

Modelo dinámico de una prótesis transtibial para ciclistas paralímpicos

Dynamic model of a transtibial prosthesis for paralympic cyclists

Jhonnatan Eduardo Zamudio Palacios ^{1*}, Oscar Leonardo Mosquera Dussan ², Daniel Guzmán Pérez ³, Daniel Alfonso Botero Rosas ⁴, Oscar Rubiano Espinosa ⁵, José Antonio García Torres ⁶, Iván Darío Chavarro Castañeda ⁷

^{1 2 3 6 7} Centro de Investigación y Desarrollo en Simulación, Escuela Militar de Cadetes “José María Córdova”, ⁴ Área I+D+i, Universidad de la Sabana, ⁵ Universidad Libre de Colombia

¹ jhonatan.zamudio@esmic.edu.co, ² oscar.mosquera@esmic.edu.co, ³ daniel.guzman@buzonejercito.mil.co, ⁴ daniel.botero@unisabana.edu.co, ⁵ oscar.rubiano@idrd.gov.co, ⁶ josangarcia@gmail.com, ⁷ ivan.chavarro@buzonejercito.mil.co

RESUMEN— El entrenamiento de deportistas con algún tipo de discapacidad encuentra en el desarrollo tecnológico un aliado indispensable, generando cada día avances para contribuir a la calidad de vida permitiendo maximizar las capacidades de los atletas. El rendimiento de un ciclista depende de factores fisiológicos y biomecánicos, como el perfil aerodinámico, las medidas de la bicicleta, longitud de la biela, sistemas de pedaleo, tipo de competencia, entre otros. Este estudio particularmente se centra en la descripción del modelo dinámico de una prótesis transtibial para ciclistas paralímpicos, en el que se integra al atleta con el tipo de competencia, considerando especificaciones de terreno y tipo de bicicleta. La obtención del modelo matemático para el análisis de fuerzas en la biela se basa en el método de potencias virtuales con el fin de hallar la fuerza que debe experimentar un ciclista paralímpico de alto rendimiento. Como resultado del análisis y modelo matemático, se calculan las fuerzas mecánicas que puede experimentar una prótesis transtibial en su tobillo, tibia y socket, permitiendo realizar un diseño óptimo de la prótesis que será empleada en competencias paralímpicas de alto rendimiento.

Palabras claves— Biomecánica, ciclista paralímpico, cinemática, fuerzas de reacción, modelo dinámico, potencias virtuales, prótesis transtibial.

ABSTRACT— The training of athletes with some type of disability finds in the technological development an indispensable ally, generating every day advances that contribute to the quality of life, allowing maximize the athletes abilities. The performance of a cyclist depends on physiological and biomechanical factors, such as aerodynamic profile, bicycle measurements, connecting rod length, pedaling systems, and type of competition, among others. This study particularly focuses on the description of the dynamic model of a transtibial prosthesis for paralympic cyclists, in which the athlete is integrated with the type of competition, considering terrain specifications and type of bicycle. The obtaining of the mathematical model for the analysis of forces in the crank is based on the method of virtual powers in order to find the force that a high performance paralympic cyclist must experience. As a result of the analysis and mathematical model, the mechanical forces that a transtibial prosthesis can undergo in its ankle, tibia and socket are calculated, allowing an optimal design of the prosthesis that will be used in high performance paralympic competitions.

Keywords- Biomechanics, paralympic cyclist, kinematics, reaction forces, dynamic model, virtual powers, transtibial prosthesis.

1. Introducción

Las personas con algún tipo de condición de discapacidad, generalmente dependen de dispositivos que los asisten en las actividades diarias. El desarrollo tecnológico de estos dispositivos ha permitido mejorar la calidad de vida de esta población, y su alcance se ha extendido a la práctica deportiva. Aunque muchos deportes paralímpicos solo requieren tecnología similar a la de sus homólogos olímpicos, se ha evidenciado un

desarrollo tecnológico importante principalmente en dispositivos protésicos y silla de ruedas [1].

La tecnología se ha posicionado como un aliado fundamental del atleta paraolímpico. El desarrollo tecnológico debe ajustarse a los requisitos deportivos de cada individuo, con el fin de maximizar el rendimiento de atletas paralímpicos de manera segura. El máximo estamento en el ámbito del ciclismo es la Unión Ciclista Internacional (UCI) [2], la cual tiene por objetivo promover y favorecer el ciclismo como deporte y al

colectivo de ciclistas que llevan a cabo la práctica del mismo, incluyendo a ciclistas paralímpicos.

Particularmente el Comité Paralímpico Internacional (IPC) es la autoridad suprema en regulación de paraciclismo en estándares paralímpicos. En el sector de la tecnología del cuidado de la salud, se tiene como referente en el diseño de prótesis las normas técnicas NTC 4424-1, 4424-2, 4424-3 [3, 4, 5].

El IPC realiza una evaluación y clasificación de los atletas, con el propósito de minimizar el impacto de la discapacidad en los resultados de la competición, de manera que el éxito de un atleta en la competición dependa principalmente del entrenamiento, aptitud física y talento atlético personal. La clasificación es un proceso continuo por el cual todos los atletas están siendo observados regularmente para garantizar consistencia y equidad [6]. En términos generales la clasificación desempeña dos funciones importantes: i) determinar elegibilidad para competir, ii) agrupar atletas por competición.

Un atleta paralímpico adquiere la clasificación "Confirmado" (C), cuando ha sido previamente evaluado por un panel de clasificación internacional y dicho panel determina que su estado de clasificación es válido y no será alterado antes o durante la competición. Particularmente, el presente análisis se centra en atletas con categoría C4, la cual corresponde a atletas con una amputación bajo la rodilla y uso de prótesis.

En la siguiente sección se presenta una descripción del escenario de ciclismo de pista que proporciona el contexto necesario para realizar análisis de fuerzas y proponer un modelo dinámico de la prótesis transtibial. Seguidamente se realiza una breve discusión con base a los resultados preliminares alcanzados y finalmente se resaltan las principales conclusiones y trabajos futuros.

2. Materiales y métodos

El desarrollo del modelo dinámico de una prótesis transtibial está compuesto por las siguientes etapas:

1. Análisis de fuerzas en la biela: De acuerdo a la caracterización del escenario donde se realizará la prueba, se determina un modelo matemático con el fin de hallar la fuerza que debe experimentar un ciclista paralímpico de alto rendimiento.
2. Modelo dinámico de una prótesis transtibial: Al obtener las fuerzas generadas en competencias paralímpicas, se procede a elaborar el diagrama

de cuerpo libre, análisis de fuerzas empleando el método por nodos para hallar las fuerzas de reacción en los puntos de interés, con el fin de obtener un diseño óptimo para una prótesis transtibial que será empleada en competencias paralímpicas de alto rendimiento.

La elaboración de diagramas de cuerpo libre e idealización estructural de los componentes empleados para el desarrollo del modelo dinámico, fue realizada en el software de diseño CAD SolidWorks 2017. Por último, la solución a las ecuaciones y análisis gráfico se desarrolló con la ayuda de herramientas como MapleSoft13 y Matlab R2015a.

2.1 Escenario ciclismo de pista

El principal escenario donde se disputan competencias de ciclismo de pista se denomina velódromo [7]. Para el modelamiento en competencias de pista se utilizaron las características de diseño del velódromo Olímpico de Rio, el cual está cubierto y tiene una longitud de 250 metros. La superficie es completamente plana, homogénea y no abrasiva. Las curvas tienen entre 22° y 40° de peralte para evitar la salida de los corredores [8]. En la Figura 1 se puede observar las medidas que se emplearon para el estudio y análisis de fuerzas en competencias de ciclismo de pista.

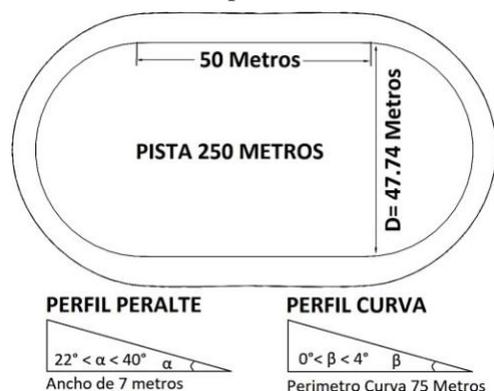


Figura 1. Plano estructural Velódromo Olímpico de Rio

2.2 Bicicleta de pista

También conocida como bicicleta de *sprint*, está diseñada para ser utilizada en carreras de alto rendimiento en escenarios como velódromos. Su diferencia radica en tener un sistema de piñón fijo que hace el frenado proporcional a la presión de pedaleo [9]. Adicionalmente la Unión de Ciclista Internacional UCI reglamenta y estandariza las medidas que debe tener

una bicicleta de pista para ser avalada en una competencia de alto rendimiento [6]. En el desarrollo del modelo dinámico de la prótesis transtibial, se utilizó la siguiente bicicleta de pista según el reglamento de la UCI. (Figura 2).

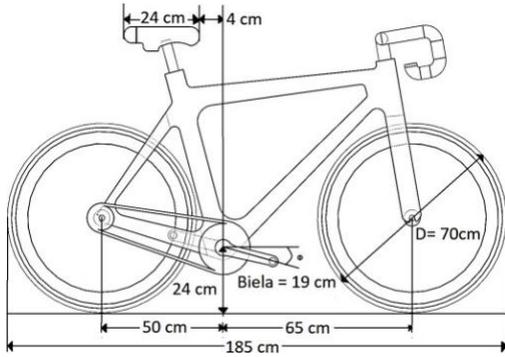


Figura 2. Plano estructural bicicleta de pista

2.3 Prótesis transtibial para ciclista paralímpico

Las prótesis actuales para miembros inferiores son ligeras, cuentan con unidades tobillo/pie. El socket da comodidad al usuario proporcionando mayor estabilidad en la rodilla [10]. Se modeló la geometría de una prótesis transtibial, la cual está dividida en tres áreas: socket, tibia y pie artificiales con sistema de encastre al pedal de la bicicleta. (Figura 3)

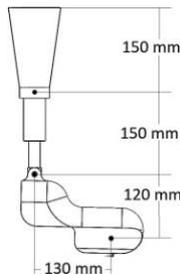


Figura 3. Plano estructural prótesis transtibial

Para poder realizar un modelo apropiado del comportamiento de las fuerzas generadas, se debe tener en cuenta los aspectos estructurales según el tipo de competencia y escenario a emplear. Según las características anteriormente mencionadas del Velódromo Olímpico de Rio se procede a realizar un análisis del comportamiento de los ángulos que experimenta el ciclista al dar una vuelta en el escenario. Se realizó el modelo y análisis de la variación de los ángulos del perfil de curva β y peralte del velódromo α , en la Figura 4 se pueden observar los datos obtenidos.

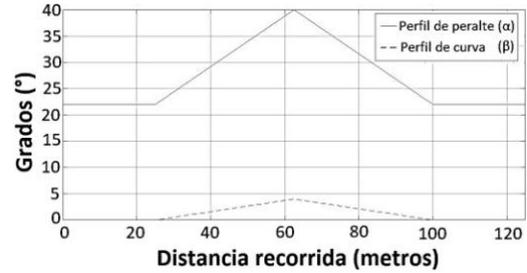


Figura 4. Comportamiento de ángulos en el velódromo

Adicionalmente también se calculó la variación del ángulo de giro de la biela ϕ , determinando el paso de la bicicleta donde D es el diámetro de la rueda. Seguidamente, se halla la distancia que recorre el ciclista con una vuelta de la biela de la bicicleta, considerando el valor de la relación de piñón de la bicicleta es 49:18, utilizada en competencias de pista [11]. De acuerdo a la relación se calcula la distancia recorrida, obteniendo estos valores se puede estimar el comportamiento del ángulo de giro de la biela ϕ , a continuación en la Figura 5, puede observar los datos obtenidos.

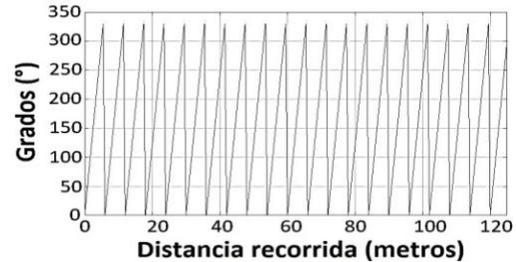


Figura 5. Comportamiento del ángulo de la biela

Seguidamente se realiza el análisis de fuerzas en la biela, para obtener el comportamiento dinámico de la bicicleta de pista se utiliza un sistema de referencia ubicado en su centro de gravedad, el cual sirve para determinar posiciones relativas de los puntos de interés y luego se analiza por el método de potencias virtuales todo el sistema [12].

El modelamiento de una prótesis transtibial en un ciclista paralímpico, es primordial debido a que en competencias se generan fuerzas provocando inestabilidad y falla en la prótesis. Para realizar el modelo se escogen seis puntos, que son los centros de radio de giro de la pierna del ciclista paralímpico. Para el análisis del comportamiento dinámico de la prótesis se utiliza un sistema de referencia el cual sirve para determinar posiciones relativas de los puntos de interés, luego se analiza el eje horizontal X , y el eje vertical Y . Se

implementó el método de nodos, para hallar el comportamiento de las fuerzas de reacción en la prótesis.

3. Resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en el desarrollo del modelo dinámico de una prótesis transtibial para ciclistas paralímpicos, inicialmente se obtuvo el siguiente análisis de fuerzas:

3.1 Análisis de fuerzas en la biela

Para realizar el modelo se escogen dos puntos: en los centros de radio de giro del plato y piñón de la bicicleta de pista. El siguiente esquema paramétrico (Figura 6) de la bicicleta de pista representa un modelo de 6 grados de libertad debido al desplazamiento en $X - Y$ de cada uno de los puntos de referencia, al igual que la contemplación de los ángulos del perfil de curva β , peralte del velódromo α y el ángulo de giro de la biela ϕ .

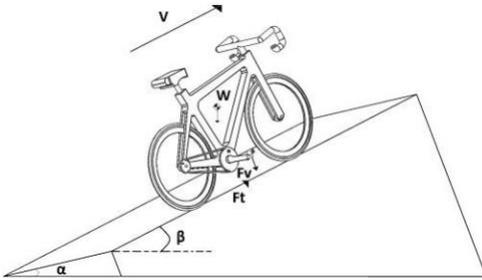


Figura 6. Esquema paramétrico bicicleta de pista

En la Tabla 1 se muestra cada una de las nomenclaturas utilizadas en el sistema:

Tabla 1. Nomenclatura de esquema bicicleta de pista

Nomenclatura	Significado
F_v	Fuerza ejercida sobre la biela
α	Ángulo del perfil peralte velódromo
β	Ángulo del perfil curva velódromo
ϕ	Ángulo de giro biela
V	Velocidad lineal del ciclista
w_r	Velocidad angular del piñón
w_R	Velocidad angular del plato
r	Radio del piñón
R	Radio del plato
D	Diámetro de la rueda bicicleta
l	Longitud biela bicicleta
C_a	Coefficiente de arrastre
C_r	Coefficiente de rodadura
K	Coefficiente perdida potencia cadena

Z_{plato}	Número de dientes del plato
$Z_{piñon}$	Número de dientes del piñón
d_{ejes}	Distancia entre el plato y piñón
P	Paso de la cadena bicicleta
S	Número de dientes activos cadena
D_s	Número de dientes pasivos cadena
δ_{aire}	Densidad del aire
A_{fp}	Área frontal proyectada
P_s	Potencia suministrada por el ciclista
P_w	Potencia necesaria para mover el peso compuesto (ciclista – bicicleta)
P_p	Potencias pasivas
m	Masa compuesta (ciclista – bicicleta)
g	Gravedad

De acuerdo al esquema paramétrico se empleó el método de potencias virtuales [12] para hallar el comportamiento de F_v en las condiciones de competencia de ciclismo de pista:

$$\sum Pot = P_s - P_w - P_p = 0 \quad (1)$$

Donde las potencias pasivas son tres (03):

1. Potencia necesaria para superar el rozamiento de las ruedas con el piso P_r . [13]
2. Potencia necesaria para superar el rozamiento de la cadena de transmisión P_c . [14]
3. Potencia necesaria para superar el rozamiento aerodinámico P_a . [15]

A continuación se muestran las ecuaciones asociadas a potencias (2-6)

$$P_s = F_v \cdot R \cdot w_R \cdot \cos \phi \quad (2)$$

$$P_s = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot D \cdot w_r \cdot \sin \beta \quad (3)$$

$$P_r = m \cdot g \cdot V \cdot C_r \cdot \frac{D}{2} \cdot w_r \quad (4)$$

$$P_c = F_v \cdot l \cdot w_R \cdot (K - 1) \quad (5)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot C_a \cdot \delta_{aire} \cdot A_{fp} \cdot V^3 \quad (6)$$

Relacionando las ecuaciones anteriores se obtiene la ecuación para hallar la fuerza ejercida sobre la biela de la bicicleta de pista:

$$F_v = \frac{\left(\frac{mgDw}{r} \right) (\cos \alpha \cdot \sin \beta) + \frac{v C_r}{2} + \frac{1}{2} C \delta A V^3}{Rw_R \cos \phi - lw_R (K - 1)} \quad (7)$$

La fuerza ejercida sobre la biela de la bicicleta varia acorde a los ángulos del perfil de curva β , peralte del velódromo α y el ángulo de giro de la biela ϕ . Se analiza el comportamiento por medio del software Matlab R2015a, como se puede observar en la Figura 7.

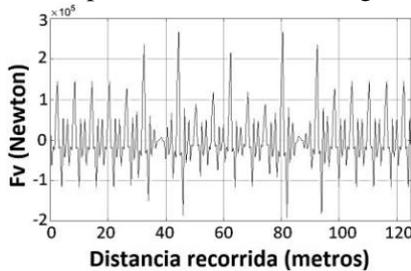


Figura 7. Análisis de la fuerza ejercida sobre la biela

Se puede deducir que el promedio de fuerza que ejerce un ciclista sobre las bielas de una bicicleta de pista en competencia de alto rendimiento es de **1.607,1 N**. Debido a que la bicicleta posee dos bielas o puntos de apoyo, el ciclista paralímpico debe realizar una fuerza en cada biela aproximadamente de **803.6 N**. Una vez se ha determinado la fuerza máxima asociada al movimiento, se prosigue al modelado de la prótesis.

3.2 Modelo dinámico de una prótesis transtibial

El siguiente esquema paramétrico (Figura 8) de la prótesis transtibial representa un modelo de 6 grados de libertad debido al desplazamiento en $X - Y$ de cada uno de los puntos de referencia, al igual que la contemplación de los ángulos de giro de la cadera π , rodilla γ y tobillo λ .

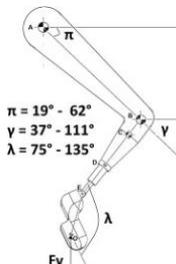


Figura 8. Esquema paramétrico prótesis transtibial

De acuerdo a las características estructurales de la prótesis transtibial y el ciclista, se procede a realizar un análisis del comportamiento cinemático de los ángulos que experimenta el ciclista al dar una vuelta la biela del plato de la bicicleta de pista. Por medio de SolidWorks

2017 y Matlab R2015a se realizó el modelo y análisis de la variación de los ángulos de cadera π , rodilla γ y tobillo de la prótesis λ , a continuación en la Figura 9 se puede observar los datos obtenidos:

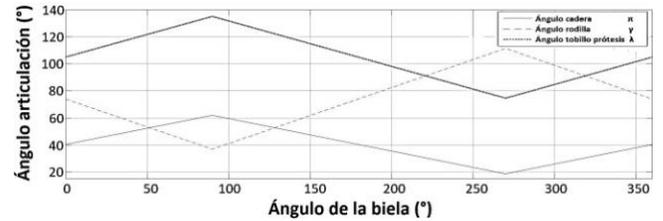


Figura 9. Cinemática de los ángulos del ciclista

En la Tabla 2 se muestra cada una de las nomenclaturas utilizadas en el sistema.

Tabla 2. Nomenclatura de esquema prótesis transtibial

Nomenclatura	Significado
E_y, E_x	Reacción en eje Y-X del tobillo prótesis
D_y, D_x	Reacción eje Y-X de la tibia prótesis
C_y, C_x	Reacción eje Y-X del socket de la prótesis
π	Ángulo de rotación cadera – pierna
γ	Ángulo de rotación rodilla
λ	Ángulo de rotación tobillo prótesis

De acuerdo al esquema paramétrico y el análisis cinemático del ciclista al pedalear, se empleó el método de nodos para resolver sistemas de estructuras [16].

Para hallar el comportamiento de las fuerzas de reacción generadas en la prótesis transtibial, se realizó el análisis en el tobillo de prótesis (nodo E, Figura 8) realizando la sumatoria de fuerzas en los ejes X e Y . Luego se aplicó el mismo análisis en la tibia de la prótesis transtibial (nodo D, Figura 8) y en el *socket* de la prótesis (nodo C, Figura 8), su comportamiento es el mismo debido a que se encuentra paralelo a la tibia y no tiene ningún grado de variación. La fuerza de reacción de cada una de las partes de la prótesis transtibial varía según los ángulos de cadera π , rodilla γ y tobillo de la prótesis λ . Se analiza el comportamiento de cada uno tal como se puede observar en la Figura 10 el nodo E.

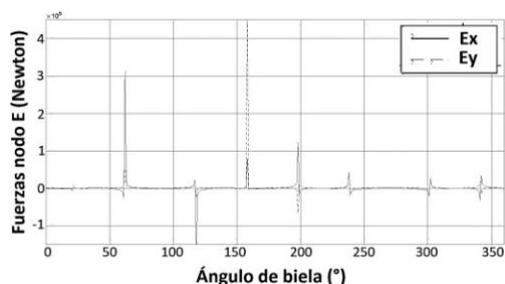


Figura 10. Análisis de fuerzas en el tobillo prótesis

Se puede deducir que el promedio de las fuerzas máximas que experimenta el tobillo de la prótesis en competencias de alto rendimiento es de **933,6 N** en el eje axial y **2.160,5 N** en el eje transversal.

Seguidamente se analiza el comportamiento de los nodos D y C, como se puede observar en la Figura 11.

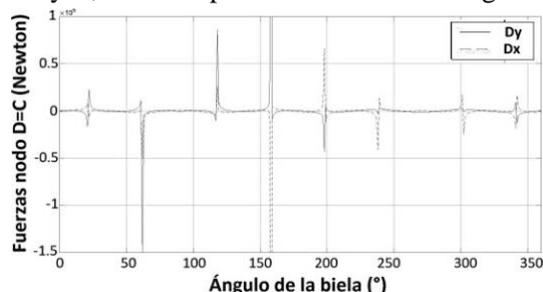


Figura 11. Análisis de fuerzas en la tibia y socket de la prótesis

Por último se calcula el promedio de las fuerzas máximas que experimenta la tibia y el socket de la prótesis transtibial en competencias de alto rendimiento es **3.266 N** en el eje axial y **1.357 N** en el eje transversal.

4. Discusión

El rendimiento en ciclismo depende de varios factores fisiológicos, ligados al entrenamiento y biomecánicos. La influencia de factores biomecánicos como la aerodinámica, las medidas de la bicicleta, longitud de la biela, o los sistemas de pedaleo no circulares en el rendimiento han sido demostrados previamente [17, 18, 19]. Sin embargo, para el mejor conocimiento de los autores, aún no ha sido propuesto un modelo dinámico de fuerzas involucradas en el diseño de prótesis transtibial, que integre al atleta con el contexto deportivo, es decir el tipo de competencia, considerando especificaciones de terreno y cicla.

5. Conclusiones

- Este trabajo desarrolló un modelo dinámico con el fin de analizar fuerzas que experimenta una prótesis transtibial, reduciendo inestabilidad y mejorando la eficiencia del ciclista de alto rendimiento.
- Gracias al modelo matemático expuesto, se puede realizar un diseño óptimo de una prótesis transtibial para ciclistas paralímpicos, teniendo en cuenta la forma del perfil aerodinámico del competidor.
- Este diseño permitirá implementar a los atletas del Ejército Nacional de Colombia herramientas para competir en los juegos paralímpicos del año 2020.

6. Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por la Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova” mediante convocatoria de proyectos institucionales del año 2018.

7. Referencias

- [1] P. D. Howe, «Cyborg and Supercrip: The Paralympics Technology and the (Dis) empowerment of Disabled Athletes,» *British Sociological Association*, vol. 45, n° 5, pp. 868-882, 2011.
- [2] UCI, «Union Cycliste Internationale,» [En línea]. Available: <http://www.uci.ch/>. [Último acceso: 20 04 2018].
- [3] I. Internacional, «NTC 4421-1, Prótesis. Pruebas estructurales de las prótesis de las extremidades inferiores. Parte 1: Configuración de las pruebas,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, 1998.
- [4] I. Internacional, «NTC 4424-2. Prótesis. Pruebas estructurales de las prótesis de las extremidades inferiores. Parte 2: Muestras de prueba,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, 1998.
- [5] I. Internacional, «NTC 4424-3, Prótesis. Pruebas estructurales de las prótesis de las extremidades inferiores. Parte 3: Principales pruebas estructurales,» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, 1998.
- [6] Unión Ciclista Internacional, GENERAL ORGANISATION, Aigle: CYCLING REGULATIONS, 2011, p. 87.
- [7] J. S. F Escrig, «La construcción del velódromo de Dos Hermanas,» *Informes de la Construcción*, Sevilla, 2007.
- [8] «Rio2016,» MARCA, 14 abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.marca.com/juegos-olimpicos/ciclismo-pista/todo-sobre.html>. [Último acceso: 2018 abril 15].
- [9] M. L. Andrew Edwards, *Fixed: Global Fixed-Gear Bike Culture*, L. K. Publishing, Ed., Evanston, Illinois: Ilustrada, 2009, p. 144.
- [10] R. Meyer, «Resultados contemporáneos para la persona con una amputación,» Centro de información nacional sobre la pérdida de extremidades, 1999.
- [11] B. Segura Villar, *Análisis mecánico de un mecanismo de pedaleo oscilante. Diseño 3D de un bicicleta con este mecanismo integrado*, Barcelona, 2013.
- [12] S. C. D. C. C. i Foix, *Teoría de máquinas*, vol. 95, Catalunya: Univ., 2001.

- [13] J. J. A Barbudo, «Regularidad superficial y adherencia en vías ciclistas-recomendaciones de diseño disponibles.»
- [14] J. E. Shigley, Elementos de máquinas, Livros, 2005.
- [15] J. P. J Garcia Lopez, «Valoración biomecánica de la resistencia aerodinámica en ciclistas profesionales: aspectos metodológicos,» Costa Blanca, 2016.
- [16] E. J. E. E. Ferdinand Pierre Beer, Mecánica vectorial para ingenieros, Novena ed., McGraw-Hill, 1990, p. 655.
- [17] V. F.-R. A. O.-A. J. R.-M. J. G.-L. V. Rivero Palomo, «Influencia de la longitud de la biela en la eficiencia y biomecánica del pedaleo submáximo,» Biomecánica, vol. 21, pp. 46-57, 2013.
- [18] A. R. P. G. J. G. L. V. Ferrer-Roca, «Influence of saddle height on lower limb kinematics in well trained cyclists. Static versus dynamic evaluation in bike fitting.,» J Strength Cond Res, vol. 26, pp. 3025-2029, 2012.
- [19] J. R.-M. C. J. J. P. A. M. J. V. J. Garcia Lopez, «Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists,» Journal of Sport Science, vol. 26, pp. 277-286, 2008.