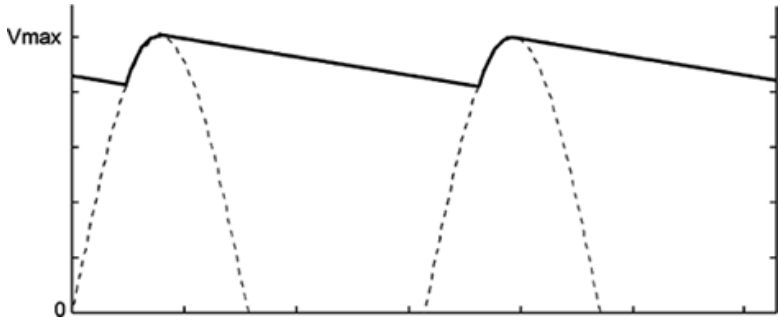


Figura 203. Tensión resultante con rectificador

La tensión que se le aplicara al motor se realizara un cálculo para obtener esta:
Primer paso se obtendrá el cálculo de la tensión de pico:

$$Vmax=230\sqrt{2}= 325V$$

$$Vmed = \frac{2Vmax}{\pi} = \frac{2 \cdot 325}{\pi} = 206{,}9\ V$$

$$Imed = \frac{Vmed}{R} = \frac{206{,}9}{1{,}4} = 147{,}78\ A$$

Este será el pico que podría permitir el motor, por otro lado sabemos que el motor trabajara aproximadamente a una media de 20A debido a que se trabaja a una tensión mayor.
Para averiguar el condensador que se utilizara en el rectificador, fijaremos una tensión de rizado de 40V para aproximar un condensador

$$C = \frac{Icc}{f \cdot Vr} = \frac{20}{100 \cdot 40}$$

C= 0,005 F=5000 µF

Para conseguir este valor colocaremos en paralelo 3 condensadores de 2200 µF, de esta manera se conseguirán 6600 µF, y ahora se vuelve a realizar el cálculo y se observa cual será el nuevo rizado que se consigue:

$$Vr = \frac{Icc}{f \cdot C} = \frac{20}{100 \cdot 6600 \cdot 10^{-6}} = 30V$$

A mayor capacidad de condensador se consigue disminuir el rizado de tensión del rectificador.
Como tensión media que se aplicara al motor nos quedara que:

$$V = 325 - \frac{30}{2} = \mathbf{310V}$$

La tensión media que se le aplicara al motor será de 310 V

19.2 Modificación del entrehierro

El entrehierro del en el antiguo motor era de 0,4 mm sobredimensionado ya que las fases están solo en una posición, en el caso de dividir las fases el riesgo a la desviación será menor por lo tanto se puede reducir aumentando así la optimización del motor.
Al haber dividido las fases como se ha propuesto anteriormente, se podrá reducir la distancia del entrehierro de manera que la eficiencia podrá verse aumentada en el área de trabajo del motor aumentando de esta manera la misma cantidad de flujo con menor corriente lo que llevara al motor a no trabajar a tanta corriente para conseguir el mismo Par.

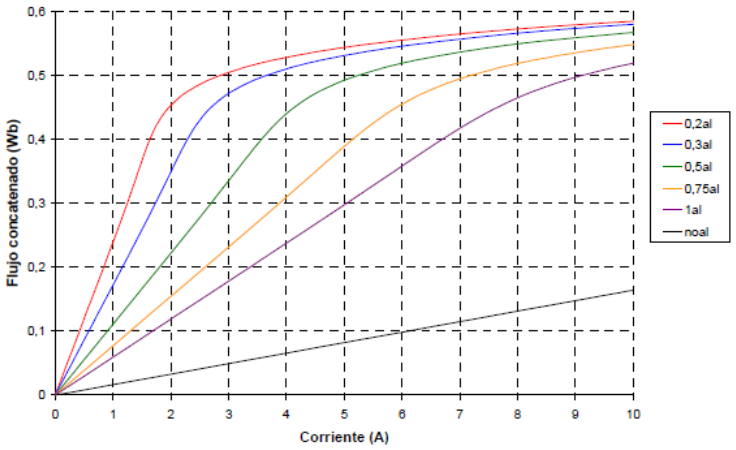


Figura 204. Curva magnetización en función de entrehierro II

19.3 División de fases

Uno de los problemas que se puede prever en este tipo de freno será que se ejerce un gran par de frenado, y al tener la fase ubicada solo en un lateral puede causar con el tiempo un des alineamiento en el eje del rotor, o una desviación de las fases.
Una de las propuestas será la de dividir las fases en situaciones opuestas, doblando la fase y situándola a 180º de manera que la fuerza sea ejercida por igual desde las ambas fases, de esta manera el rotor no tendera a desviarse y la fuerza ejercida por las fases estará dividida, tal como se indica en la figura 207
Por otro lado el doblamiento de las fases influirá en el ruido del motor ya que al ser el giro más compensado en las fuerzas no producirá tanto ruido en el motor.

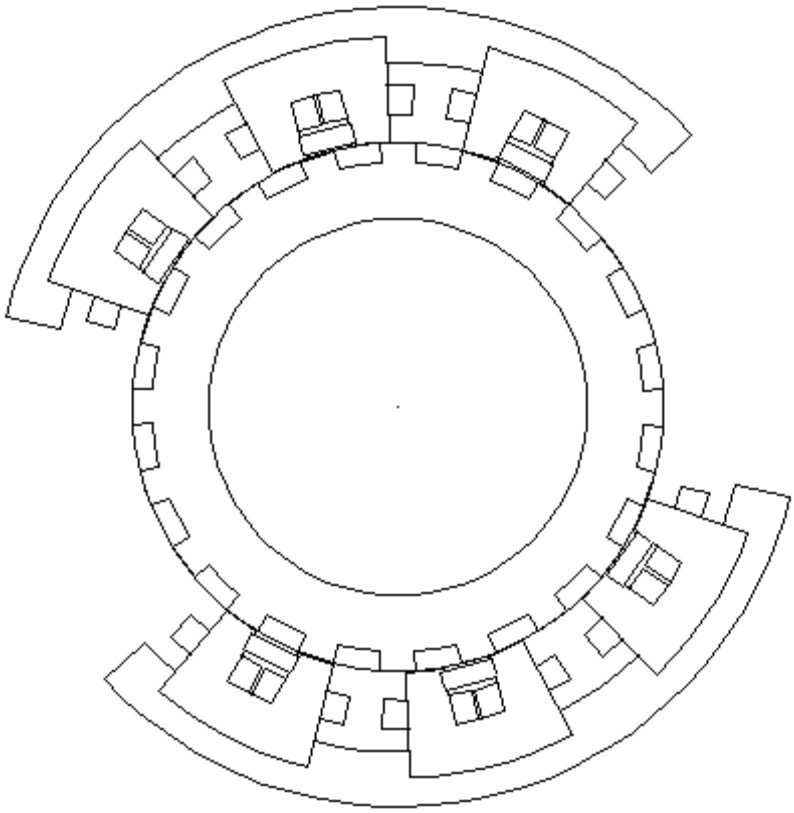


Figura 205. Motor con fases divididas

Debido a que doblamos las fases y alimentamos a una mayor tensión el par del motor aumentara, al no ser necesario un par tan alto, se reducirá el tamaño del motor para compensar este aumento lo reduciremos en un factor de escala 0,7, ya que el doblamiento de fases se realiza para que haya una compensación de par en ambas partes del motor.

19.3.1 Medidas

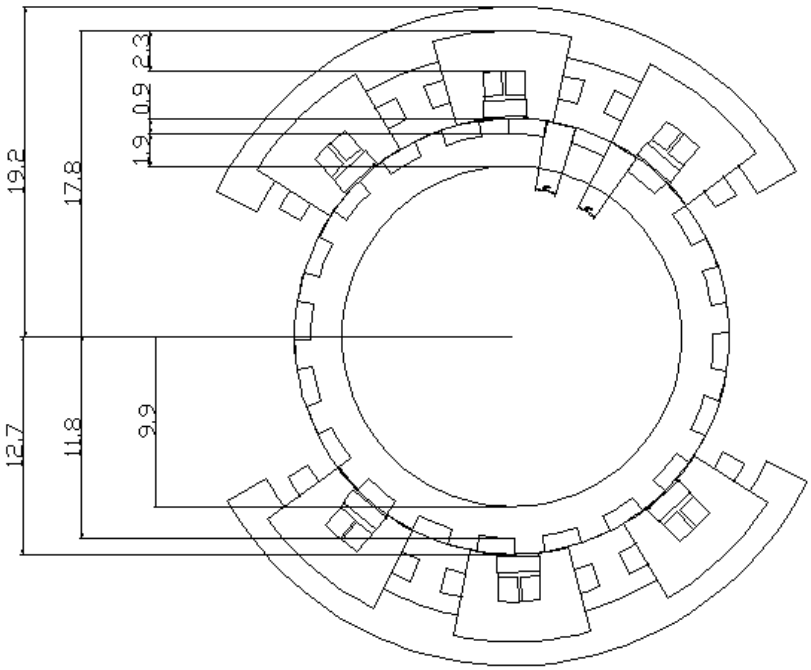


Figura 206. Medidas del motor

Parámetro	Longitud	Unidades
Diámetro exterior	38,4	cm
Diámetro rotor exterior	23,6	cm
Diámetro rotor interior	25,4	cm
Diámetro estator exterior	35,6	cm
Diámetro estator interior	25,37	cm
Corona rotor	1,9	cm
Corona estator	2,3	cm
Arco polar rotor	8	º
Arco polar estator	8	º
Entrehierro	0,28	mm
Numero de polos rotor	20	-
Numero de fases	3	-
Stroke	18	º
Tipo de chapa	Chapa FeV 600	
Alimentación	310	Vcc
I nom	10	A
Imax	40	A
Velocidad base	90	rpm

Tabla 93. Tabla de características del motor

19.3.2 Ensayo de división de fases

A continuación se realiza un ensayo de tendencia, en un primer ensayo se comprobara si al doblar las fases hay que dividir las espiras o mantenerlas observando que ocurre en cada caso:

19.3.2.1 *División de espiras en las fases:*

Se observa como ya se ha comprobado anteriormente que cuando se reducen las espiras la pendiente de esta se reduce tendiendo a ser más constante, por lo tanto se deberá comprobar como la de 140 espiras varia respecto al motor anterior que también dispone de 140 espiras

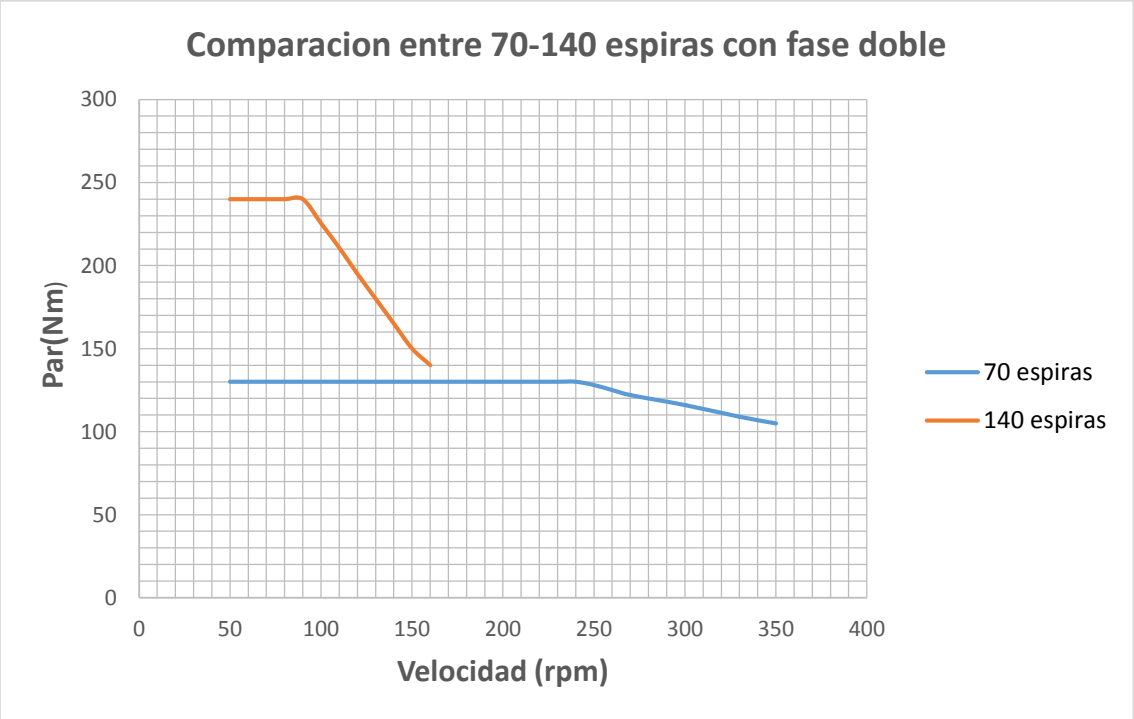


Figura 207. Comparación Curva Par Velocidad con diferentes espiras

19.3.2.2 *Mantener espiras en las fases*

Aquí se muestra la curva Par Velocidad del nuevo motor, se observa como la forma natural del motor es mayor que el anterior, con aproximadamente la misma pendiente es decir al doblar las fases con el mismo número de espiras se mantiene la pendiente de la curva par velocidad, aunque esta es de un valor mayor.

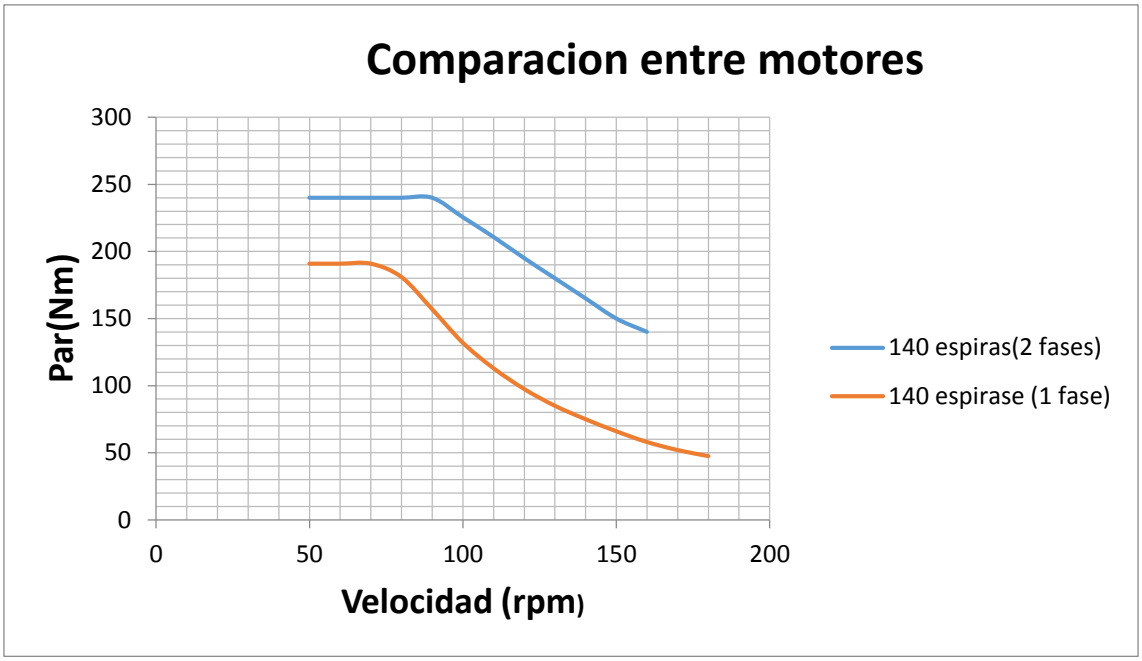


Figura 208. Comparación curva Par Velocidad añadiendo una fase

19.3.2.3 *Elección de motor*

Como elección de motor se tomara el motor de doble fases de 140 espiras, que comparado con el motor anterior tiene un par mayor, lo que a vistas de eficacia, para alcanzar los estudios realizados, la corriente podrá ser menor para obtener los mismos resultados que el motor anterior, de esta manera el motor trabajara menos saturado,

19.3.3 Resultados estáticos del motor

Como resultados del motor se obtienen las gráficas de Par, Flujo concatenado y la curva del área de trabajo, para empezar se observa la curva de área de trabajo, donde se puede observar, el punto de saturación del motor que se encuentra aproximadamente en 10A, por lo tanto el motor permite trabajar a una intensidad media de 10A siendo algo superior que el motor diseñado anteriormente.

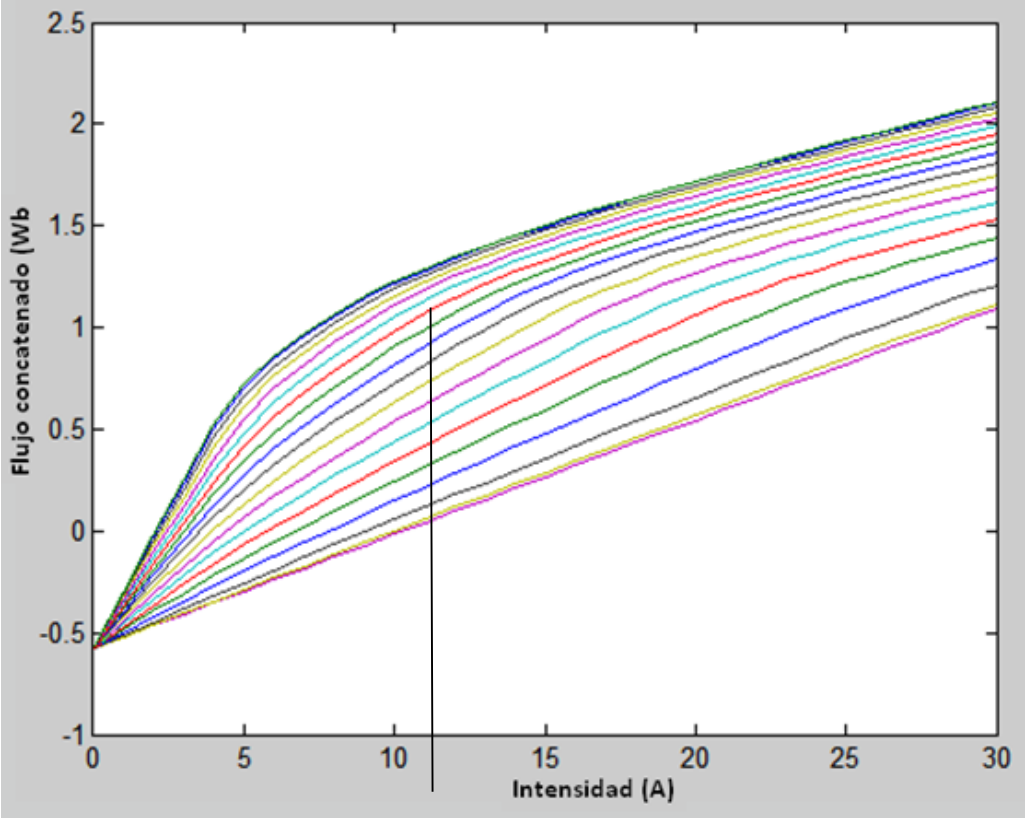


Figura 209. Curva de Saturación del motor

Por otro lado se ha obtenido la gráfica de flujo concatenado del motor aunque el flujo concatenado aumenta a unos altos niveles, es debido a que el ensayo estático esta hecho a un límite de 30A y el motor como se ha observado anteriormente trabajara a unos niveles de 10A, por lo tanto muy por debajo de lo que está indicado en la siguiente figura 210.

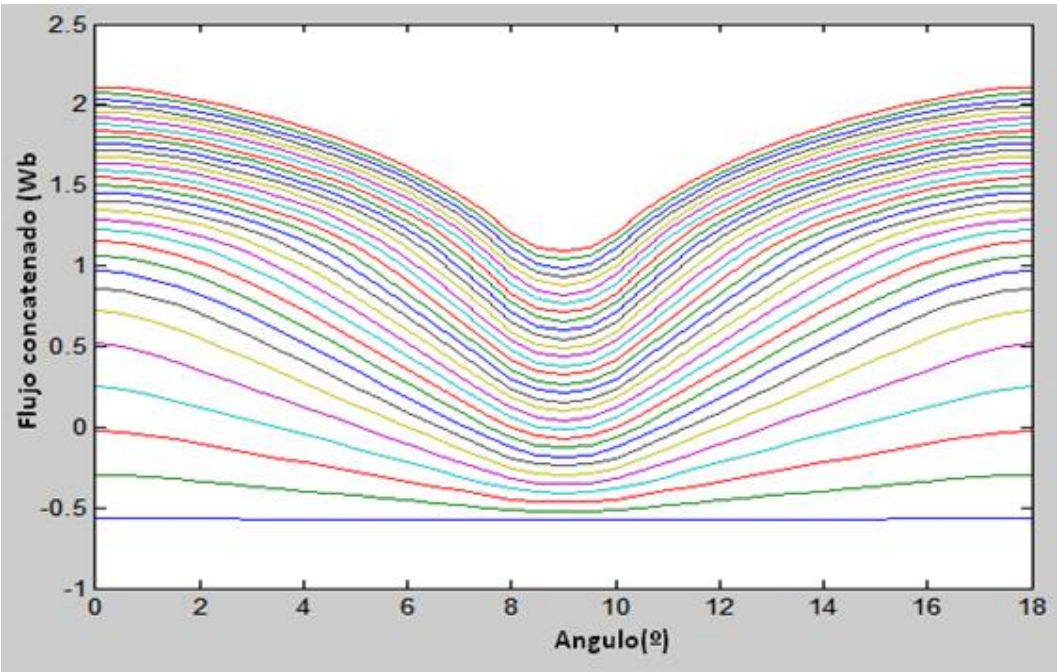


Figura 210.Curva Flujo concatenado Posición en función de la intensidad

Por último se muestra la gráfica de Par según posición, y se observa que al haber duplicado las fases este par son mucho mayor al anterior motor, por lo tanto quiere decir que el motor a una menor intensidad trabajara a un Par mayor.

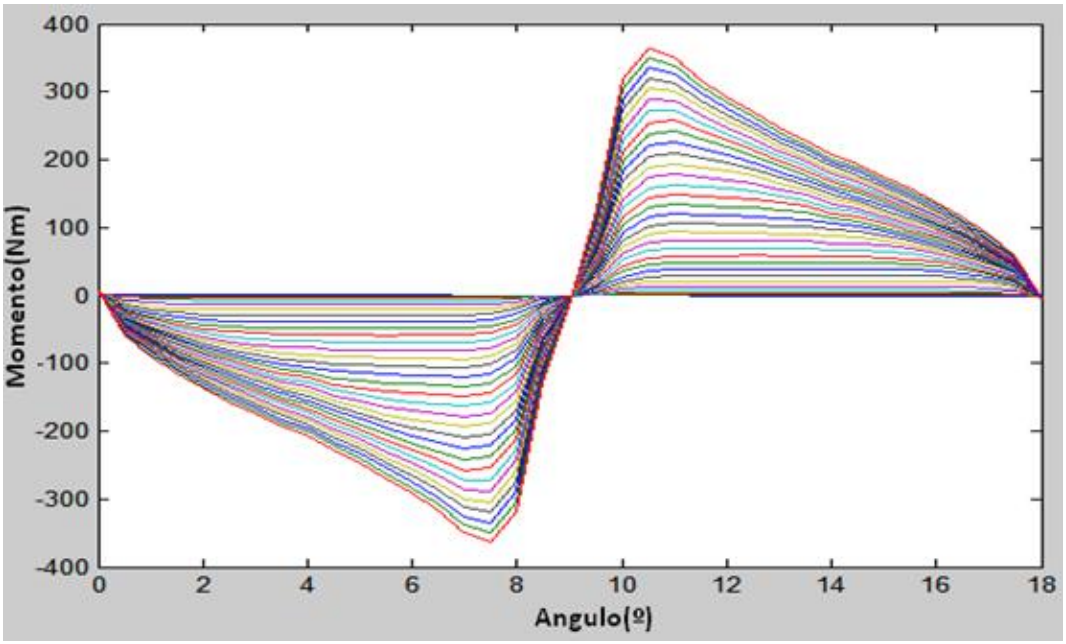


Figura 211. Grafica Par-Posición en función de intensidad

19.3.4 Resultados dinámicos del motor

Se obtendrá la curva par velocidad del nuevo motor con unos ángulos de conducción natural (-6 0), a partir de aquí se analizaran los mismos análisis dinámicos de control del motor anterior y ver como este varia.

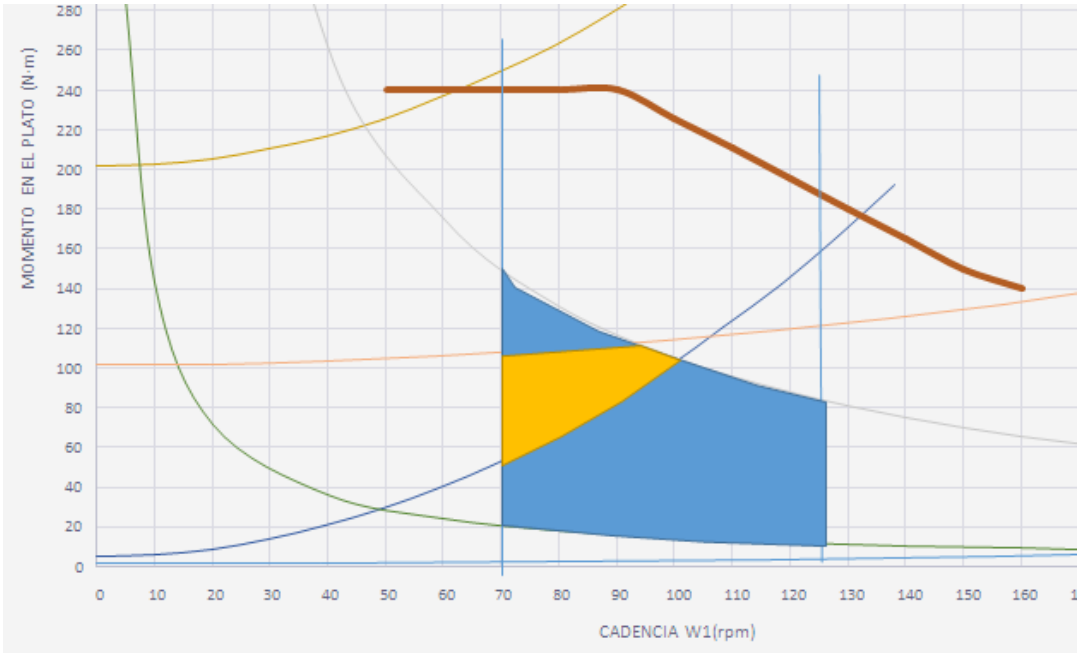


Figura 212. Curva Par Velocidad motor fase dividida

19.3.4.1 *Ensayos de control*

En este apartado se realizara el mismo ensayo de control para observar la comparación entre ambos motores y ver la diferencia de par que estos ofrecen.

- **Velocidad de 125rpm**

89 Nm

ON	OFF	I
-9	0	13A

122Nm

ON	OFF	I
-9	0	16A

152Nm

ON	OFF	I
-9	0	19A

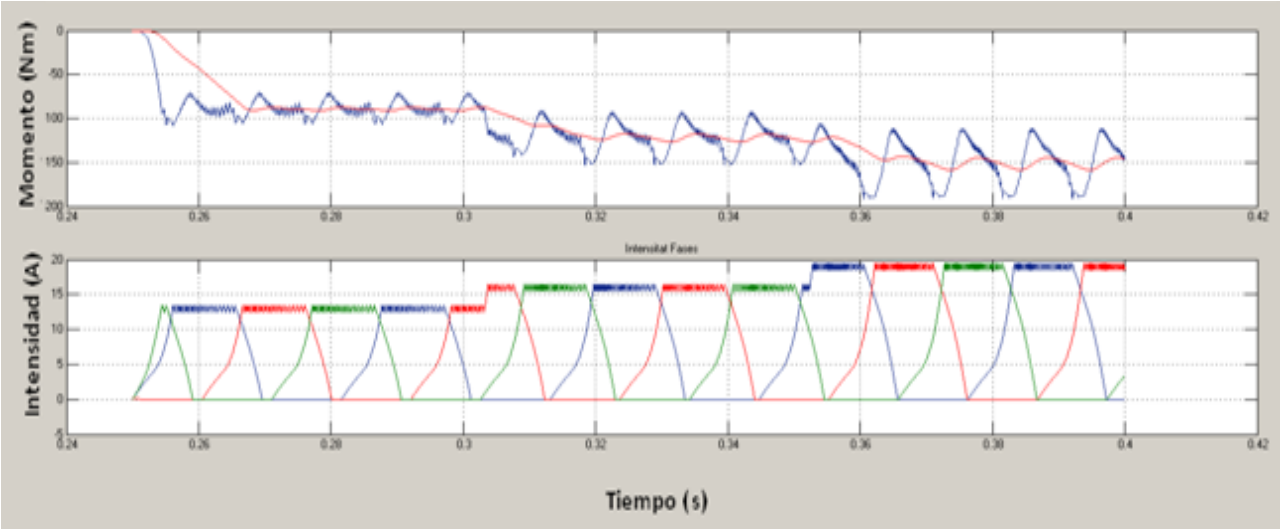


Figura 213. 125rpm (-9 0)

- **Velocidad de 95 rpm**

94,5Nm

ON	OFF	I
-7,5	1,5	13A

126Nm

ON	OFF	I
-7,5	1,5	16A

160Nm

ON	OFF	I
-7,5	1,5	19A

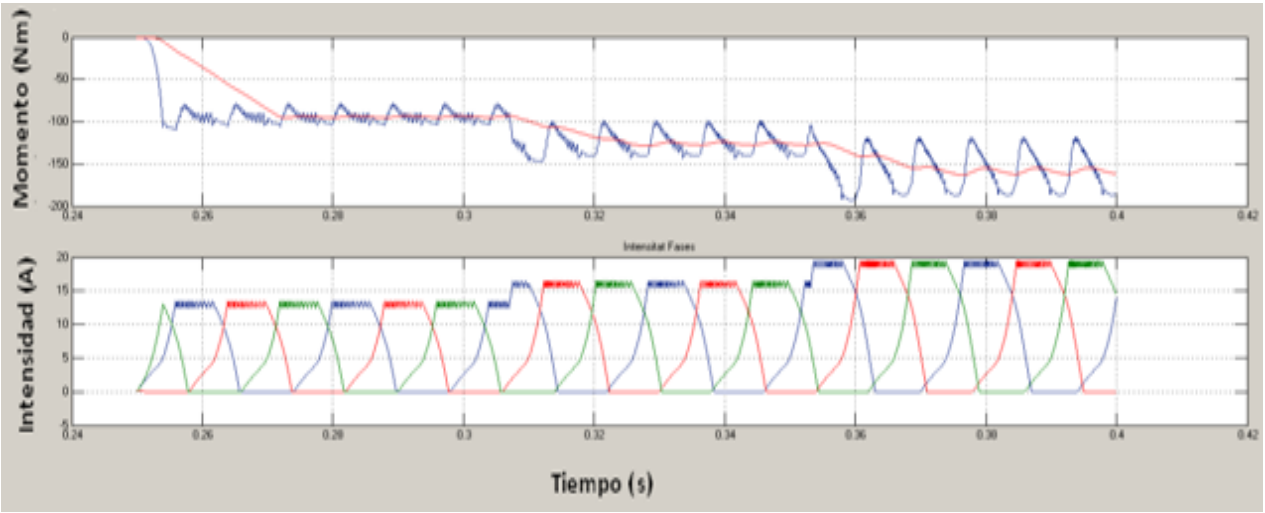


Figura 214. 95rpm (-7,5 0)

- **Velocidad de 65 rpm**

109 Nm		
ON	OFF	I
-7,5	1,5	13A

141Nm		
ON	OFF	I
-7,5	1,5	16A

174Nm		
ON	OFF	I
-7,5	1,5	19A

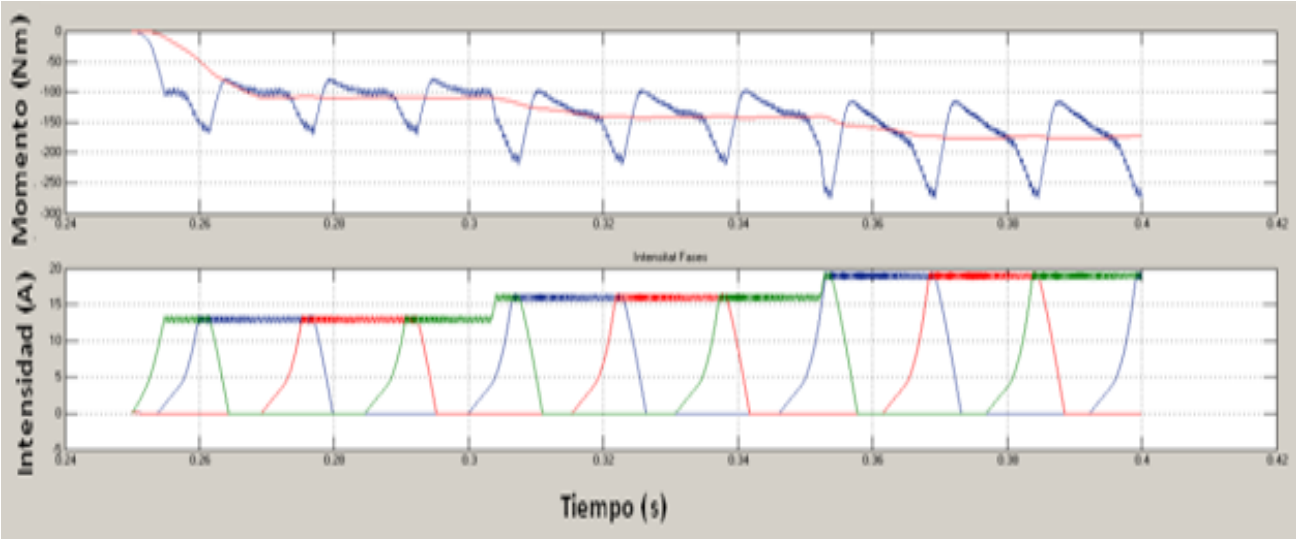


Figura 215. 65rpm (-7,5 1,5)

Como resultado se puede observar el aumento de par que tiene este motor y como se puede observar el motor de doble fases tiene un valor de par mayor, por lo que en el momento de control habrá una ventaja ya que este tendrá más margen de trabajo.

		13A	16A	19A
125rpm	Motor anterior	57Nm	79Nm	98Nm
	Motor fase dividida	89Nm	122Nm	152Nm
95 rpm	Motor anterior	62Nm	82Nm	102Nm
	Motor fase dividida	94,5Nm	126Nm	160Nm
65 rpm	Motor anterior	65,5Nm	89Nm	112Nm
	Motor fase dividida	109Nm	141Nm	174Nm

Tabla 94. Comparación de propuesta de motores

19.4 Energía del sistema

Este accionamiento produce una energía debido a que actúa como freno, es decir actúa como generador, esta energía puede tener varias utilidades, si no se le diera ninguna utilidad esta se disiparía en una resistencia en forma de calor lo que aumentaría en gran cantidad la temperatura de los componentes y podría causar problemas en el accionamiento.

Para ello se ha observado una gráfica a 65rpm con unos ángulos de conducción (-7,5 1,5) a 13 A de intensidad de referencia, y se observa cómo afecta el modo de conmutación hard-chopping en el retorno de energía al bus, la zona verde es la corriente devuelta y la zona azul es la corriente absorbida, por lo tanto esta corriente se puede aprovechar para una aplicación.

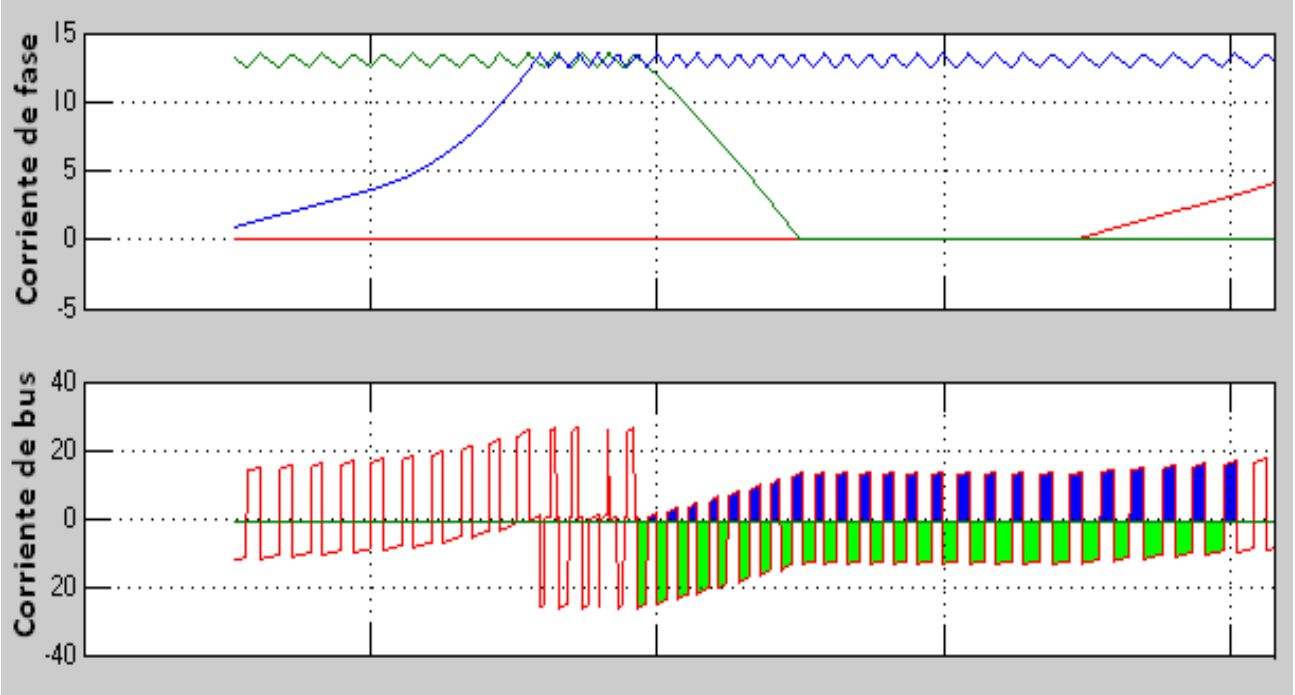


Figura 216. Corriente de retorno al bus

Hay varias opciones para utilizar esta energía, la que se ha encontrado más útil es la de utilizar esta energía devolviéndola a un bus de continua hacia unas baterías donde esta energía pueda almacenarse, donde estas baterías puedan alimentar diferentes instalaciones siendo devuelta a la línea de la instalación. Para ello habrá que utilizar un rectificador el cual convierta la tensión de la batería de continua en tensión alterna para que pueda ser aprovechada en la línea.

En el caso de que esta energía no fuera suficiente para alimentar a la línea, otra posibilidad sería alimentar el condensador del rectificador para que de esta manera este pudiera trabajar a un menor rizado de tensión formando una alimentación más continua, mejorando la señal como se observa en la figura 217.

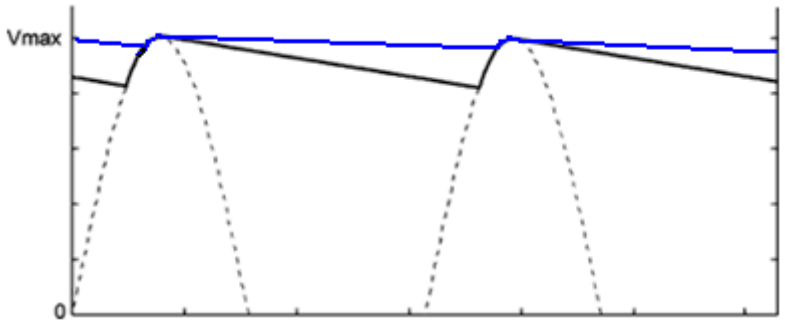


Figura 217. Mejora de la señal del rectificador

20 Simulación del sistema general

El sistema final es la unión de todos los elementos comentados a lo largo de la memoria. Llegados a este punto, a todo el sistema mecánico se le ha enlazado el bloque MOTOR/FRENO diseñado. Para hacer funcionar al motor hace falta el bloque "REFERENCIA DE CARGA" y el bloque "CONTROL DE ESFUERZO".

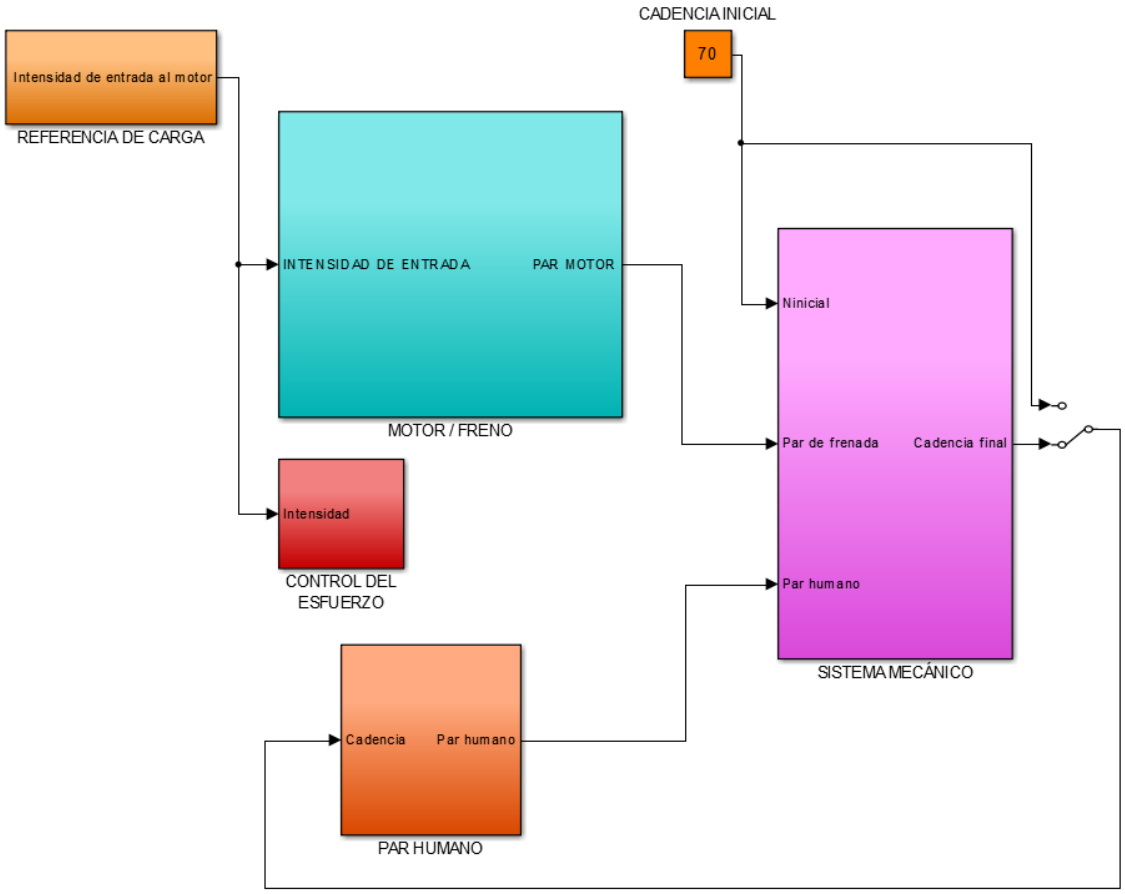


Figura 218. Esquema del sistema general implementado en Simulink

20.1 Referencia de carga

Este bloque se encarga de introducir la intensidad con la que debe trabajar el motor. Dependiendo de la magnitud de la intensidad se genera un par mayor o menor de frenado y permite ver el comportamiento de este en diferentes condiciones.

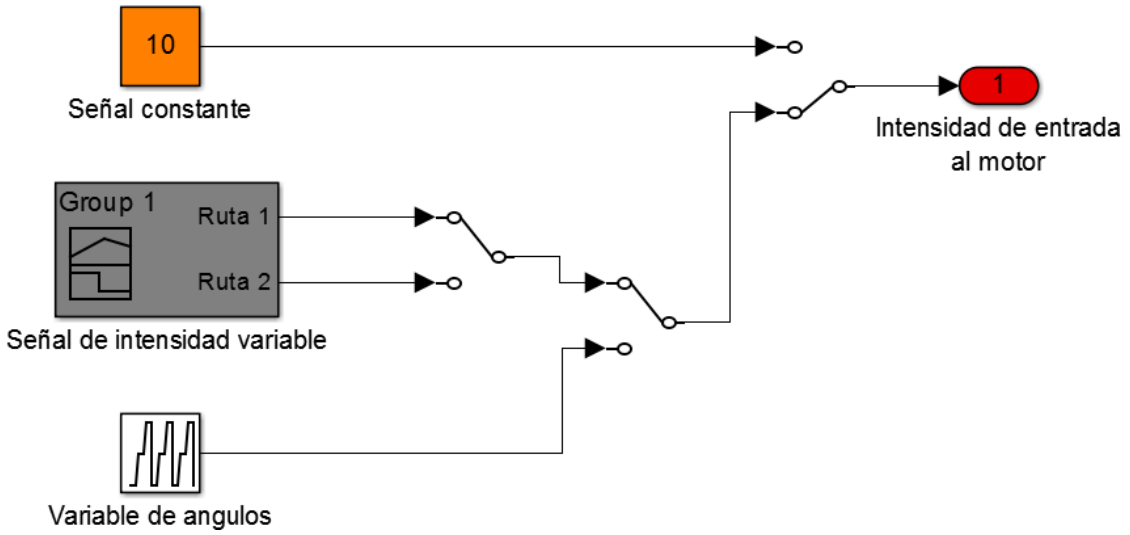


Figura 219. Condiciones de entrada

Existen tres modos de entrada lo cuales son:

- Intensidad fija: La señal de entrada es una intensidad constante todo el tiempo.
- Señal de intensidad variable: La señal de entrada es una intensidad que varía con el tiempo que previamente se le ha introducido, con el objetivo de emular un sistema de carga variable.
- Señal de intensidad variable con el ángulo: La señal de entrada es una intensidad que varía según la posición del motor lo cual permite cambios de intensidad en cortos espacios de tiempo. Este ensayo se utiliza para validar la rapidez con la que el freno es capaz de adaptarse a la consigna establecida, lo cual es de especial interés para los tullidos.

20.2 Motor/freno

El bloque Motor/Freno contiene todos los elementos necesarios para su funcionamiento. Partiendo de una intensidad de entrada (Iref) “Condiciones de entrada del motor”, realiza el frenado correspondiente. Ese modulo genera un par de frenado el cual es interpretado por bloque “Sistema Mecánico” lo cual permite analizar el

comportamiento de todo el sistema. El funcionamiento del motor se explica en apartados posteriores.

20.3 Control de esfuerzo

Este bloque realiza un pequeño control en cuanto al esfuerzo realizado por la persona. Introduciendo la intensidad de entrada para el funcionamiento del motor y el esfuerzo humano, se obtiene una relación final del esfuerzo. A mayor intensidad (más freno) mayor es el esfuerzo total. De igual forma, a mayor esfuerzo del ciclista, mayor será el esfuerzo total.
Esta señal se envía al bloque “Par Humano” para obtener el par humano que se aplica en todo momento.

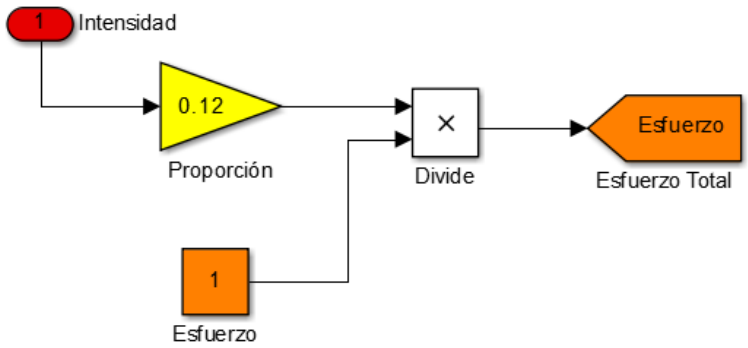


Figura 220. Control del esfuerzo

20.4 Simulaciones del accionamiento

En este apartado se van a mostrar las diferentes simulaciones realizadas para observar que efecto tienen en todo el conjunto del sistema.
Debe notarse que todos los ensayos se van a realizar a ángulos constantes (-9,0) por considerarse óptimos en el régimen de trabajo.

Los ensayos realizados constan de:

a) Corriente fija.
b) Señal de intensidad variable.
c) Señal de intensidad variable con el ángulo.

a) Corriente Fija:

Fijar una corriente de referencia en el freno y a partir de un instante determinado aumentar esa referencia, provocando así un amento de par en el freno y viendo cómo afecta a la cadencia. También podrán apreciarse las formas de onda del par generado por el motor respecto al par generado el usuario.
Condiciones Iniciales: Cadencia inicial: 70 rpm; Intensidad: 5 A y Esfuerzo: 1.2.

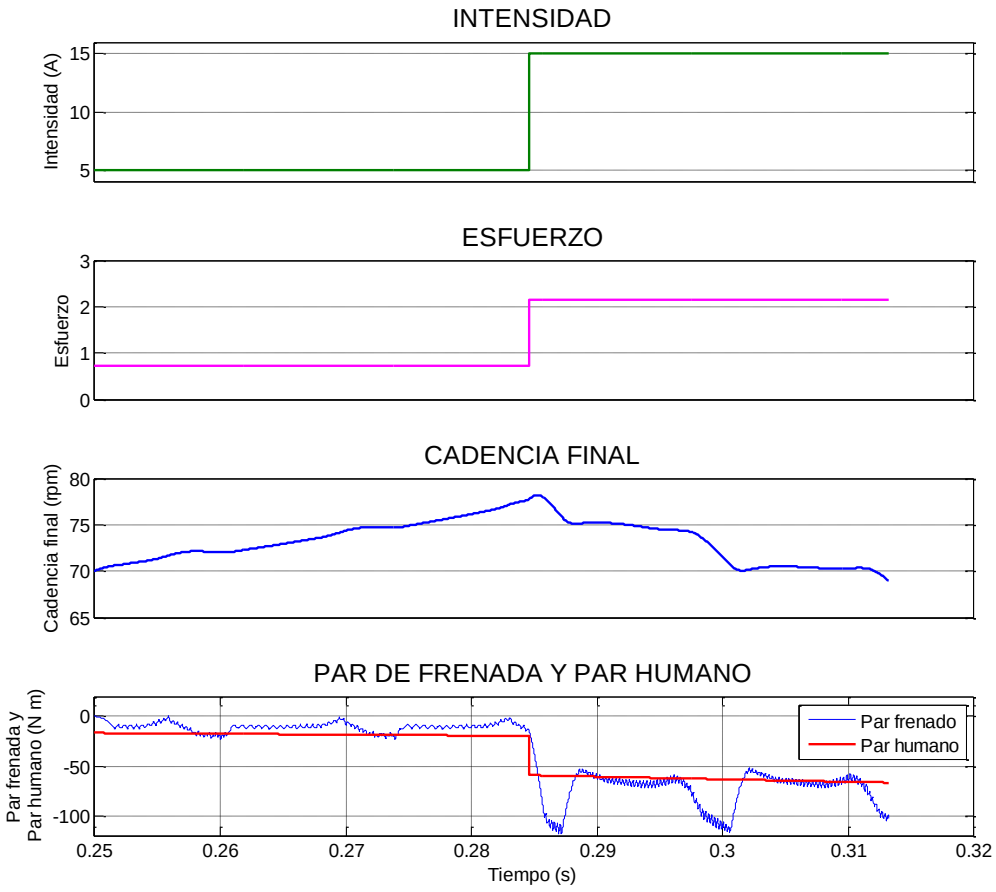


Figura 221. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia

Teniendo una entrada inicial de 5 A, el esfuerzo resultante es de un 72% del standard de entrada. Este esfuerzo genera un par humano mayor que el par de frenado. Por este motivo, la cadencia tiende a subir. A mitad de simulación, se ha subido la intensidad hasta los 15 A. En este momento, el esfuerzo también ha subido, hasta un 216%. Con este aumento de intensidad, también aumenta el par de frenado llegando a superar el par humano. Por lo tanto, en este tramo la cadencia baja.
Fijar un esfuerzo y a partir de un instante determinado aumentarlo, provocando así un amento de par humano y viendo cómo afecta a la cadencia. También podrán apreciarse las formas de onda del par generado por el motor respecto al par generado el usuario.

Condiciones Iniciales: Cadencia inicial: 70 rpm; Intensidad: 5 A y Esfuerzo: 1.2.

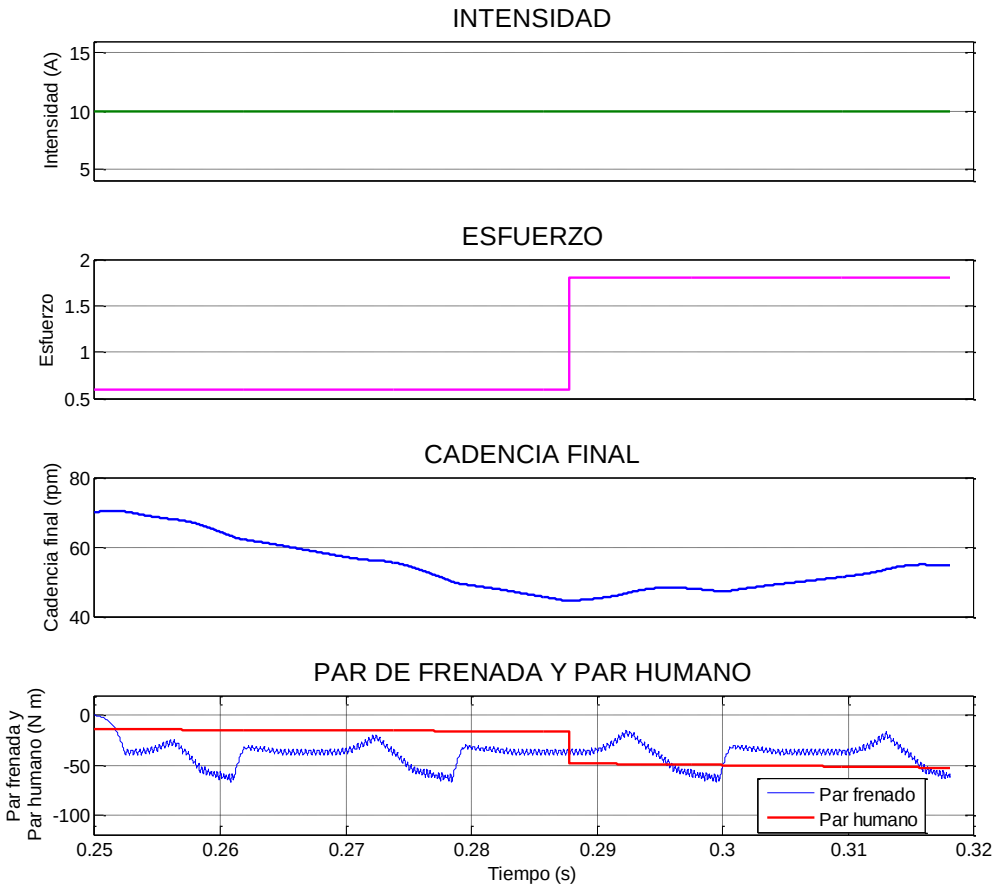


Figura 222. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia

En este segundo caso, se ha mantenido la intensidad a 10 A. El esfuerzo inicial es de un 60%. En este instante, el par de frenado es superior al humano, por ello, la cadencia tiene disminuye. A mitad de simulación, se ha cambiado el esfuerzo al 180%. En este caso el par humano es de media mayor al de frenada, por consiguiente la cadencia tiende a subir.

b) Señal de intensidad variable:

Fijar una corriente de referencia en el freno según indique la señal de entrada. Se cambia la intensidad automáticamente según el tiempo transcurrido, provocando así una variación de par en el freno y viendo cómo afecta a la cadencia. También podrán apreciarse las formas de onda del par generado por el motor respecto al par generado el usuario. También se variará el esfuerzo para ver cómo afecta en un determinado momento.

RUTA 1:

Condiciones Iniciales: Cadencia inicial: 70 rpm; Esfuerzo: 0.5.

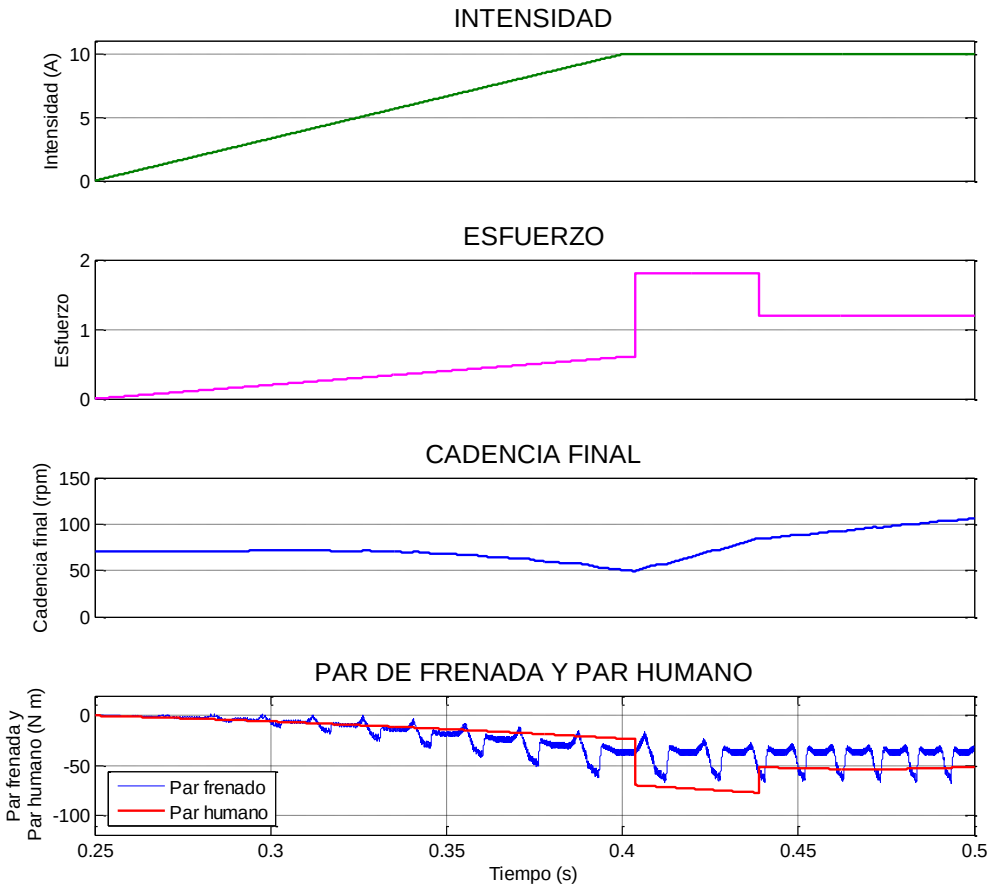


Figura 223. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia

Se empieza con una intensidad de entrada de 0 A, la cual va aumentando paulatinamente hasta llegar a los 10 A. A su vez, el par de frenado aumenta su valor. Del mismo modo que la intensidad sube, sube también el esfuerzo y así mismo también lo hace el par humano. En el inicio de este tramo, los dos pares son parecidos, por ello la cadencia se mantiene de forma más o menos estable. Transcurridos aproximadamente 0.35 segundos, el par de frenado va siendo cada vez mayor al par humano. Como consecuencia, la cadencia tiende a disminuir.

Cuando la intensidad llega al máximo (10 A), se ha aumentado el esfuerzo, haciendo que el par humano también aumente, superando al par de frenado. Por ello la cadencia empieza a subir rápidamente.

En un tercer tramo, transcurridos 0.44 segundos, se ha disminuido un poco el esfuerzo haciendo que el par humano también disminuya. Aun así, continua siendo superior al par generado por el motor. Por lo tanto la cadencia sigue aumentando aunque en menor medida.

RUTA 2:

Condiciones Iniciales: Cadencia inicial: 70 rpm; Esfuerzo: 0.8.

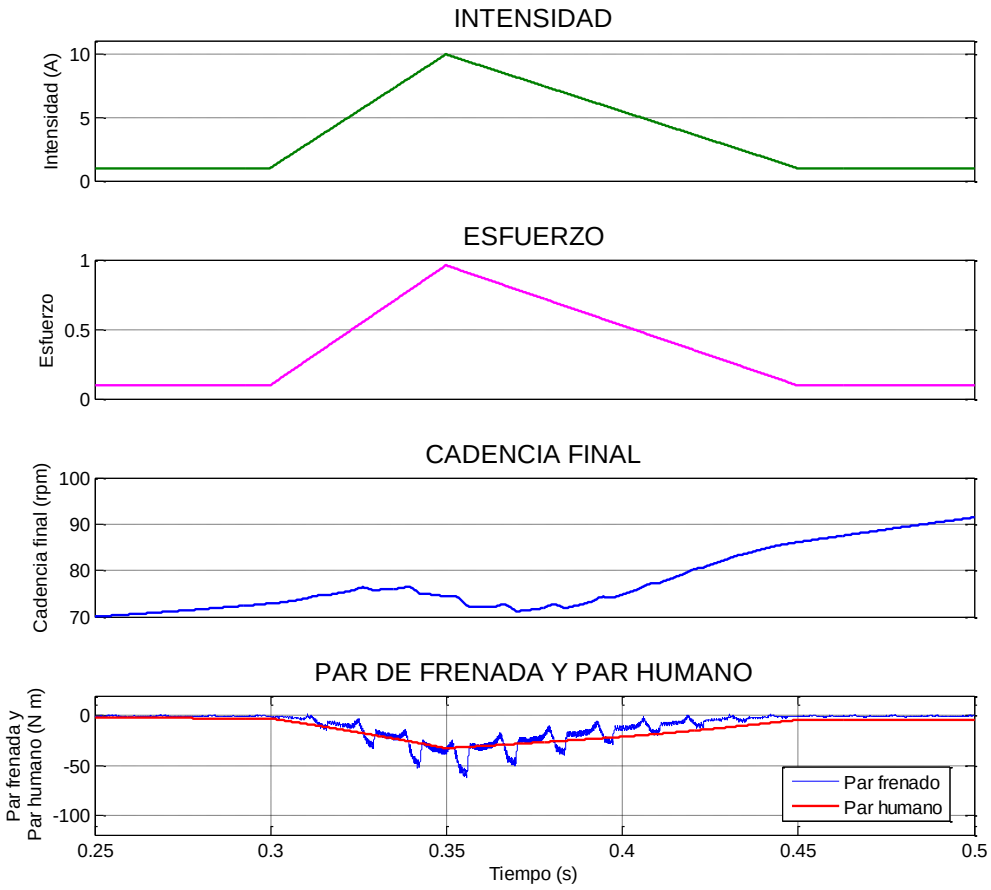


Figura 224. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia

Proporcionando una intensidad de 1 A, el par humano es de media superior al par de frenado. Por ello la cadencia aumenta rápidamente. Transcurridos 0.3 segundos la corriente de referencia aumenta hasta los 10 A. En este segundo tramo el par humano es mínimamente más pequeño que el de frenada. Por ello, la cadencia se mantiene y comienza a disminuir. A los 0.35 segundos la intensidad comienza a bajar y también lo hace el esfuerzo. Aun así el par humano es superior al par de frenado que proporciona el motor y con ello la cadencia llega a un mínimo y empieza a aumentar de forma acentuada. Cuando han pasado 0.45 segundos, la intensidad se mantiene en 1 A hasta acabar la simulación. El par humano sigue siendo superior al par de frenado pero no demasiado; es por ello que la cadencia sigue aumentado pero de forma mucho más pausada.

c) Señal de intensidad variable con el ángulo:

Variar una corriente de referencia en el freno y a partir de unos grados determinados variar esa referencia, provocando así un cambio en el par de frenado y viendo cómo afecta a la cadencia. También podrán apreciarse las formas de onda del par generado por el motor respecto al par generado el usuario.
Condiciones Iniciales: Cadencia inicial: 70 rpm; Esfuerzo: 1. Ángulos: 10º

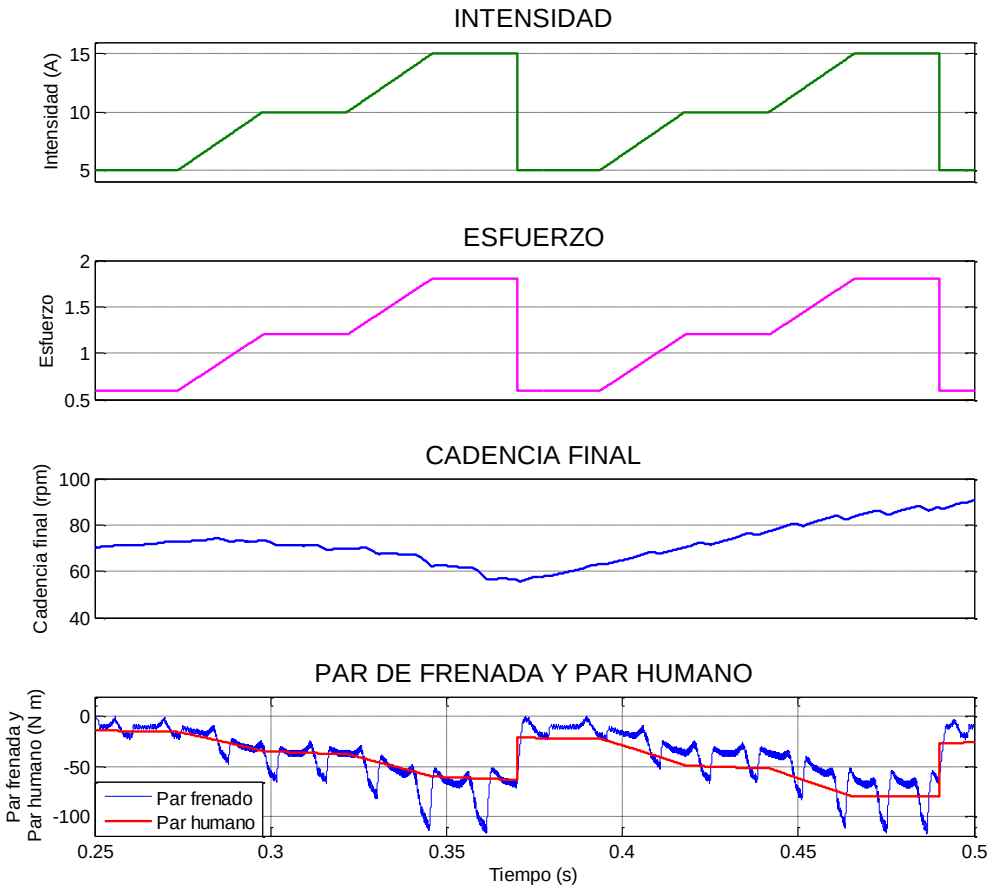


Figura 225. Efecto de la corriente sobre el par de frenada, el par humano y la cadencia

El cambio de intensidad se hace de manera progresiva hasta que alcanza el valor fijado. Llegados a él, el valor se mantiene hasta que vuelve a variar. Con una intensidad inicial de 5 A, el par humano es mayor que al del frenado, haciendo aumentar la cadencia. Transcurridos 0.274 segundos la intensidad aumenta hasta alcanzar 10 A. En este instante, el par humano es menor al del freno, por ello la cadencia empieza a bajar lentamente. A los 0,322 segundos la intensidad vuelve a subir hasta los 15 A. En este instante el par humano supera al par generado por el motor y por consiguiente la cadencia aumenta. A los 0.37 segundos finaliza el ciclo volviéndose a repetir.
Como se ha observado tanto en esta última gráfica como en las anteriores, ante un perfil de corriente impuesto, el motor responde ante este perfil con alta exactitud en pequeños periodos de segundo gracias a que el motor está diseñado para tener una reacción en un corto recorrido.

21 Conclusiones generales

Se ha visto que el mundo de las bicicletas estáticas está evolucionando rápidamente y las nuevas tecnologías hacen posible mejorar funcionalidades de estas, abriendo un gran abanico de posibilidades.

Este proyecto ha tenido como objetivo investigar un nuevo sistema de freno que mejore las prestaciones que ofrecen los productos actuales. Con este fin se ha diseñado un accionamiento eléctrico, el cual actuando como freno, suple y mejora las prestaciones de los frenos existentes.

Para poder ver la viabilidad de este proyecto es necesario hacer un diseño previo que sea analizado y aplicar metodologías de depuración, hasta conseguir la mejor estructura que alcanza los resultados esperados. Para obtener los diseños se ha trabajado y depurado la metodología de diseño.

Tras haber realizado numerosas simulaciones, se ha llegado a obtener unos resultados que confirman la viabilidad del producto. Primero de todo se ha determinado el correcto uso del motor en el rango de trabajo determinado para usuarios amateur y profesionales, además de obtener un control preciso del par proporcionado por el motor. Que permitirá programar entrenamientos definidos, para mejorar algunas cualidades físicas de fuerza o velocidad. Además, esta precisión proporcionará unos valores reales que permitirán llevar un seguimiento exhaustivo de los ejercicios que se realizan. Por otro lado el sistema final que se ha determinado, también consigue un control angular de frenada, permitiendo hacer trabajar en mayor o menor medida, los diferentes músculos de la pierna. A la misma vez este control angular permite la posibilidad de entrenar en forma de pedaleo redondo.

Con respecto a la zona de trabajo final que permite el freno, se observa que puede abarcar una gran cantidad de segmentos como el ciclismo indoor o usos generales por los que se utilizan las bicicletas estáticas, de este modo debería optimizarse el diseño del motor para cada uno. Además las ventajas que se han determinado con este freno pueden beneficiarles, como un mayor control en las clases de spinning o programas de entrenamientos dependiendo de los objetivos que se marque cada uno. Todo ello proporcionara valor al producto, sin embargo lo encarecerá teniendo en cuenta que se compone de una cantidad de materiales mayor que los sistemas actuales.

Referente al estudio mecánico, se ha generado el sistema de ecuaciones en dos software diferentes, Excel y Matlab/Simulink, que calcula las fuerzas de rozamiento y las fuerzas generadas por el ciclista y las relaciona entre sí, para encontrar la fuerza resultante y poder simular el comportamiento dinámico del sistema. Con este sistema se han conseguido obtener valores específicos del rozamiento, simulando una amplia variedad de condiciones y posibilidades, en las cuales se puede encontrar un ciclista en un caso real. Todas estas combinaciones permiten corroborar el buen funcionamiento del sistema implementado. Siguiendo este patrón, se han conseguido obtener los rangos de trabajo en los que se mueven los ciclistas, con el fin de fijar dichos límites que son los

que motor debe ser capaz de abarcar, para poder responder a todas las situaciones que se le exigirán.

Este software mecánico es de utilidad demostrada dada su correcta respuesta en las simulaciones dinámicas donde se ha unido al freno/motor. Los resultados obtenidos en las simulaciones permiten asegurar el correcto funcionamiento del sistema, ya que se ha probado simulando situaciones muy variadas y su respuesta siempre ha sido la correcta.

En cuanto al estudio eléctrico se ha diseñado un motor, el cual puede cubrir los rangos impuestos por el estudio de usuario, y gracias al control de dicho motor se podrá simular las condiciones obtenidas por el estudio mecánico.
Se ha justificado porque el motor HRM es la mejor opción para utilizar en esta aplicación, explicando las ventajas que tiene frente a los demás candidatos propuestos.

Con los ensayos realizados para el diseño del motor se han obtenido unas conclusiones sobre la tendencia del motor en cuanto a su comportamiento en función de la variación de la estructura.

Se ha visto que este motor tiene posibilidades de uso en otras aplicaciones, gracias a sus características de funcionamiento, su facilidad de construcción y la posibilidad de variar la construcción del mismo.

Aunque por falta de tiempo no se han podido realizar análisis exhaustivos del pedaleo redondo, se ha comprobado que el motor permite un preciso control de par en un pequeño intervalo de giro. Se podrá realizar o definir la simulación de entrenamientos que tengan como objetivo una mejora en el pedaleo redondo.

Después de simular todo el conjunto se puede definir actuaciones futuras para nuevos usuarios con otros requerimientos siguiendo la línea de trabajo utilizada y llevar a cabo nuevos diseños.

Dados todos estos conceptos se ha realizado una lista de conclusiones más relevantes:

- Se ha diseñado un accionamiento eléctrico, el cual actuando como freno, suple y mejora las prestaciones de los frenos existentes.

- Las simulaciones realizadas validan la viabilidad del uso de este tipo de accionamiento en bicicletas estáticas dados los requerimientos establecidos.

- Se ha conseguido un control preciso del par que permitirá programar entrenamientos definidos para mejorar algunas cualidades físicas de fuerza o velocidad.

- El accionamiento podría implementarse en otros segmentos.

- El sistema permite variar todos los parámetros de entrada con facilidad, obteniendo el resultado de la simulación para estas condiciones.

- El sistema es programable para trabajar en distintas modalidades.

- El motor utilizado con una construcción muy versátil además de facilidad de construcción.

- A partir de un buen control se puede conseguir trabajar en cualquier régimen de forma eficiente.

- El motor permite la simulación de un pedaleo redondo

Consideraciones de la viabilidad:

Además se recogen un seguido de puntos que demuestran la viabilidad del sistema/motor:

- Las dimensiones del motor son aptas para ser acoplado al volante de inercia.

- El rango de trabajo más óptimo del motor se adecua al rango de velocidades que se determina en el pliego de condiciones.

- En el rango de velocidades, el motor puede trabajar al par definido en el estudio mecánico.

- Se ha encontrado un modo de control del motor que proporciona un bajo rizado de par el cual es despreciable en el momento del pedaleo

- Por la topología del motor se demuestra que, dispone de una alta sensibilidad a la variación de par en un corto espacio de giro.

Finalmente debe mencionarse que el estudio del conjunto mediante una visión multidisciplinar, ha permitido contemplar una mayor cantidad de puntos de vista, consiguiendo progresar de forma lenta, pero obteniendo al final un proyecto de una complejidad superior.

22 Futuras líneas de trabajo.

Como futuras líneas de trabajo se proponen diferentes líneas que surgen de diversas ideas, para el desarrollo del proyecto. De esta manera poder continuar con el estudio de este proyecto.

Propuesta 1
Realizar un control automático de la relación de marchas a utilizar dependiendo de la fuerza que se está aplicando en los pedales en un instante determinado, dando prioridad siempre a la variación del juego de engranajes antes que variar el esfuerzo de la persona.

En caso de que el juego de plato-piñón llegue a uno de sus límites, superior o inferior, y no pueda adoptar una relación de transmisión más conveniente, el control variará automáticamente el esfuerzo aplicado por el ciclista. Este control variará según las fuerzas resistivas a vencer en un determinado instante.

Propuesta 2
Realizar en la simulación de Matlab/Simulink, un indicador del juego de marchas más adecuado a utilizar en ese preciso momento. En caso de afrontar una subida pronunciada, el indicador deberá mostrar la relación corta más conveniente, en caso contrario, mostrará una relación más larga.

Este indicador podría implementarse, también, en el display de un futuro prototipo.

Propuesta 3
En un mismo display se podrían introducir y variar algunos parámetros relacionados con las fuerzas de rozamiento como, por ejemplo, el peso del ciclista, el nivel de entrenamiento o la ruta que se quiera realizar.

Propuesta 4
Mejorar el controlador a partir del análisis de todas las variables, analizando el sistema a diferentes velocidades, imponiendo varios pares, tal y como ya se ha realizado una introducción en este proyecto encontrando una tendencia de la variación de los ángulos de conducción, los ángulos de disparo y la intensidad de referencia, que permiten minimizar el rizado de para para todas las zonas de trabajo.
Este trabajo esta introducido en el apartado de “Variables de control utilizadas”.

Propuesta 5
Se debe analizar si es razonable devolver la energía generada a la línea y ver qué implicaciones tiene esta en el proyecto.

Propuesta 6
Incluir el sistema de freno estudiado en el proyecto para máquinas de entrenamientos del tren superior.

Propuesta 7
Estudiar la posibilidad de implementar el sistema de freno estudiado en el proyecto para profesionales de pista.

Propuesta 8
Acotar el motor para usuarios de rehabilitación, spinning, o usos habituales de las bicicletas estáticas como ejercicios cardiovasculares, pérdida de peso o tonificación muscular.

23 Presupuesto

En este apartado describiremos aproximadamente los costes del desarrollo del proyecto, además se estimará el coste de un posible prototipo:

- Aspectos tomados en consideración:

Para el cálculo de las horas se han tomado los 24 créditos de los que cuenta el proyecto, contando 25 horas cada crédito. A partir de aquí se ha considerado el 70% de este tiempo como trabajo de ingeniería y el otro 30% como trabajo de secretaria, además un 10% de beneficios en concepto de amortización de las dietas, transporte, software y otros costes derivados.

- 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 €**

- Construcción de un prototipo:

En el caso de llevar a cabo la realización de un prototipo se podría estimar un coste final con la información proporcionada por la empresa “Bobinados Martorell” y el departamento de ingeniería eléctrica de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniera de Vilanova i la Geltrú.

ESTIMACIÓN COSTE DEL PROTOTIPO			
Concepto	**Coste /ud (€/ud)**	**ud**	**Coste total (€)**
Motor prototipo	4.000 €	1	4.000 €
Convertidor	1.000 €	1	1.000 €
Sensor de corriente	250 €	1	250 €
Encoder	250 €	1	250 €
Montaje	1000 €	1	1000 €
TOTAL		**6.500 €**	

24 Bibliografía

Referencia electrónica

[1] Volante de inercia en bicicletas de spinning [Consulta: 03-mar-2014]: http://greenfitoutlet.wordpress.com/category/bicicletas-spinning/

[2] Sistemas de resistencia en bicis de ciclismo indoor [Consulta: 10-mar-2014]: http://www.foroindoor.com/sistemas-de-resistencia-en-bicis-de-spinning/

[3] Bicicletas spinning Schwinn [Consulta: 10-mar-2014]: http://efitnes.com/spinning-bicicletas-de-spinning/

[4] Funcionamiento del freno electromagnético [Consulta: 20-mar-2014]: http://www.adieta.com/consejos-del-experto/funcionamiento-del-freno-electromagnetico.html

[5] Bicicleta estática Life Fitness [Consulta: 27-mar-2014]: http://www.fitnessdigital.com/bicicleta-estatica-life-fitness-c1-go/p/10002343/

[6] Bicicleta estática Techness [Consulta: 27-mar-2014]: http://www.tool-fitness.es/prod-3050-techness-sb-800-mp3.html?LGWCODE=3050;32752;259&gclid=CLu5wPjPwb0CFanjwgodB1wAGg

[7] Bicicleta reclinable HIPOWER [Consulta: 01-abr-2014]: http://www.fitnessboutique.es/aparatos-gimnasia/bicicleta-reclinable/HIPOWER-SK9900-con-Televisor-/prod-HIPSK9900TV.html

[8] Bicicleta reclinable VISION [Consulta: 01-abr-2014]: http://www.fitnessboutique.es/aparatos-gimnasia/bicicleta-reclinable/VISION-R70/prod-VISR70.html#_Descripción

[9] Bicicleta estática kettler [Consulta: 01-abr-2014]: http://www.fitnessdigital.com/bicicleta-estatica-kettler-ergorace/p/10000696/?visible=N

[10] Bicicleta estática vertical o reclinada [Consulta: 13-abr-2014]: http://www.comocuidarte.es/bicicleta-estatica-vertical-o-reclinada.php

[11] Ejercicio cardiovascular [Consulta: 25-abr-2014]: http://voces.huffingtonpost.com/alejandro-chaban/ejercicio-cardiovascular-beneficios_b_3061871.html

[12]Beneficios de la bicicleta estática [Consulta: 25-abr-2014]:
http://www.ehowenespanol.com/montar-bicicleta-estatica-fortalecera-rodilla-sobre_121319/

[13]Beneficios de la bicicleta [Consulta: 28-abr-2014]:
http://eldelabici.blogspot.com.es/2008/03/montar-en-bici-es-el-ejercicio-ms-sano.html

[14]Perfiles de potencia [Consulta: 15-may-2014]:
http://home.trainingpeaks.com/blog/article/power-profiling

[15]Ciencia del deporte [Consulta: 15-may-2014]:
http://www.sportsscientists.com

[16]Análisis de etapas en el Tour de Francia [Consulta: 28-may-2014]:
http://home.trainingpeaks.com/blog/article/top-5-tour-de-france-moments-to-date-as-captured-o

[17]Intervenciones del ciclismo en la rehabilitación [Consulta: 27-may-2014]:
http://ptjournal.apta.org/content/87/9/1243.full

[18] Potencias máximas en amateurs [Consulta: 27-may-2014]:
https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/3790/3510

[19]Entrenamientos en la Wattbike [Consulta: 01-jun-2014]:
http://wattbike.com/es/guia_de_entrenamientos/zonas_de_entrenamiento_de_ritmo_cardiaco_y_potencia

[20]Tipo de control [Consulta: 24-06-2014]:
http://www.oocities.org/es/jeeesusmeeerino/procesos/tipos/tipos.html

[21] Rectificador [Consulta: 15-06-2014]:
http://www.slideshare.net/betsyza/rectificadores-13687981

[22] Motores [Consulta: 06-06-2014]:
http://www.iesbernatguinovart.com/04v_tecnologia/carpeta_arxius/maquinas%20electricas.doc

[23] Maquinas asíncronas [Consulta: 17-06-2014]:
http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/asincronas%20caminos.pdf

Artículos

[24] *James C. Martin, Christopher J. Davidson and Eric R.Pardyjak. Understanding Sprint-Cycling Performance. International Journal of Sports Physiology and Performance.* 2007.

[25] Alvarez G. Análisis y optimización biomecánica de la técnica de pedaleo ciclista. San Sebastián. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra. 1995.

[26] Burke ER. Science of Cycling. Champaign, Illinois. Ed. Human Kinetics. 1986.

[27] Sandra M. Castaños; Javier Maixe A**.;** "Criterios de diseño para un motor de reluctancia autoconmutada operando a 42v en una aplicación automotriz" Universidad Tecnológica de Pereira, Mayo de 2007

[28] Informe para la fundació equilibrí "Accionamientos con motor eléctrico de reluctancia híbrido" 4 de octubre 2010

[29] Andrada, P.; Blanque, B.; Castellana, F.; Martinez, E.; Perat, J.I.; Torrent, M.; Sanchez, J.A. "El motor de reluctancia autoconmutado". Técnica Industrial. 2004, Madrid.

[30] GAECE ;"Modelado en Simulink de un accionamiento con SRM (estructura 8/6)" Departament d'Enginyeria Elèctrica EPSEVG 2011

[31] 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.

Libros

[32] Chema Arguedas Lozano. Planifica tus pedaladas. España, 2012. ISBN: 978-84-616-1666-4

[33] Mad Dogg Athletics,Inc. Spinning, manual para instructor. 1995.
Gregersen CS, Hull ML. Non-driving intersegmental knee moments in cycling computed using a model that includes three-dimensional kinematics of the shank/foot and the effect of simplifying assumptions. J Biomech 2003; 36: 803-813.

[34] Gregersen CS, Hull ML. Non-driving intersegmental knee moments in cyclingcomputed using a model that includes three-dimensional kinematics of theshank/foot and the effect of simplifying assumptions. J Biomech 2003; 36: 803-813.

[35] Cavanagh PR, Snderson DJ. The biomechanics of elite pursuit riders. Burke E(Ed.). The Science of Cycling. Champaign, Illinois. Human Kinetics. 1985: 91 122.

[36] Bolourchi F, Hull ML. Measurement of rider induced loads during simulated bicycling. Int J Sports Biomech 1985, 20: 565-575.

[37] Cavanagh PR, Sanderson DJ. The biomechanics of cycling: studies of the pedaling mechanics of elite pursuit riders. Burke ER (Ed.). Science of cycling. Champaign, Illinois. Human Kinetics. 1986: 27-30.

[38] García-López J, Peleteiro J, Rodríguez-Marroyo JA, Redondo JC, Villa-Vicente JG,Navas FJ, Córdova A. Utilización del túnel del viento para la mejora delrendimiento en ciclistas profesionales: estudio de 5 casos. En Campos, J. F. *et al*(Eds.) Nuevas aportaciones al estudio de la actividad física y el deporte. Valencia. Ed. Facultat de Ciencies de l'Activitat Física i l'Esport. Universitat de Valencia. 2001: 243-244

[39] Olds TS. The mathematics of breaking away and chasing in cycling. Eur J Appl Physiol 1998; 77: 492-497.

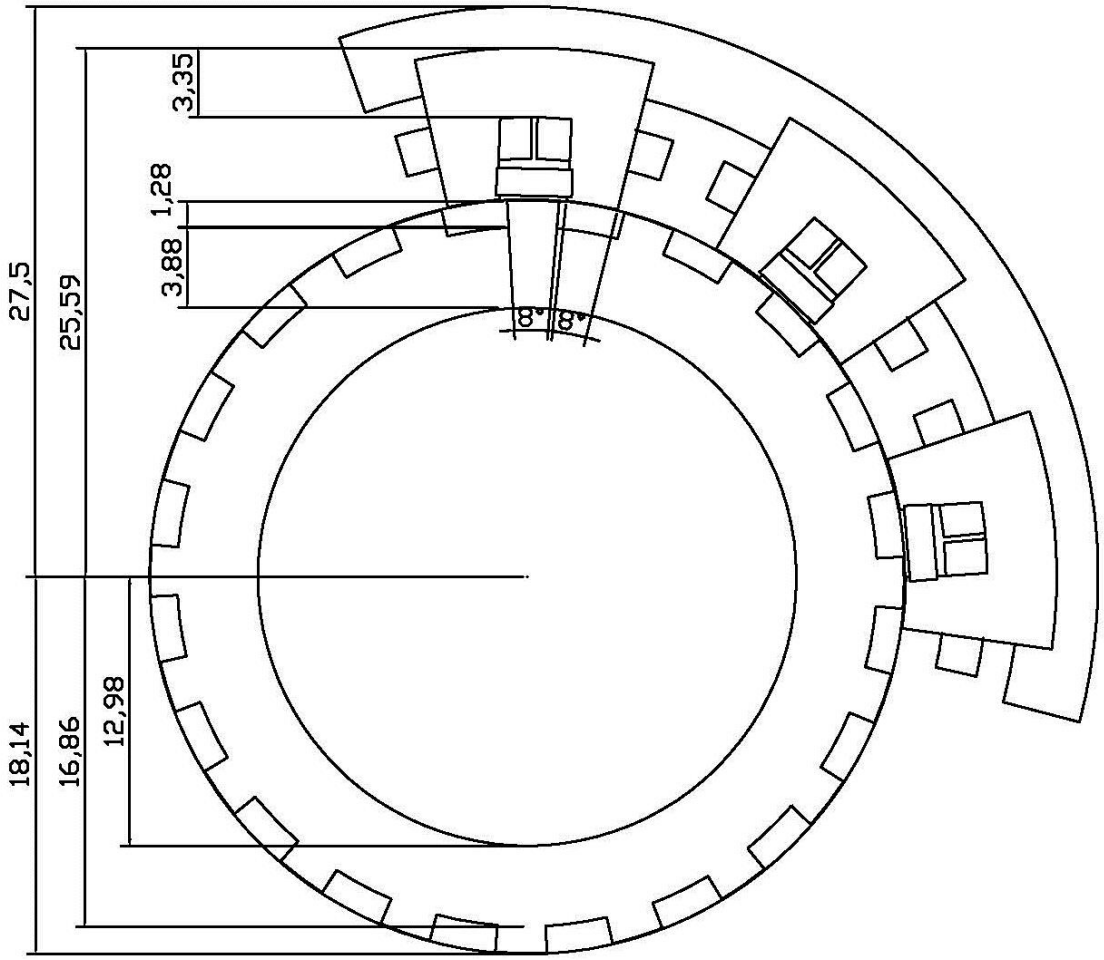
[40] Fernando Jimenez J, Terrados Cepeda N, Gerardo Villa, Vicente, Manonelles Marqueta P. Medicina y fisiología del ciclismo. 2009

[41] Cardona Foix S, Clos Costa D. Teoría de máquinas. Edicions UPC. 2001: 121-136

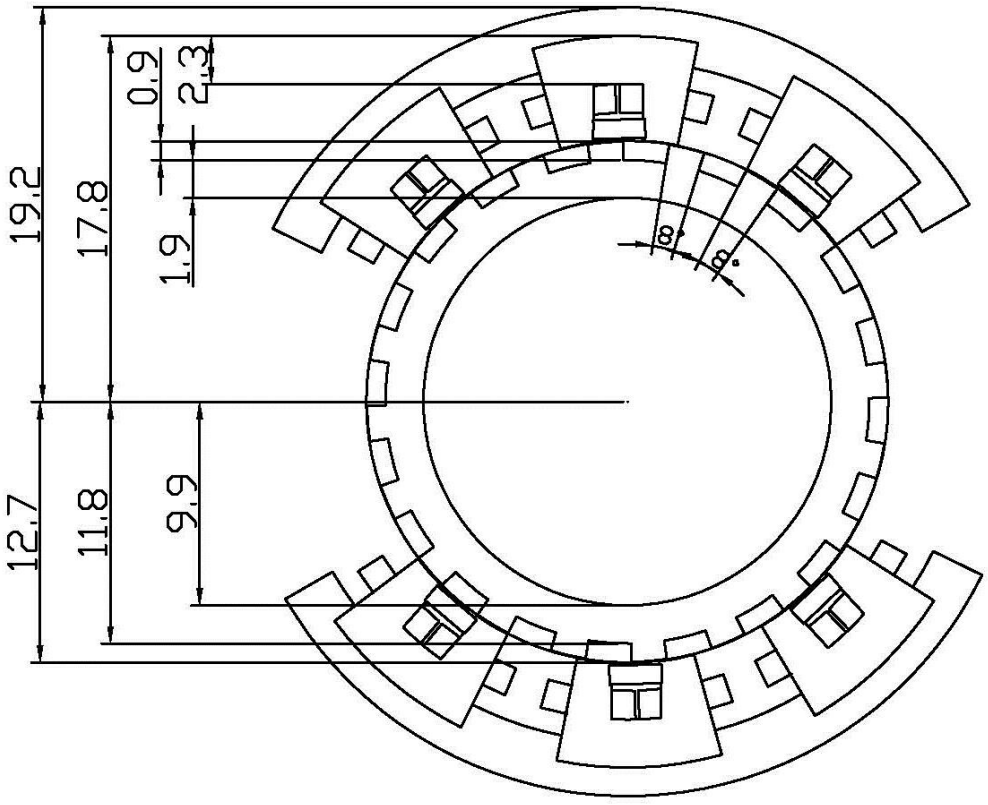
[42] Torrent Burges, Marcel.; "Aportaciones al diseño y la caracterización del motor de reluctancia autoconmutado". Director: Andrada Gascon, Pere. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2002.

[43]**]** Blanque Molina, Baldui; "Simulacion Interactiva de motores de reluctancia autoconmutada" Departament d'Enginyeria Elèctrica,2007

25 Planos



	Acabats: --	Tutor: Balduí Blanque Molina
	Tractament: -	Equip: spinning
Escala: 1:1	Material: --	Proyecto: motor spinning
	Unidades: cm	Especificacions:
Plano Nº: 1	Denominación: Motor propuesta	



	Acabats: --	Tutor:	Balduí Blanque Molina
	Tractament: -	Equip:	spinning
Escala: 1:1	Material: --	Projecte:	motor spinning
	Unidades: cm	Especificacions:	
Plano Nº: 2	Denominación: Propuesta final		

Annexo A.

Annexo A.1. Pruebas físicas en la bicicleta estática

Nivel	Rpm	P (W)	rad/s	N·m
1	50	26	5,24	4,97
1	70	36	7,33	4,91
1	90	47	9,42	4,99
1	120	63	12,57	5,01
5	50	68	5,24	12,99
5	70	98	7,33	13,37
5	90	123	9,42	13,05
5	120	164	12,57	13,05
10	50	121	5,24	23,11
10	70	173	7,33	23,60
10	90	219	9,42	23,24
10	120	285	12,57	22,68
15	50	173	5,24	33,04
15	70	240	7,33	32,74
15	90	317	9,42	33,63
15	120	400	12,57	31,83
20	50	233	5,24	44,50
20	70	310	7,33	42,29
20	90	411	9,42	43,61
20	120	540	12,57	42,97
25	50	310	5,24	59,21

Tabla 95. Resultados de las pruebas físicas en la bicicleta estática

En la bicicleta eléctrica mediante el display se pudo extraer la potencia y la cadencia, así se pudo calcular el par realizado en el pedal de la siguiente forma:

$$\omega(rad/s) = rpm \cdot 2pi/60$$

$$\frac{P\ (w)}{\omega(rad/s)} = M\ (N \cdot m)$$

Annexo A.2. Pruebas físicas en la bicicleta Keiser M3

Nivel	Rpm	P (W)	rad/s	F·m	Sensaciones
1	30	5	3,14	1,59	Cadencia muy baja
1	50	9	5,24	1,72	Muy bajo
1	60	11	6,28	1,75	
1	70	14	7,33	1,91	
1	80	16	8,38	1,91	
1	90	19	9,42	2,02	
1	100	21	10,47	2,01	
1	110	23	11,52	2,00	
1	120	25	12,57	1,99	
1	130	29	13,61	2,13	
5	60	22	6,28	3,50	
5	70	30	7,33	4,09	
5	80	33	8,38	3,94	
5	90	40	9,42	4,24	
5	100	47	10,47	4,49	
5	110	54	11,52	4,69	
5	120	56	12,57	4,46	
5	130	69	13,61	5,07	
8	60	35	6,28	5,57	
8	70	44	7,33	6,00	
8	80	57	8,38	6,80	
8	90	64	9,42	6,79	
8	100	73	10,47	6,97	
8	110	89	11,52	7,73	
8	120	100	12,57	7,96	
8	130	119	13,61	8,74	
10	60	52	6,28	8,28	
10	70	70	7,33	9,55	
10	80	80	8,38	9,55	
10	90	100	9,42	10,61	
10	100	110	10,47	10,50	
10	110	128	11,52	11,11	
10	120	140	12,57	11,14	
10	130	160	13,61	11,75	
15	60	118	6,28	18,78	
15	70	150	7,33	20,46	
15	80	170	8,38	20,29	
15	90	205	9,42	21,75	
15	100	235	10,47	22,44	
15	110	265	11,52	23,01	
15	120	280	12,57	22,28	
15	130	308	13,61	22,62	

17	60	170	6,28	27,06	Cuesta mantener cadencia
17	80	269	8,38	32,11	
20	42	150	4,40	34,10	Cuesta subir
20	60	280	6,28	44,56	
24	40	252	4,19	60,16	Única posible

Tabla 96. Resultados de las pruebas físicas en la bicicleta Keiser M3

En la bicicleta estática Keiser M3 mediante el display se pudo extraer la potencia y la cadencia, así se pudo calcular el par realizado en el pedal de la siguiente forma:

$$\omega(rad/s) = rpm \cdot 2pi/60$$

$$\frac{P\ (w)}{\omega(rad/s)} = M\ (N \cdot m)$$

Annexo A.3. Pruebas físicas en la bicicleta Wattbike

Nivel magnético	Nivel Aire	Rpm	P (W)	rad/s	F·m
1	1	50	41	5,24	7,83
1	1	80	111	8,38	13,25
1	1	110	295	11,52	25,61
1	10	50	80	5,24	15,28
1	10	80	328	8,38	39,15
1	10	110	740	11,52	64,24
4	1	50	60	5,24	11,46
4	1	80	140	8,38	16,71
4	1	110	230	11,52	19,97
4	5	50	80	5,24	15,28
4	5	80	253	8,38	30,20
4	5	110	520	11,52	45,14
4	10	50	106	5,24	20,24
4	10	80	324	8,38	38,67
4	10	105	750	11,00	68,21

Tabla 97. Resultados de las pruebas físicas en la bicicleta Wattbike

En la bicicleta estática Wattbike mediante el display se pudo extraer la potencia y la cadencia, así se pudo calcular el par realizado en el pedal de la siguiente forma:

$$\omega(rad/s) = rpm \cdot 2pi/60$$

$$\frac{P\ (w)}{\omega(rad/s)} = M\ (N \cdot m)$$

Annexo B.

Annexo B.1. Cálculos, resultados, tablas y gráficos del estudio mecánico de la bicicleta convencional en Excel.

Para la realización de este proyecto se ha realizado un estudio mecánico completo del funcionamiento de las bicicletas convencionales. En este estudio se han llevado a cabo todos los cálculos necesarios para el entendimiento de todo el sistema, y se han realizado tablas y gráficas para su fácil visualización y comprensión. Todo este procedimiento se ha realizado en Excel y en él se puede comprobar todos los parámetros que afectan a la cinética de la bicicleta y se pueden ajustar y variar como se prefiera. El archivo consta de varias hojas y cada una trata de un apartado diferente.

Nombre del archivo: Sistema_mecanico_excel

A continuación se exponen:

Hoja 1: GRA. FUERZA PROFESIONAL-AMATEUR

Esta hoja contiene la gráfica de fuerzas en el pedaleo de ciclistas profesionales y amateurs utilizadas en este proyecto.

Hoja 2: ECUACIONES PROFESIONAL-AMATEUR

Contiene las ecuaciones de la fuerza que aplican los ciclistas profesionales y amateurs para formar la gráfica correcta.

Hoja 3: MECÁNICA AMATEUR

Esta hoja contiene los cálculos de fuerza y par de la parte mecánica para ciclistas amateurs. Contiene diferentes parámetros que se pueden variar cambiando el valor de entrada para comprobar resultados.

Hoja 4: MECÁNICA PROFESIONAL

Contiene los cálculos de fuerza y par de la parte mecánica para ciclistas profesionales. Contiene diferentes parámetros que se pueden variar cambiando el valor de entrada para comprobar resultados.

Hoja 5: REL.TRANS-DESARROLLO

En esta hoja se presentan las tablas completas de las relaciones de transmisión y el cálculo de sus desarrollos.

Hoja 6: CURVAS POTENCIA AMA.

Se muestran las tablas y graficas de las curvas de potencia obtenidas de los ciclistas amateurs.

Hoja 7: CURVAS POTENCIA PRO.

Se muestran las tablas y graficas de las curvas de potencia obtenidas de los ciclistas profesionales.

Hoja 8: CURVAS POT. FINALES PRO-AMA

En este apartado se presentan las curvas de potencia finales y resumidas con el fin de poder cambiar los parámetros que se desean y hacer pruebas para ver diferentes resultados.

Hoja 9: CURVAS POTENCIA

Esta hoja contiene un listado de diferentes curvas de potencia teóricas que sirven para poder ver las diferentes tendencias que siguen. Estas curvas sirven para acotar los rangos de trabajo según los límites que se deseen.

Hoja 10: FUERZAS FREG. AMA.

Este apartado contiene las tablas de resultados y las gráficas correspondientes de las diferentes fuerzas de rozamiento introduciendo los parámetros determinados para los ciclistas amateurs. En el caso que se desee se puede variar cualquier parámetro de entrada y ver cómo afecta al resultado final.

Hoja 11: AMA. REL(53-13)

Se muestran los resultados de los cálculos que las fuerzas de rozamiento tienen en el ciclista amateur. Para hacer estos cálculos se ha escogido una transmisión 53-13 ya que es un límite que se quiere acotar.

Hoja 12: AMA. REL(39-19)

En esta hoja se presentan los resultados de la fuerza de rozamiento en el ciclista amateur. Para hacer los cálculos se ha escogido una relación 39-19 ya que es un límite del rango de trabajo.

Hoja 13: FUERZAS FREG. PRO

Esta hoja contiene las tablas de los cálculos y las gráficas correspondientes de las diferentes fuerzas de rozamiento introduciendo los parámetros más adecuados a los

ciclistas profesionales. En el caso que se desee se puede variar cualquier parámetro de entrada y ver cómo afecta al resultado final.

Hoja 14: PRO. REL(53-13)

Este apartado presenta los resultados de los cálculos que las fuerzas de rozamiento tienen sobre un ciclista profesional. Para hacer estos cálculos se ha escogido una transmisión 53-13 ya que es un límite que se quiere acotar por su utilización.

Hoja 15: PRO. REL (39-19)

Se muestran los resultados que la fuerza de rozamiento que tienen en ciclistas profesionales. Para hacer los cálculos se ha escogido una relación 39-19 ya que es un límite del rango de trabajo.

Annexo B.2. Análisis y simulación del estudio mecánico de la bicicleta convencional en el entorno interactivo Matlab/Simulink

En el entorno de Simulink se ha realizado la simulación del sistema cinético de la bicicleta. Para la realización y el buen funcionamiento del sistema es necesario introducir ciertos parámetros que son la base para los posteriores cálculos y correctas simulaciones. Es necesario la introducción de dichos valores al principio del sistema para que pueda funcionar correctamente.

Nombre del archivo: Sistema_matlab

Los datos iniciales del sistema son:

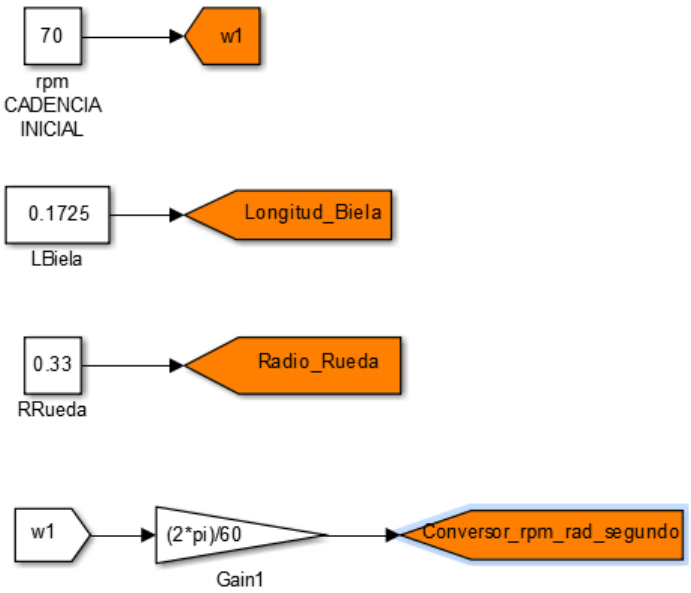


Figura 226. Datos iniciales del sistema

A continuación se introducen los dientes referentes al juego de engranajes:

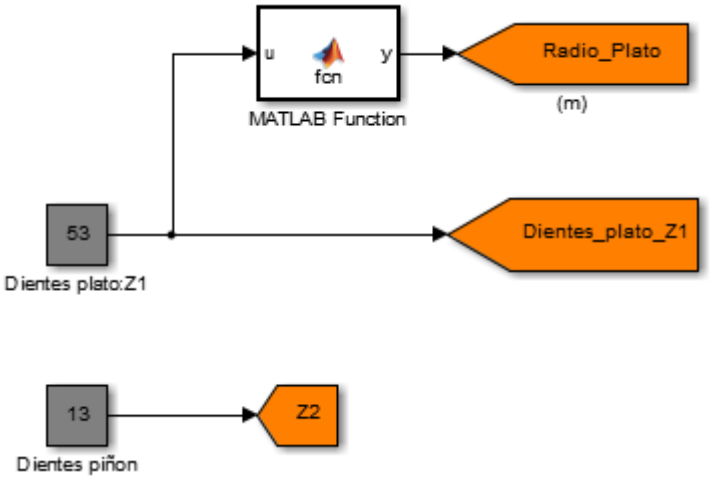


Figura 227. Numero de dientes del plato y del piñón

Con el número de dientes del engranaje introducidos el sistema es capaz de calcular la relación de transmisión y el radio del piñón, datos de vital importancia que sirven posteriormente para todo el cálculo de fuerzas:

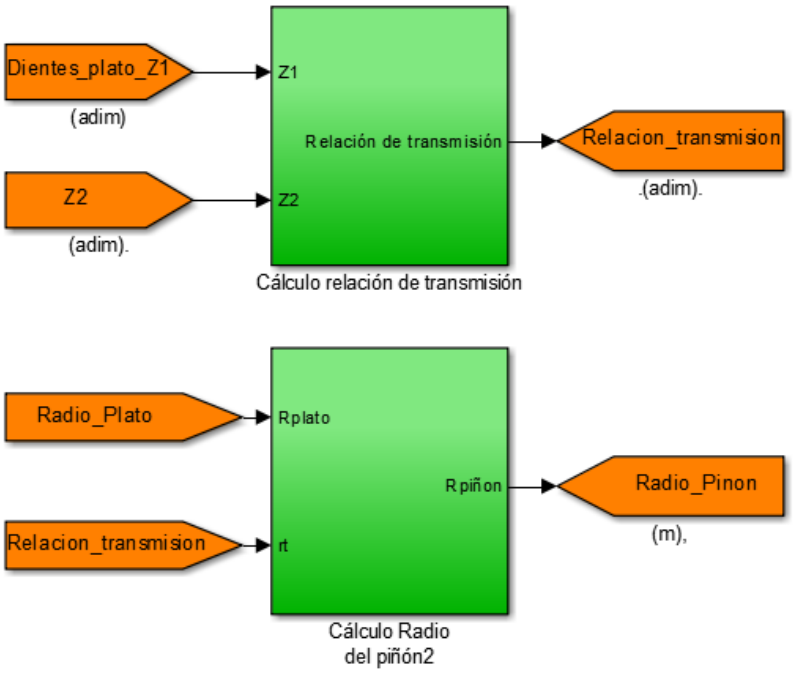


Figura 228. Cálculo de la relación de transmisión y el radio del plato

Con la cadencia inicial y la relación de transmisión el sistema ya puede calcular la velocidad (rpm) de la rueda trasera.

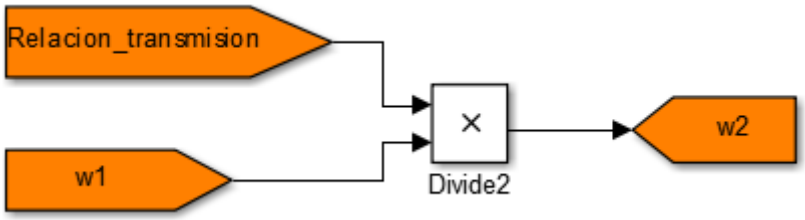


Figura 229. Velocidad de la bicicleta (rpm)

Una vez calculada la cadencia de la rueda trasera el sistema puede calcular la velocidad del conjunto ciclista-bicicleta de la siguiente forma, dato necesario para:

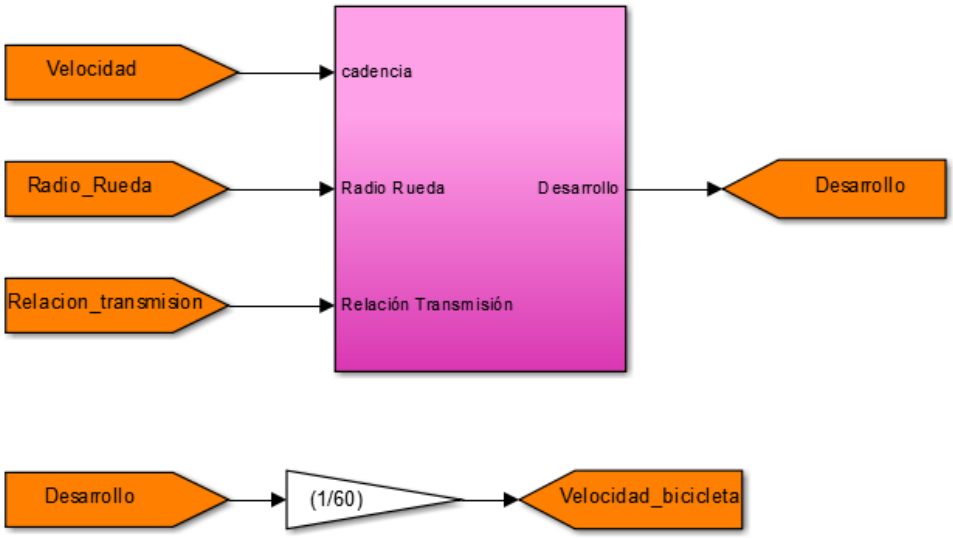


Figura 230. Cálculo del desarrollo y de la velocidad de la bicicleta en m/s

Todos los datos anteriormente vistos son datos directamente introducidos al sistema y datos calculados a partir de estos, pero que también son a su vez datos para otro tipo de cálculos. Estos nuevos datos calculados sirven para el cálculo de las fuerzas de rozamiento. Además se deben introducir otros parámetros de entrada solo para su cálculo. Son los siguientes:

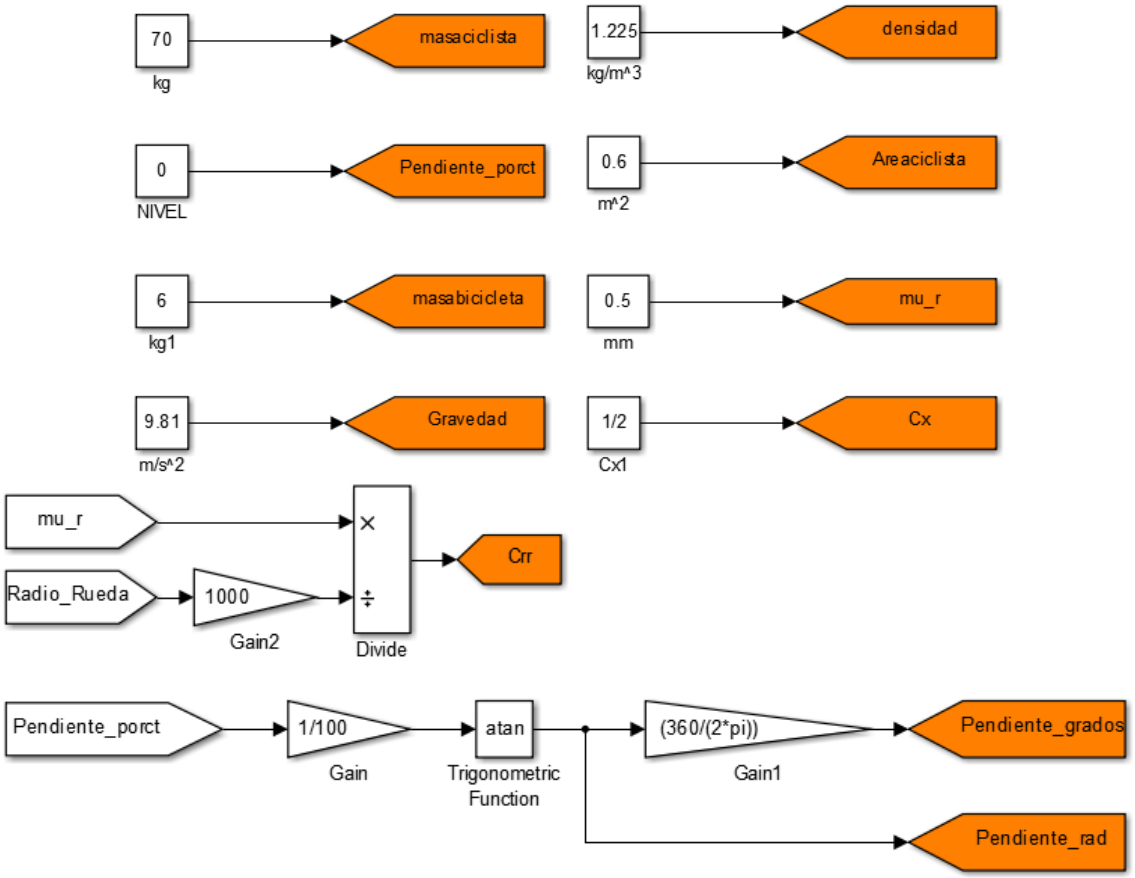


Figura 231. Datos iniciales para las fuerzas de rozamiento

Las fuerzas de rozamiento son 3. La primera fuerza de rozamiento es la fuerza de la gravedad:

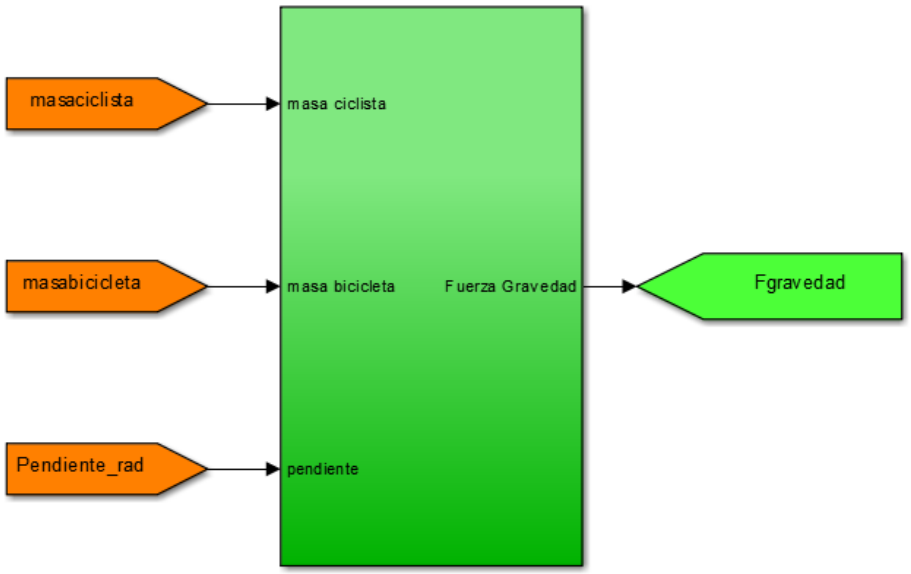


Figura 232. Cálculo de la fuerza de la gravedad

La segunda fuerza de rozamiento es la de rodadura:

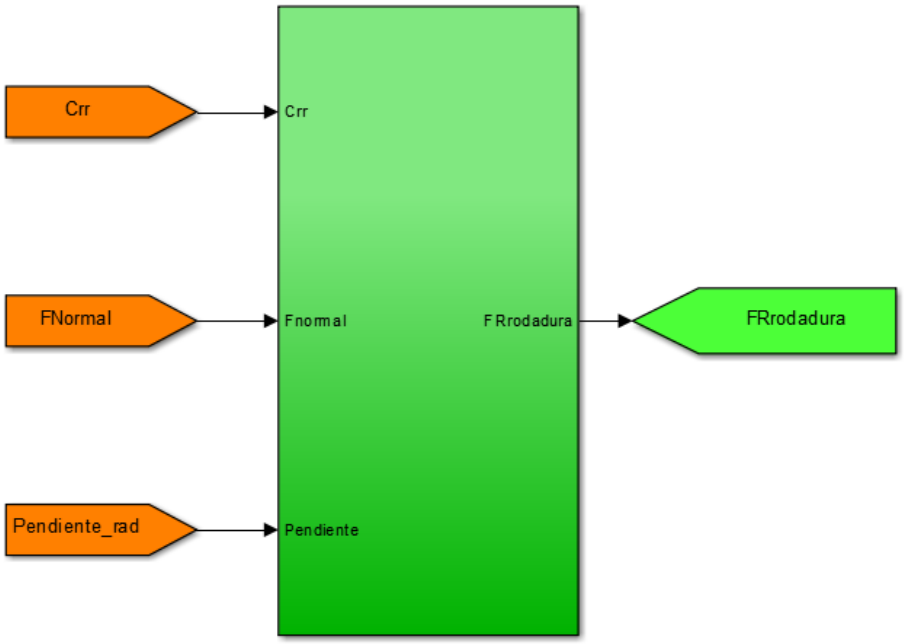


Figura 233. Cálculo de la fuerza de rozamiento de rodadura

La tercera es la fuerza del aire:

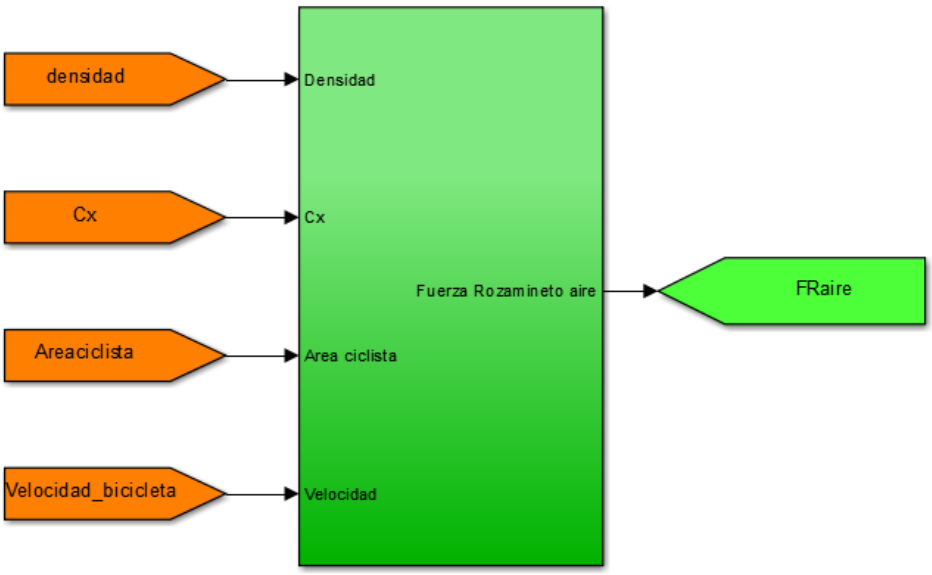


Figura 234. Cálculo de la fuerza de rozamiento del aire

Annexo C.

Annexo C.1. Femm

Método de elementos finitos es un software el cual permite obtener de manera numérica de un elemento o estructura, sobre el cual se han definido ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en subdominios llamados elementos finitos.
Dentro de cada elemento de distinguen unos puntos llamados “nodos”, y el conjunto de nodos se la llamara malla.
Los cálculos se realizaran en una malla de nodos, la generación de la malla se realiza en una etapa previa a los cálculos. Las relaciones entre nodos se relacionan el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas por cada nodo y llamados grados de libertad.
Las relaciones entre el valor de una variable y los nodos se pueden escribir como ecuaciones lineales
La matriz de este sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez, el número de ecuaciones de estado es proporcional al número de nodos.
Este programa nos proporcionara las características del motor en modo estático dándonos la forma de onda del par y del flujo concatenado, donde con estos valores serán introducidos en el simulador HRM y se podrá analizar el motor de forma dinámica y como responde al control.

Archivo adjunto

En la carpeta que se adjunta junto con la memoria se puede encontrar la carpeta “Estático” donde están los estudios de tendencia realizados con la variación de las estructuras, con un archivo Excel Flujo magnético donde están las comparaciones del mismo.

Annexo C.2. LUA

LUA es un lenguaje de programación , el cual es utilizado para programar funciones en el programa FEMM y obtener valores de forma automática, para la programación de este lenguaje se ha utilizado un patrón de programación donde se ha tenido que variar ciertos parámetros dependiendo de la estructura del motor y del análisis que se quiere conseguir.

El lenguaje de programación es el siguiente:

```
step=0.5
finalc=30
intc=0.5

outfileval1="flux_"..step.."_c_"..".txt"
outfileval2="Statictorque_"..step.."_c_"..".txt"

for pos=0,9,step do

  handle=openfile(outfileval1,"a")
  write(handle,pos,"  \t")
  closefile(handle)

  handle=openfile(outfileval2,"a")
  write(handle,pos,"  \t")
  closefile(handle)

for ia=0,finalc,intc do

  mi_modifycircprop("faseC",1,ia)

  mi_analyze (1)
  mi_loadsolution()

  a,b,c,d,fluxc,f=mo_getcircuitproperties("faseC")

  handle=openfile(outfileval1,"a")
  write(handle,fluxc,"  \t")
  closefile(handle)

  mo_groupselectblock(1)
  torque=mo_blockintegral(22)

  handle=openfile(outfileval2,"a")
  write(handle,torque,"  \t")
  closefile(handle)

  mo_close()

end

  handle=openfile(outfileval1,"a")
  write(handle,"  \n")
  closefile(handle)

  handle=openfile(outfileval2,"a")
  write(handle,"  \n")
  closefile(handle)

  mi_seteditmode("group")
  mi_selectgroup(1)
  mi_moverotate(0,0,step)

end
```

1
2
3
4
5
6

Figura 235. Programación LUA

A continuación se detallaran los puntos señalados en la imagen, siendo estos los parámetros a cambiar en el análisis del motor.

1) Los pasos en grados que se analizara el motor, en el caso del ejemplo el motor se analizara cada 0,5 grados
2) Corriente final hasta la que se analizara el motor, en este ejemplo el motor estará analizado hasta 30A
3) Cada cuantos saltos de corriente estará hecho el análisis, en el ejemplo el motor estará analizado cada 0,5 A
4) El parámetro este indica el inicio y el fin de los grados que se analizaran separados por una coma, en el ejemplo dice que se analizara de 0º, hasta 9º, cada0,5º

5) Aquí indica igual que en el punto anterior desde que corriente y hasta que corriente se analizara y cada cuanto, en el ejemplo se analiza desde 0A hasta 30A y cada 0,5A
6) En este último punto se introducirá la fase la cual se quiere analizar, en este caso la fase la cual se analiza será la Fase C

Estos datos obtenidos se generaran en un documento ".txt" el cual se puede introducir directamente en MATLAB y de ahí se pueden ver las graficas obtenidas.

Annexo C.3. Simulador HRM

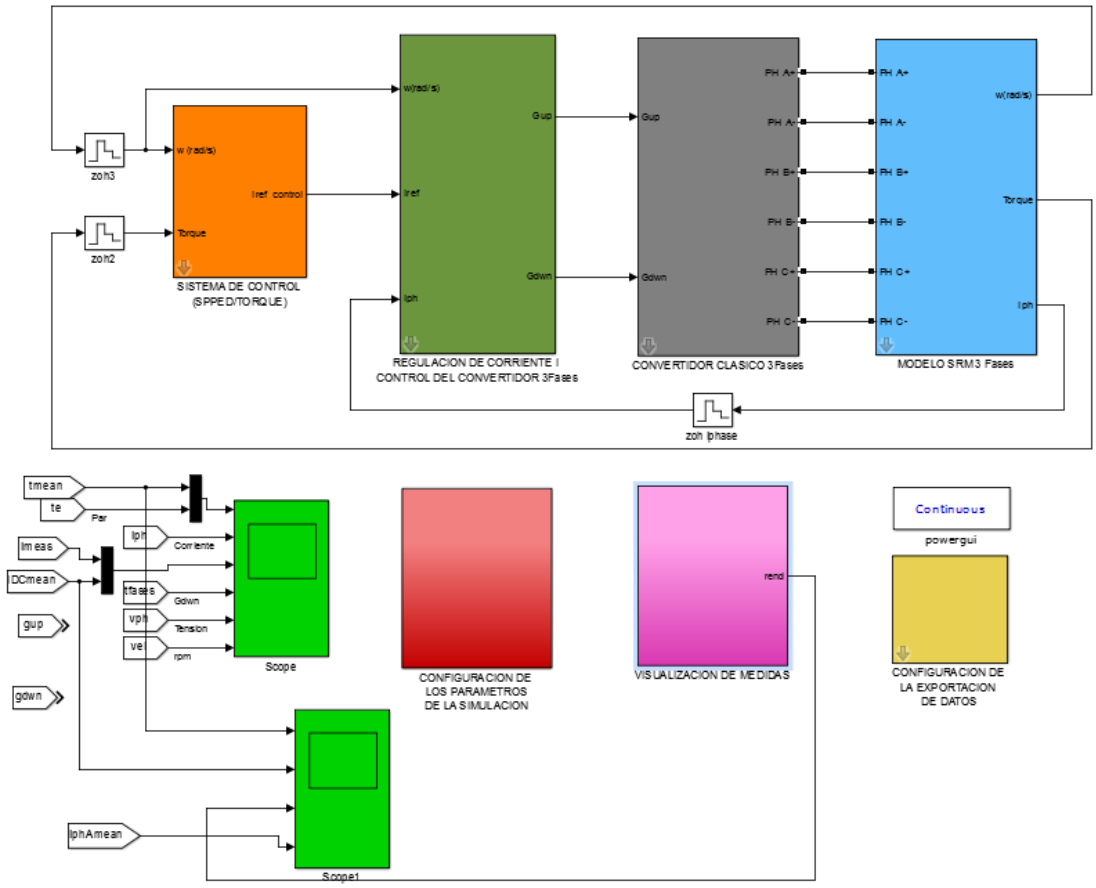
Este simulador es un programa diseñado para el control y el análisis dinámico de un motor de reluctancia auto conmutado ya sea SRM o HRM [43], en este programa se introducirán las graficas obtenidas gracias al programa de elementos finitos de Par-posición y Flujo concatenado Posición que se han comentado en el apartado anterior, además se introducirán los parámetros del diseño, así como:

- Tensión a la que trabaja el motor.
- Resistencia del motor.
- Stroke de la fase.

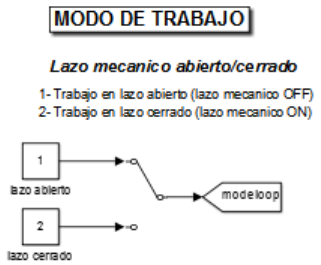
Una vez se hayan introducido todos los datos se pasara a modificar los parámetros de trabajo del motor:

- Ángulos de disparo
- Velocidad de trabajo

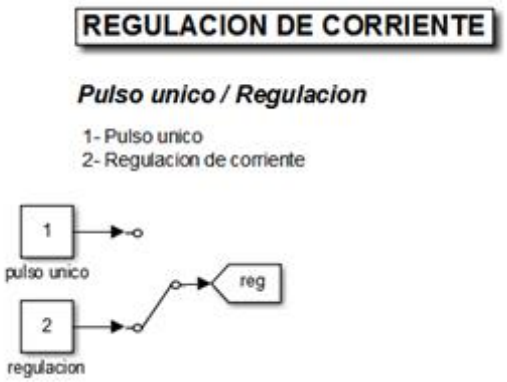
El siguiente paso es observar el comportamiento que tendrá el motor gráficamente y sacar conclusiones del motor.
Para esto se entraran los parametros que variaran en el motor, que se encotraran en el bloque de configuracion de parametros de la simulacion



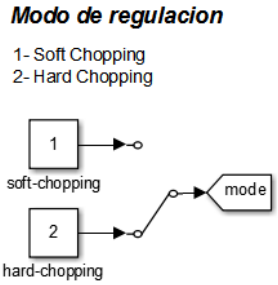
Como primer parametro se seleccionara el modo del trabajo del motor, para hacer ensayos con el motor se trabajara en lazo abierto ya que estamos trabajando sin carga por lo tanto no es necessario trabajar en lazo cerrado



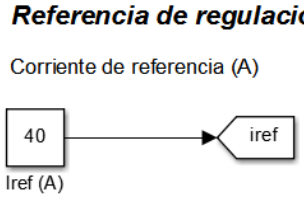
Para obtener la curva par velocidad del motor se trabajara en regulación limitando la corriente a 40A, siendo este el límite de desestabilización del motor, y de esta manera obteniendo la Curva par velocidad del motor.



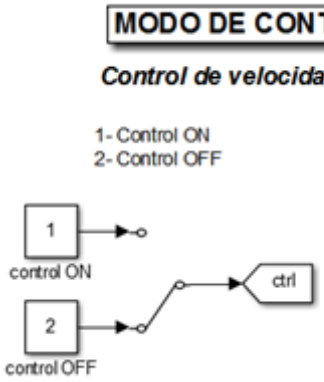
El modo de regulación de corriente se hará del modo hard-chopping ya que de esta manera se puede tener un mayor ajuste del par deseado y un menor rizado como ya se ha especificado anteriormente.



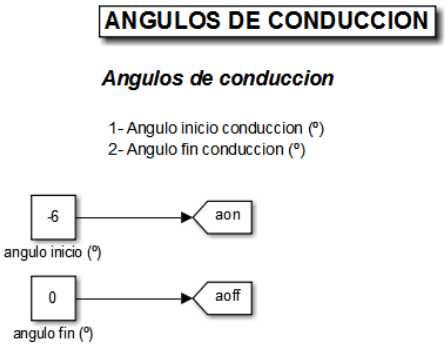
Como se ha especificado anteriormente la corriente de referencia estará estabilizado en 40A



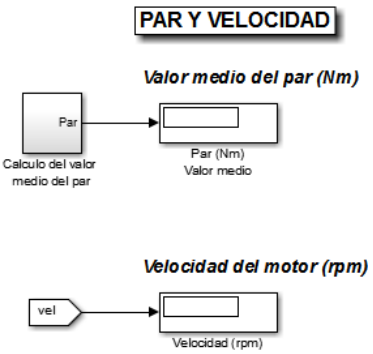
Para analizar el motor el modo de control permanecerá desactivado, ya que se quiere obtener el par deseado del motor de forma mas optima regulando la corriente y los ángulos de conducción de forma manual.



El ángulo de conducción utilizado en el estudio de par velocidad será el Angulo de estado natural del motor, y con este se realizaran todas las comparaciones de las diferentes curvas obtenidas.
Cuando se quiera ajustar el control del motor se variaran estos ángulos juntos la corriente de referencia para obtener el control más óptimo respecto a la velocidad del motor en ese instante.



Para la obtención de la curva Par Velocidad del motor se observara el bloque de visualización de datos donde indica la velocidad y el par del motor al que esta trabajando, este Par será el valor medio del rizado.



Archivo adjunto

En la carpeta “Dinamico” se encuentran las dos propuestas que se ofrecen en la memoria con su archivo .m y el simulador de Matlab/Simulink con los que se han realizado los análisis, se encontrara también un archivo Excel llamado motor comparación, donde se comparan los motores con diferentes construcciones en modo dinamico, y dentro de este mismo Excel se encuentra también la comparación de los análisis de control de los dos motores propuestos y mostrados en la memoria.