

KINEMATIC MODEL FOR DIRECT ANALYSIS OF HUMAN PROGRESS**MODELO CINEMÁTICO DIRECTO PARA EL ANÁLISIS DE LA MARCHA HUMANA**

**Ing. Andrés Eduardo Gómez Hernández*, MSc. Jhon Faber Archila Díaz*
MSc. Antonio Gan Acosta****

*** Universidad Industrial de Santander**

Grupo de Investigación en Robótica de servicio y Diseño Industrial, GIROD.
Cr. 27 con Calle 9, Ciudad Universitaria Of. 321 DI, Bucaramanga, Santander, Colombia.
Tel. 6344000, Ext.2880, E-mail: maefinfoaegh@gmail.com

**** Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: antoniogan@gmail.com

Abstract: Existing biomechanical models, help to facilitate the selection and implementation of procedures that help establish a diagnosis by specialists in patients who have a disability in human walking. The following paper develops a direct kinematic model to analyze each stage of the march, taking into account each of the anatomical planes of the body, in order to assess the performance of each of the links that make it possible normal movement of a human being.

Keywords: Kinematics, biomechanics, anatomical drawings, march.

Resumen: El conocimiento de modelos biomecánicos existentes, así como la evidencia científica de cada una de las pruebas derivadas de dichas teorías, debe facilitar la selección y aplicación de los procedimientos a establecer en el diagnóstico por parte de los especialistas en pacientes que sufren de alguna discapacidad en la marcha humana. En el siguiente paper se desarrolla un modelo cinemático directo para analizar cada una de las fases de la marcha, tomando en cuenta cada uno de los planos anatómicos del cuerpo, con el fin de apreciar el comportamiento de cada uno de los eslabones que hacen posible el movimiento normal de un ser humano.

Palabras clave: Cinemática, biomecánica, planos anatómicos, marcha.

1. INTRODUCCIÓN

La marcha humana es un sistema de locomoción con una característica exclusiva de la especie, que consiste en el desplazamiento del peso corporal desde un punto a otro de forma bípeda. Consta de una serie de movimientos rítmicos sucesivos y alternantes de las extremidades inferiores, las cuales interactúan con una superficie de desplazamiento.

Uno de los problemas de investigación más importantes en el campo de la ingeniería biomédica es la creación de modelos matemáticos que modelen el cuerpo humano, de tal forma que permita recrear, simular o analizar movimientos concretos, con el fin de conseguir desarrollar nuevas tecnologías como por ejemplo los exoesqueletos, los cuales actualmente están enfocados a la asistencia de personas con algún tipo de limitación.

2. BIOMECÁNICA DE LA MARCHA HUMANA

La biomecánica de la marcha humana describe el comportamiento de los diferentes elementos que conforman un miembro inferior humano en conjunto durante la marcha normal.

2.1 El ciclo de la marcha humana

La locomoción humana normal es una serie de movimientos alternantes, rítmicos, de las extremidades y del tronco que determinan un desplazamiento hacia delante del centro de gravedad [3]. El ciclo de la marcha comienza cuando un pie hace contacto con el suelo y termina con el siguiente contacto del mismo pie, (Fig. 1).

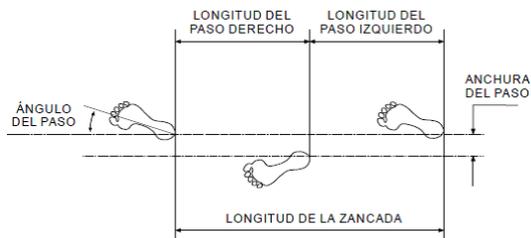


Fig. 1. Parámetros de análisis en la marcha.

El ciclo de la marcha se divide en dos principales componentes: La fase de apoyo y la fase de balanceo. Un miembro inferior está en fase de apoyo cuando está en contacto con el suelo y después está en fase de balanceo cuando no contacta con el suelo. Estas dos fases se van alternando de un miembro a otro durante la marcha. En un paso completo, el apoyo sencillo se refiere al periodo cuando sólo un miembro inferior está en contacto con el suelo. El período de doble apoyo ocurre cuando ambos pies están en contacto con el suelo simultáneamente. La diferencia entre correr y caminar es la ausencia de un período de doble apoyo [3].

La fase de apoyo está dividida en cinco subfases:

- **Fase de contacto inicial (CI):** Constituye la toma de contacto del pie con el suelo.
- **Fase inicial del apoyo (AI):** Transcurre entre el instante de contacto inicial y el despegue del ante pie del miembro colateral, en condiciones normales.
- **Fase media del apoyo (AM):** La finalidad de esta etapa es la progresión del cuerpo sobre el pie estacionario, manteniendo la estabilidad del miembro y del tronco.

- **Fase final del apoyo (AF):** En esta fase el cuerpo sobrepasa el pie de soporte, cayendo hacia adelante.
- **Fase previa a la oscilación (OP):** Es la preparación para la realización de la fase de oscilación por la extremidad que estaba desempeñando el apoyo.

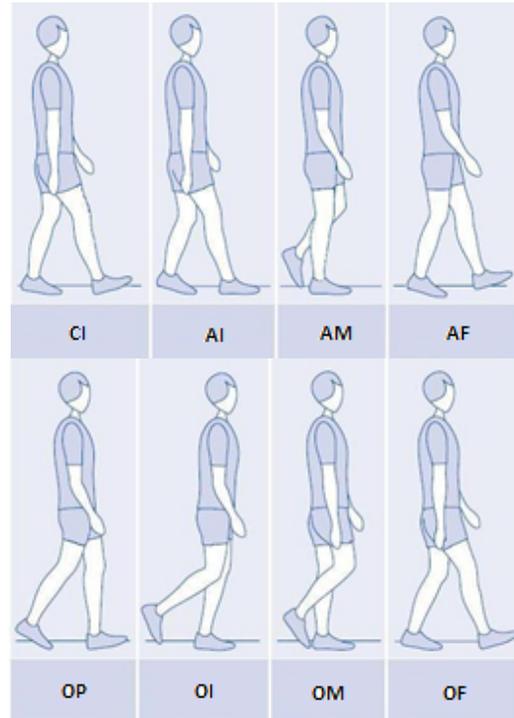


Fig. 2. Marcha Humana a través de un ciclo.

La fase de oscilación está dividida en tres subfases, (Fig. 2, Becker Orthopedic):

- **Fase inicial de la oscilación (OI):** Constituyen sus límites el despegue de la extremidad y el momento en que este alcanza el miembro contralateral.
- **Fase media de la oscilación (OM):** Comienza cuando ambos miembros se cruzan y finaliza cuando la tibia oscilante alcanza una posición vertical.
- **Fase final de la oscilación (OF):** Limitada por el siguiente contacto del miembro con el suelo, que da paso a una nueva zancada [4].

2.2 Modelamiento matemático de una extremidad inferior

El modelamiento de la marcha humana realizado en este artículo, tiene como eje principal a las extremidades inferiores del cuerpo. Se modelaron

asumiendo a cada extremidad como una cadena cinemática de cinco eslabones y cuatro articulaciones unidas por medio de otro eslabón que representa la pelvis. Para el cálculo de las variables involucradas se emplearon datos antropométricos de nuestro entorno nacional. La intención del Modelamiento matemático es recrear los movimientos que se generan en el desarrollo de cada uno de los ciclos de la marcha humana normal en los tres planos (frontal, sagital y transversal), por medio de la herramienta software Matlab®.

3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA MARCHA EN LOS TRES PLANOS

En un robot [2], la cinemática estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. De esta forma, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares. Partiendo de este principio, se analiza la marcha humana normal, resolviendo el problema cinemático directo mediante matrices de transformación homogénea, determinando cuál es la posición y orientación del extremo final de cada una de las extremidades inferiores, con respecto a un sistema de coordenadas tomadas como referencia, el número de articulaciones y las longitudes de cada uno de los eslabones (antropometría de las extremidades inferiores). Este análisis se realiza en cada una de las fases de la marcha normal humana.

En las siguientes figuras se muestra el sistema coordinado de referencia para el modelado cinemático de cada miembro inferior en cada uno de los planos anatómicos (Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5).

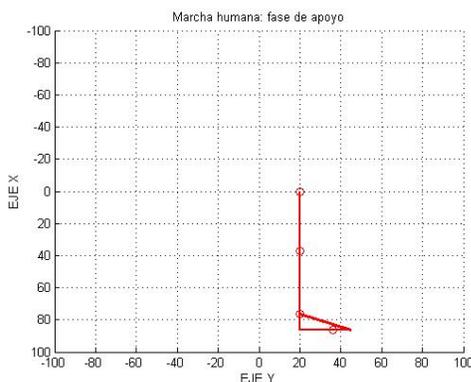


Fig. 3. Plano sagital.

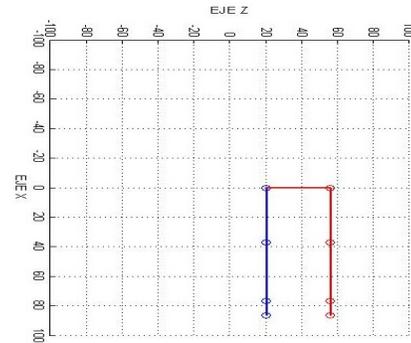


Fig. 4. Plano frontal.

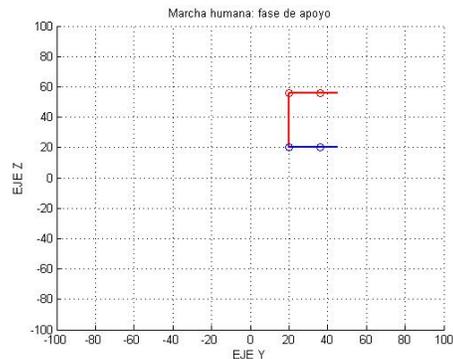


Fig. 5. Plano transversal.

Se puede apreciar que la cadera vista desde un plano sagital es ubicada en el origen de un sistema coordinado X, Y, Z (En donde el eje Z se toma saliendo de la figura). Tomando en cuenta esto, se define la matriz de rotación con respecto al eje Z, la cual será definitiva en cada una de las articulaciones consideradas en el modelo. Las traslaciones se realizarán en el modelo a lo largo del eje X. Teniendo en consideración lo anterior:

$$\text{link0} = T(X_0, Y_0, Z_0) \quad (1)$$

$$\text{link1} = \text{link0}[R(Z_1, f_1) \times T(X_1, d_2)] \quad (2)$$

$$\text{link2} = \text{link1}[R(X_2, f_2)] \quad (3)$$

$$\text{link3} = \text{link2}[R(Z_3, f_3) \times T(X_3, d_3)] \quad (4)$$

$$\text{link4} = \text{link3}[R(Z_4, f_4) \times R(Y_4, b_4) \times T(X_4, d_4)] \quad (5)$$

$$\text{link5} = \text{link4}[R(Z_5, p/2) \times T(X_5, d_5)] \quad (6)$$

$$\text{link6} = \text{link5}[R(Z_6, f_6) \times T(X_6, d_6)] \quad (7)$$

$$\text{link7} = \text{link6}[R(Y_7, b_7) \times R(x_4, a_4) \times T(X_7, 36)] \quad (8)$$

$$\text{link8} = \text{link7}[R(Z_8, f_8) \times T(X_8, d_7)] \quad (9)$$

$$\text{link9} = \text{link8}[R(Z_8, f_8) \times T(X_8, d_8)] \quad (10)$$

$$\text{link10} = \text{link9}[R(Z_9, f_9) \times R(Y_9, b_9) \times T(X_9, d_9)] \quad (11)$$

$$\text{link11} = \text{link10}[R(Z_{10}, p/2) \times T(X_{10}, d_{10})] \quad (12)$$

$$\text{link12} = \text{link11}[R(Z_{11}, f_{11}) \times T(X_{11}, d_{11})] \quad (13)$$

Donde, (1) modela el punto de inicio, representando a la cadera de la pierna derecha. (2) modela los movimientos de flexión y extensión de la cadera. (3) permite al modelo corregir la posición inicial de la pierna, ante una rotación interior o exterior de la pierna, debido a la rotación posterior/anterior de la pelvis. (4) proporciona el movimiento de flexión/extensión que se producen en la rodilla. (5) permite los movimientos en el tobillo de dorsiflexión/flexión plantar, como también los de inversión/eversión. (6) representa el talón. (7) ejecuta los movimientos de dorsiflexión/flexión dorsal que se llevan a cabo en el pie. (8) modela la pelvis y conecta a las dos piernas del modelo. (9) proporciona los movimientos de flexión/extensión de la cadera en la pierna izquierda. (10) emula la flexión/extensión de la rodilla izquierda. (11) desempeña la misma función que (5) pero en la pierna izquierda. (12) representa al talón izquierdo y (13) proporciona el movimiento de dorsiflexión/flexión dorsal del pie izquierdo.

4. RESULTADOS

La aplicación del modelo cinemático para la marcha humana normal, arrojo los siguientes resultados en cada una de las fases, tomando en cuenta los datos del IBV (Instituto de Biomecánica de Valencia) [4].

4.1 Fase de apoyo

4.1.1 Fase inicial del apoyo (AI)

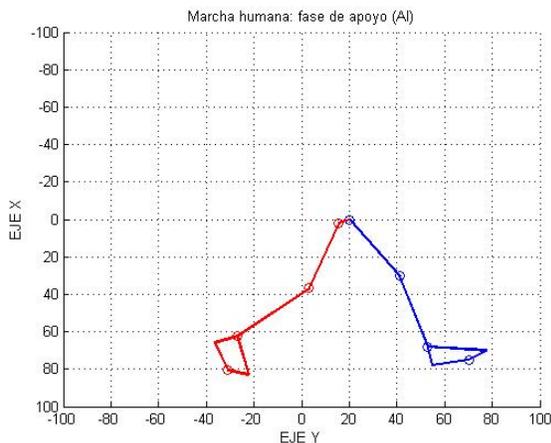


Fig. 6. Plano sagital AI.

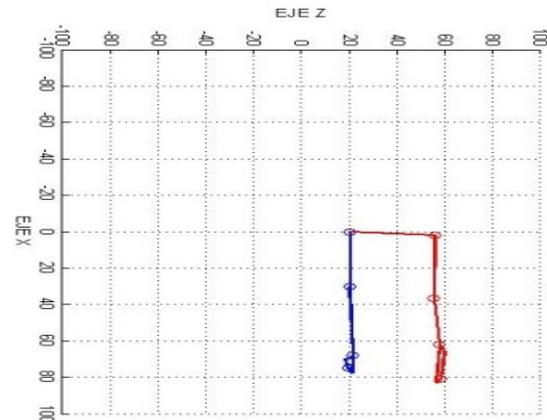


Fig. 7. Plano frontal AI.

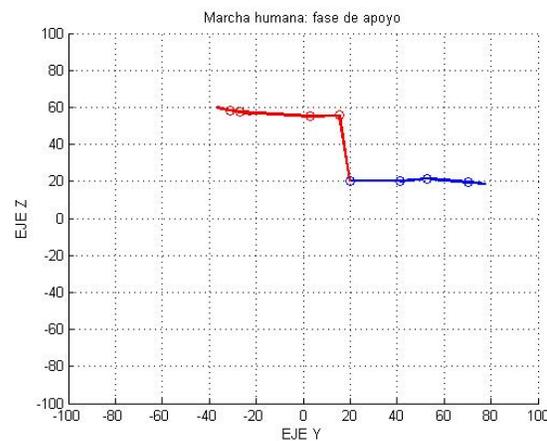


Fig. 8. Plano transversal AI.

4.1.2 Fase media del apoyo (AM)

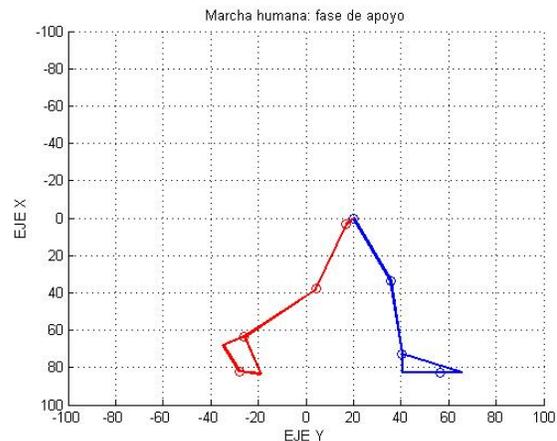


Fig. 9. Plano sagital AM.

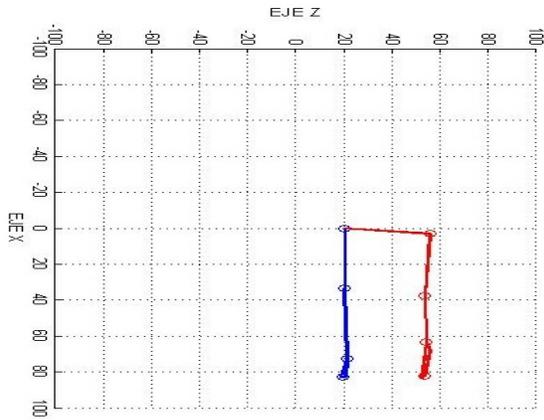


Fig. 10. Plano frontal AM.

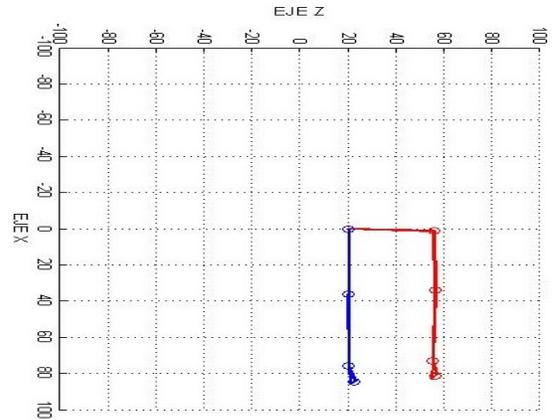


Fig. 13 Plano frontal AF.

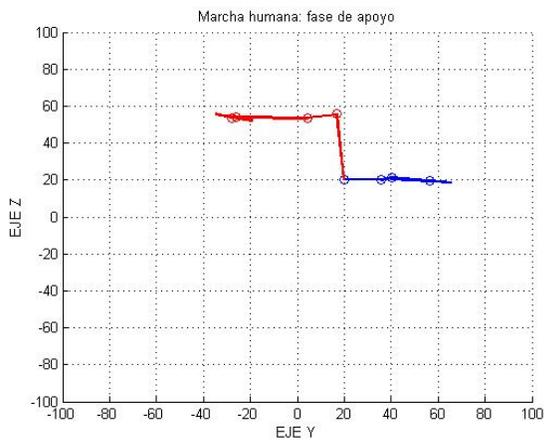


Fig. 11. Plano transversal AM.

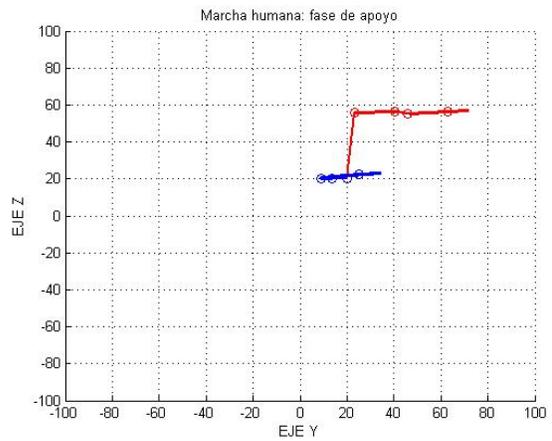


Fig. 14. Plano transversal AF.

4.1.3 Fase final del apoyo (AF)

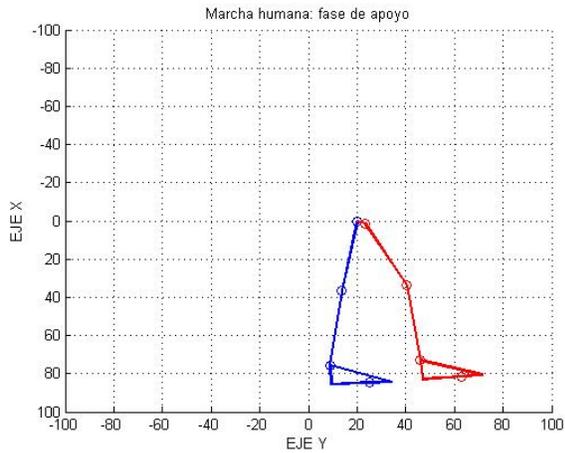


Fig. 12. Plano sagital AF.

4.1.4 Fase previa a la oscilación (OP)

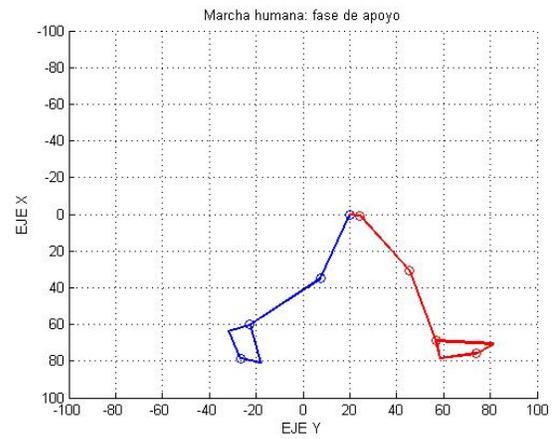


Fig. 15. Plano sagital OP.

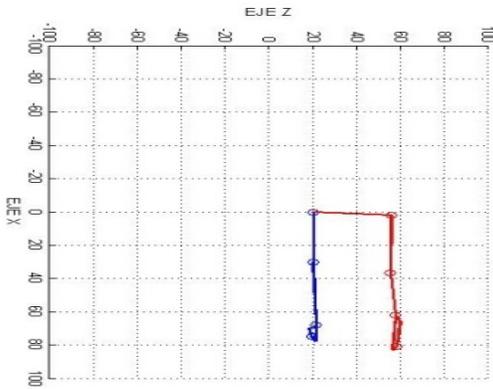


Fig. 16. Plano frontal OP.

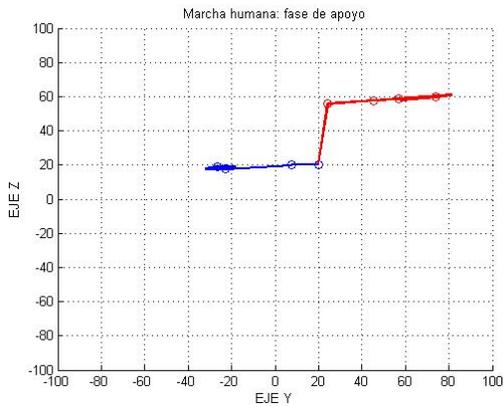


Fig. 17. Plano transversal OP.

4.2 Fase de oscilación

4.2.1 Fase inicial de la oscilación (OI)

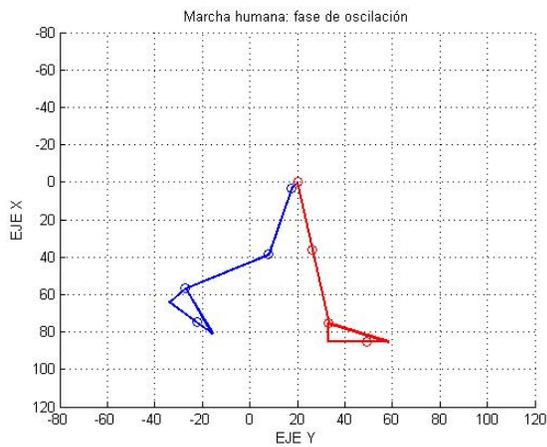


Fig. 18. Plano sagital OI.

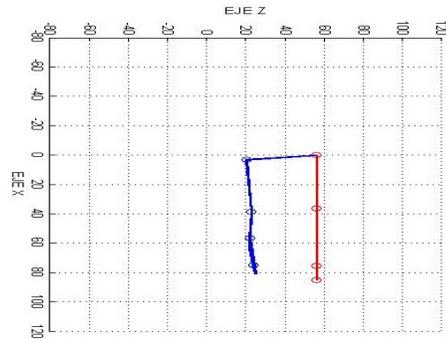


Fig. 19. Plano frontal OI.

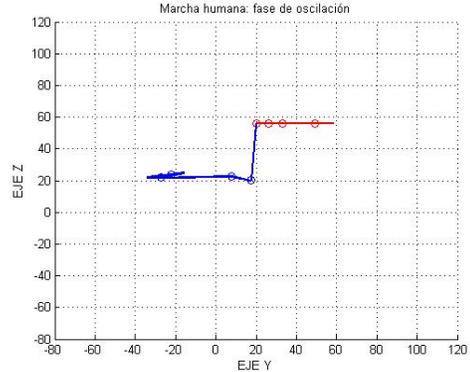


Fig. 20. Plano transversal OI.

4.2.2 Fase media de la oscilación (OM)

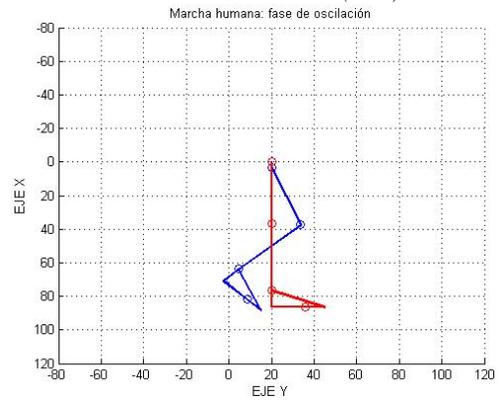


Fig. 21. Plano sagital OM.

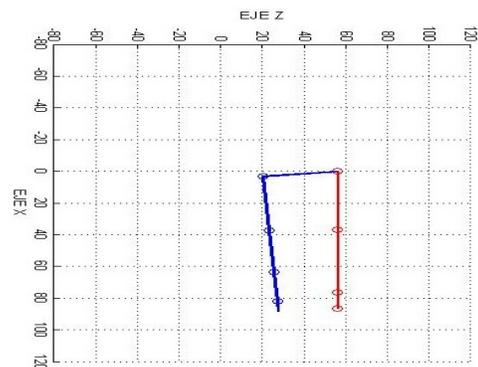


Fig. 22. Plano frontal OM.

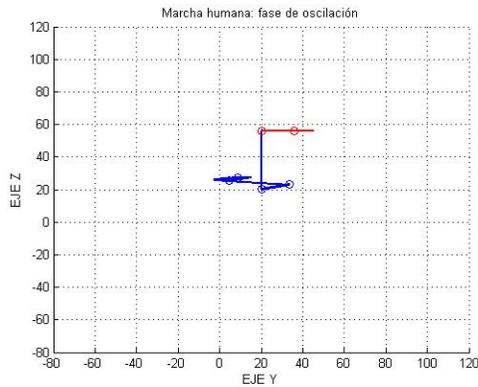


Fig. 23. Plano transversal OM.

4.2.3 Fase final de la oscilación (OF)

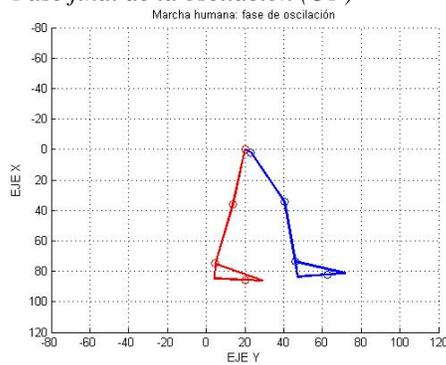


Fig. 24. Plano sagital OF.

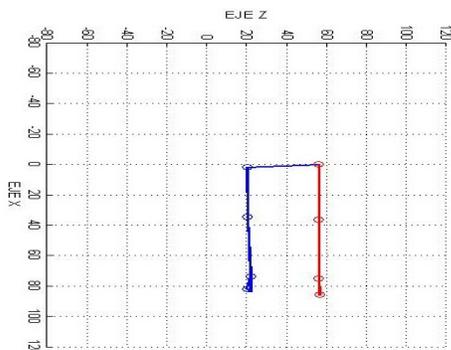


Fig. 25. Plano frontal OF.

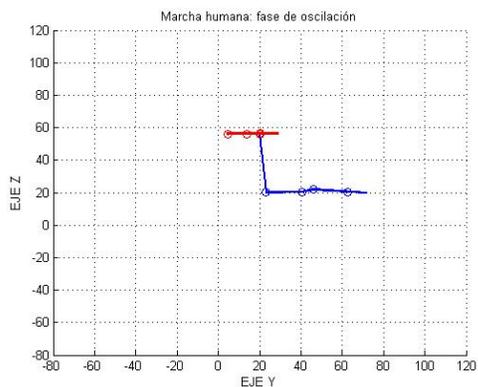


Fig. 26. Plano transversal OF.

5. CONCLUSIONES

El modelamiento cinemático de una extremidad inferior, el cual está implícito en el modelo de la marcha, proporciona información acerca de la relación directa que hay entre la rotación de cada una de las articulaciones, tomando en cuenta que sus movimientos en algunas fases de la marcha humana tienen diferentes sentidos.

El modelo cinemático de la marcha, confronta teóricamente la información proporcionada por podólogos expertos en extremidades inferiores, sugiriendo más flexibilidad en los movimientos.

El movimiento de la pelvis puede ser detallado minuciosamente solo en los planos frontal y transversal, ya que en el plano sagital, en el cual, gran parte de los estudios son realizados, no se aprecia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la VIE de la UIS, por el apoyo y financiación brindado al proyecto titulado “*Estudio del movimiento de una extremidad inferior implementando un modelo computacional, por medio de cinemática robótica, procesamiento de señales y tecnología MEMS*” código 5559, de donde surge el presente artículo de investigación.

REFERENCIAS

- [1]. J. F. Archila y M. FMaradei. Documento Propuesta de investigación convocatoria interna 2009 – 2010, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.
- [2]. A. Barrientos. “*Fundamentos de robótica*”. Ed. McGraw Hill, pp. 15-38, Barcelona, 1997.
- [3]. P. Vera. “*Biomecánica de la marcha humana normal y patológica*”, Instituto de Biomecánica de Valencia. Cap. 3, 1999.
- [4]. J. Sánchez, P. Pastor, *et al.* “*Biomecánica de la marcha humana normal y patológica*” IBV, pp 29-115, Valencia, 2005.