

GRÁFICOS FF y FA: MÉTODO COMPLEMENTARIO DE ANÁLISIS CINÉTICO

FF AND FA GRAPHICS: COMPLEMENTARY METHOD OF KINETIC ANALYSIS

J.C. Muñoz^{1,2}, M. Vales Flores¹, R. Cassibba², G. Represas^{1,3}

¹ Instituto de Ciencias de la Rehabilitación y el Movimiento
Universidad Nacional de San Martín (UNSAM)

² Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF)

³ Centro Nacional de Alto Rendimiento Deportivo (CeNARD)
Email: profjcm@hotmail.com

Recibido: 13/12/12; Aceptado: 29/07/13

El campo de la Biomecánica es relativamente nuevo y se encuentra actualmente en gran expansión, tanto en sus desarrollos teóricos como también metodológicos, experimentales y aplicativos. Dentro del marco de esta disciplina, el análisis cinético se ocupa del estudio del movimiento teniendo en cuenta las sollicitaciones mecánicas que lo generan, incluyendo el estudio de fuerzas de reacción terrestre, movimientos de torsión, tensiones en la interfase hueso-articulación-hueso, tensiones musculares y niveles energéticos para lo cual se requiere del conocimiento de las fuerzas actuantes y de un modelo cinético ^[1]. Conocer y evaluar las fuerzas que generan el movimiento permite profundizar en las causas de las alteraciones de la marcha ^[2]. En el análisis cinético - que incluye el estudio de fuerzas de reacción terrestre-, existe una serie de estudios basados en la comprensión de las curvas obtenidas mediante el uso de plataformas de fuerza. En este artículo presentamos un nuevo método de análisis cinético mediante la introducción de los que hemos denominado "gráficos FF" o "gráficos fuerza-fuerza". Finalmente, proponemos también la construcción y el empleo de "gráficos FA" o "gráficos fuerza-ángulo".

Palabras clave: Biomecánica, fuerza de reacción terrestre, gráficos, análisis cinético, novedad.

The field of Biomechanics is relatively new and is currently undergoing major expansion in theoretical developments as well as methodological, and experimental applications. Within the context of this discipline, the kinetic analysis is the study of motion considering the mechanical stresses that generate, including the study of ground reaction forces, torsion movements, tension in the bone-joint-bone, tensions muscular and energy levels, for which it requires knowledge of the forces acting and a kinetic model ^[1]. Identify and evaluate the forces that generate movement allow us to know into the causes of abnormal gait ^[2]. The kinetic analysis - that includes the study of Ground Reaction Forces- uses a number of studies based on the understanding of the curves obtained using force platforms. In this paper we present a new method of kinetic analysis by introducing what we have called "FF graphics" or "force-force graphics". Finally, we also propose the construction and use of "FA graphics" or "force-angle" graphics.

Keywords: Biomechanics, ground reaction force, graphics, kinetic analysis, novelty.

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre marcha humana, sea esta normal, patológica, protésica, con ortesis o con asistencias técnicas, se pueden clasificar básicamente en fisiológicos, anatómico-funcionales, cinemáticos, cinéticos y mioeléctricos. En los primeros se considera, entre otros aspectos, la influencia de la actividad neurológica sobre la marcha. En los segundos, las propiedades mecánicas de las estructuras musculoesqueléticas y los grados de libertad involucrados en los movimientos. En los estudios provenientes de señales mioeléctricas se analiza la actividad muscular en contracciones musculares concéntricas, excéntricas e isométricas. En los cinemáticos

se analiza el comportamiento de variables relacionadas con el movimiento, como la posición, la velocidad lineal o angular y la aceleración. Finalmente, en los cinéticos se considera el comportamiento de las fuerzas, la presión, la energía, la potencia, el impulso y el torque. Para llevar adelante los estudios completos se colectan datos mediante la utilización de dispositivos apropiados (electrogoniómetros, baropodómetros, plataformas de fuerza, electromiógrafos, etc.) según corresponda. Estos datos se representan gráficamente y se los compara con patrones construidos estadísticamente.

Bajo estas consideraciones, nuestro propósito es ampliar la variedad de análisis posibles, mediante la introducción

de dos tipos de gráficos no considerados hasta el momento en las evaluaciones biomecánicas.

OBJETIVOS

1. Establecer un método complementario de análisis cinético de la marcha humana, mediante la construcción y análisis de gráficos que relacionen las distintas componentes de las fuerzas involucradas –en nuestro caso la Fuerza de Reacción Terrestre- así como también las fuerzas -o sus componentes- con los ángulos de movimiento articular.
2. Delimitar posibles alcances y limitaciones del análisis que puede realizarse mediante la utilización de los gráficos propuestos.
- 3- Comparar el tipo de resultados obtenidos con los que se obtienen a partir de los diagramas de Pedotti [3].

FUERZA DE REACCIÓN TERRESTRE

Durante la marcha humana, el suelo ejerce presión sobre la planta del pie. El resultado de la distribución de presiones en el pie -en un instante determinado del apoyos una fuerza que se encontrará aplicada en el centro de presiones [4]. Esta fuerza, denominada fuerza de reacción terrestre (FRT) puede representarse mediante un vector en el espacio tridimensional, cuyas componentes indican el valor de la fuerza en las direcciones vertical, anteroposterior y mediolateral, pudiendo ser medidas experimentalmente mediante el empleo de una plataforma de fuerzas (Figura 1).

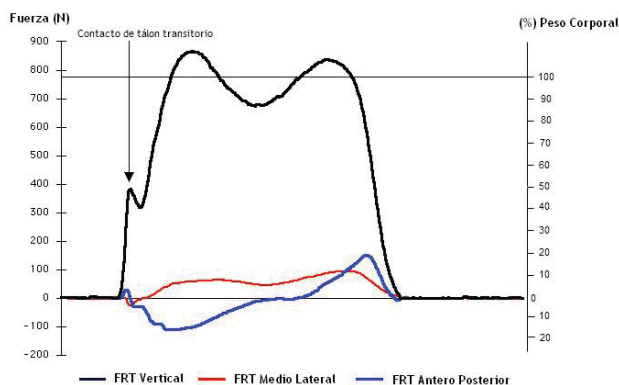


Fig 1: Componentes de la fuerza de reacción terrestre durante la marcha humana normal [5]

Durante la marcha normal, la componente vertical del vector FRT es la que alcanza la mayor intensidad, presentando una curva característica semejante a una letra W invertida. Actualmente, el estudio cinético de la FRT durante la marcha considera por separado las tres componentes del vector fuerza, graficándose independientemente cada una de ellas en función del tiempo. De esta manera se pierde la posibilidad de “ver” simultáneamente de qué forma varían entre sí las componentes de la FRT cuando lo hace dicha fuerza y, a

la vez, de identificar regularidades en la variación relativa entre las mismas que podrían ser útiles para, por ejemplo, analizar patrones de compensación.

Es por ello que, ante la ausencia de gráficos que permitan el estudio de patrones relativos entre componentes de la fuerza, hemos considerado necesario y conveniente la introducción de los gráficos fuerza-fuerza o gráficos FF, tal como los hemos denominado. Si bien es posible encontrar casos en Física donde se utilizan gráficos que relacionan dos fuerzas, por ejemplo la fuerza de rozamiento en función de la fuerza aplicada, esta idea no ha sido aún aprovechada en Biomecánica. En este sentido, nuestra propuesta es novedosa en dos aspectos: la aplicación en el campo de la Biomecánica, y también su utilización para la comparación de componentes de una misma fuerza.

Los gráficos FF consisten básicamente en la representación simultánea de una componente del vector fuerza con respecto a otra u otras siendo que, particularmente, nuestro interés está puesto en la FRT. Las curvas representadas en este “espacio de fuerzas” muestran el comportamiento relativo de una componente de la FRT con respecto a otra durante la fase de apoyo, equivalente aproximadamente al 62% CM (ciclo de marcha) en el caso de normalidad.

Si bien es cierto que ya existe una representación de las componentes de la FRT mediante los denominados “diagramas de Pedotti” o más conocidos como “diagramas mariposa” [6], estos tienen por finalidad mostrar el vector correspondiente a la FRT pero no la curva de fuerzas por él trazada (Figura 2), pudiéndose distinguir solamente el límite más exterior de la curva, “tapando” u ocultando el comportamiento real de las fuerzas.

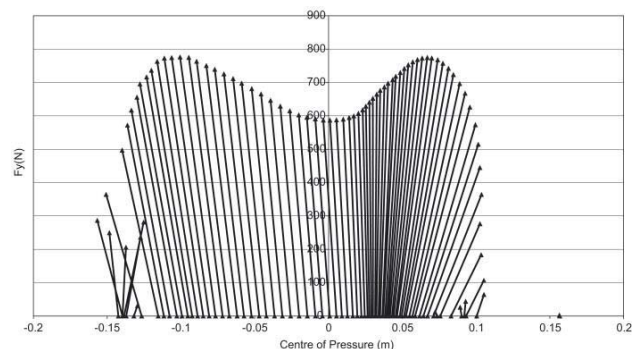


Fig 2: Diagrama mariposa en marcha normal [7]

GRÁFICOS FF

El estudio que proponemos a partir de los gráficos FF consiste en focalizar el análisis de las curvas trazadas con la intención de determinar cuáles son los patrones relativos de fuerzas para poder comparar, por ejemplo, la marcha normal con la marcha protésica. “Flechitas” auxiliares son útiles para indicar el sentido de la fuerza a lo largo del movimiento.

La figura 3 corresponde a la marcha normal de una persona a cadencia libre durante su marcha normal. Los datos se obtuvieron del Departamento de Kinesiología de la Universidad de Texas en Arlington. En el gráfico se representa la FRTz (vertical) en función de la componente antero-posterior (FRTx), lo que clínicamente equivale a un análisis de la fuerza de reacción terrestre en plano sagital.

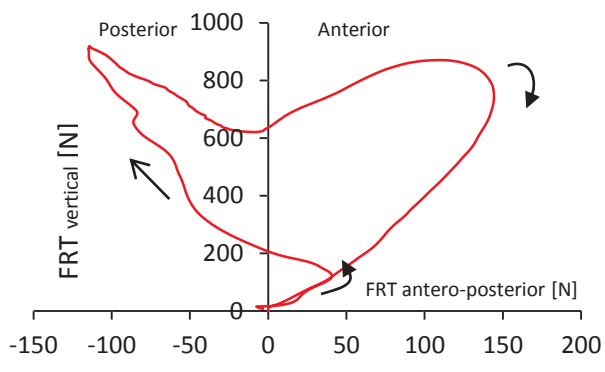


Fig. 3: Gráfico FF en marcha normal

A la derecha del eje de ordenadas, la FRT tiene dirección anterior y en la región izquierda la dirección es posterior. En los primeros instantes del apoyo inicial se puede observar un aumento progresivo de la fuerza en sentido anterior (hacia la derecha). Al llegar a un valor horizontal cercano a los 50 N – cuando simultáneamente la fuerza vertical supera ligeramente los 100 N-, la curva cambia de dirección. Mientras que la componente vertical sigue creciendo, la componente con dirección anterior decrece hasta hacerse cero en la intersección de la curva con el eje vertical. Luego, el gráfico se continúa en la región izquierda, alcanzando un pico, que se corresponde con el máximo de frenado. Desde allí, la fuerza disminuye su intensidad vertical mientras que se vuelve progresivamente más paralela a esta dirección. En este gráfico puede notarse claramente que la componente vertical alcanza su mínimo valor cuando la FRT es levemente posterior, y no cuando esta es perfectamente vertical, lo cual no es tan claro en un gráfico por componentes o en un diagrama mariposa. Posteriormente, la curva se desarrolla hacia la derecha alcanzando un nuevo máximo, correspondiente a la impulsión, para luego disminuir hasta hacerse cero en el despegue completo del pie.

La utilización de estas representaciones, sin embargo, no se reduce solamente a situaciones consideradas dentro de los parámetros actuales de normalidad, sino que su mayor aporte radicaría en la posibilidad de aplicarlo a casos muy diversos. La figura 4, por ejemplo, representa la FRT actuante sobre un varón amputado transfemoral, en su marcha con rodilla protésica de eje simple y con asistencia a la impulsión. La evaluación fue realizada en el Laboratorio de Biomecánica del CeNARD, Argentina, donde se dispone de una plataforma de fuerzas para tal

fin. En este caso, es posible apreciar una marcada diferencia en la región superior del gráfico, con respecto al caso de normalidad. La presencia de un máximo en la zona central se opone a lo que habitualmente se conoce como levitación de la marcha normal. Destaca la oscilación en la dirección de progresión, encontrándose un doble cambio de sentido anteroposterior de la FRT, contrariamente al caso de normalidad en el que dicha fuerza sólo cambia una vez de atrás hacia adelante. Además, el leve máximo en la región anterior de la curva marca claramente la casi ausencia de impulsión del miembro inferior protésico, resultado acorde con el hecho de que el paciente utilizaba un pie protésico no acumulador de energía elástica.

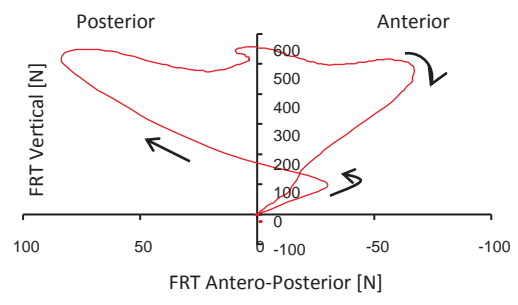


Fig. 4: Gráfico FF en marcha con prótesis sobre-rodilla

Los gráficos FF pueden ser aplicados a gran cantidad de casos y situaciones que van más allá del análisis de la marcha humana, como podrían ser los saltos, la carrera, la rehabilitación, el entrenamiento deportivo, la investigación y la enseñanza, entre otros.

Alcances y limitaciones de los gráficos FF: Comparación con los diagramas de Pedotti

Ciertamente, los diagramas mariposa de Pedotti son muy valiosos y brindan un gran aporte a la Biomecánica. Entre sus virtudes podemos mencionar las siguientes:

- Permiten “ver”, mediante inspección directa, la dirección y sentido del vector FRT en momentos específicos de la fase de apoyo del pie. Si bien es cierto los gráficos FF también entregan la misma información, la forma “visual” de los diagramas mariposa es en este sentido más eficiente.
- Permiten comparar cualitativamente la magnitud relativa de la FRT a partir de la longitud de los vectores.
- Cuando los vectores se superponen con la imagen real del pie durante su desplazamiento, es posible visualizar si la FRT pasa por detrás, por delante o sobre la articulación en cada momento específico del movimiento.
- Consecuentemente, permiten establecer rápidamente –y por observación directa- si el torque producido por la FRT es flexor o extensor de la articulación en cuestión. Estos dos últimos aspectos no son abordados por los diagramas FF, limitando el alcance aplicativo de estos.

Por otro lado, los diagramas de Pedotti también presentan algunos inconvenientes que, al mismo tiempo, dejan

relucir algunas de las ventajas que brindan los gráficos FF:

- Si bien en ambos tipos de gráficos es posible identificar y analizar puntos característicos, es más fácil su detección si los vectores no están presentes. En general, la superposición de líneas (vectores) de los diagramas mariposa no permite identificar claramente la evolución temporal de la FRT, especialmente cuando experimenta múltiples cambios de dirección. Para evitar este inconveniente, muchas veces se recurre a la utilización de videos, de tal forma de poder seguir los cambios de la FRT. Sin embargo no es posible lograrlo satisfactoriamente si se utilizan imágenes bidimensionales estáticas, como en el caso de libros, textos e informes, en cuyo caso los gráficos FF se muestran más efectivos.
- Como consecuencia, muchas veces se confunde la curva envolvente (exterior) de los gráficos mariposa con la curva que describe los valores de las componentes de la fuerza a lo largo del movimiento (curva FF).
- Para clarificar la imagen, los diagramas mariposa presentan los vectores discretizados, espaciados entre sí. Esto se consigue tomando tiempos mucho mayores a los requeridos para trazar la curva FF, lo cual puede hacer perder de vista aspectos que podrían resultar importantes para un análisis posterior, tal como hemos mostrado en el caso de la no verticalidad del vector FRT cuando la componente FRTz alcanza su mínimo valor (en plano sagital).

La construcción de gráficos FF no debe considerarse exclusivamente en términos de la FRT, sino que el alcance puede ser ampliado a todos los casos donde intervienen fuerzas, como por ejemplo las fuerzas musculares y las fuerzas articulares. Asimismo, podría ser provechoso agregar un segundo eje paralelo al de abscisas indicando los instantes y fases del ciclo de marcha que se corresponden con los diferentes valores de fuerzas presentes en el gráfico. Además, con el fin de estudios comparativos, podría ser valioso normalizar los valores de fuerza, por ejemplo con respecto al peso corporal; y de esta manera buscar determinar si existen patrones que sean independientes del peso de las personas.

Finalmente, consideramos importante señalar una diferencia entre las curvas fuerza-tiempo y las curvas fuerza-fuerza. Mientras que las primeras se comportan matemáticamente como funciones; en general, las segundas pueden no serlo. Contrariamente a lo que sucede con las gráficas FT, a cada elemento del dominio de las gráficas FF puede corresponderle más de un elemento en el codominio, tal como en los ejemplos mostrados anteriormente, en los que se observa que la curva “corta” al eje de ordenadas más de una vez.

GRÁFICOS FA

Otros gráficos que también proponemos son los Fuerza-Ángulo (FA). Mediante su aplicación es posible conocer los valores de las componentes de la FRT en función de los ángulos articulares para las diferentes articulaciones. Los gráficos FA presentan, además, la novedad de relacionar la cinética con la cinemática angular, al

unificar en el mismo espacio gráfico fuerza con posición angular. Como ejemplificación, en la figura 5, el eje de abscisas indica el ángulo de rotación del tobillo en la marcha normal y el eje de ordenadas el valor de la FRTz. Los datos corresponden a una persona que ha sido filmada caminando sobre una plataforma de fuerzas en el Laboratorio del CeNARD. La región a la izquierda de este eje vertical representa la flexión plantar mientras que la derecha la flexión dorsal. En el apoyo inicial, la componente de la fuerza de reacción terrestre aumenta rápidamente mientras el pie realiza un movimiento en dirección plantar. A poco de iniciado el movimiento, se observa que la fuerza disminuye, evidenciando el breve “contacto transitorio de talón” y vuelve a aumentar a medida que el tobillo comienza un movimiento de flexión dorsal, aunque la posición articular instantánea (la foto instantánea) sea de plantiflexión. Una vez cruzado el eje de ordenadas, continua el movimiento de flexión dorsal – ahora en posición articular también dorsal.- pero con una disminución de la fuerza vertical. Una vez alcanzado el último máximo de FRTz, que empíricamente se observa coincidir temporalmente con la máxima flexión dorsal, el tobillo vuelve a posición neutra y de allí a flexión plantar con FRTz cero al tocar el eje de abscisas, indicando que se produce el despegue de los dedos del suelo y el inicio de la fase de oscilación del miembro inferior en cuestión. Es interesante observar que la máxima flexión plantar se produce en un tiempo posterior al despegue, y no simultáneamente. La forma horizontal del resto de la curva indica que el pie no está en contacto con la superficie de apoyo (fuerza cero) y que se produce un movimiento de retorno neto del pie a la posición neutra, para luego comenzar un nuevo ciclo. Hay que aclarar, sin embargo, que este retorno final puede presentar –y de hecho es así– cambios de dirección del movimiento rotacional del tobillo, que no pueden identificarse a partir del gráfico al ser constante el valor de la fuerza (cero en este caso) . De todas maneras, este último tramo no presenta ningún interés especial y, en todo caso, el movimiento puede ser analizado mediante los gráficos correspondientes a la cinemática articular, tal como usualmente se procede.

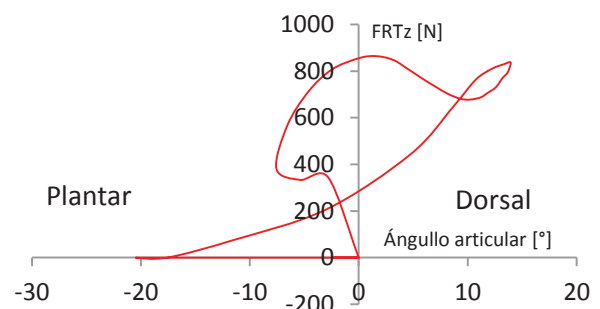


Fig. 5: FRT vertical vs. Ángulo de dorsiflexión de tobillo

POSIBILIDADES A FUTURO

Como hemos señalado, en algunos casos, el análisis de diagramas FF puede resultar más productivo que el análisis de los diagramas de Pedotti, aunque en otros éste

último siga presentando ventajas. Básicamente, ambas representaciones difieren en su origen y su intencionalidad. Los diagramas mariposa tienen por objetivo principal “mostrar” los vectores FRT, mientras que los diagramas FF se interesan primordialmente en la curva trazada a partir de las componentes de la fuerza. Por ello consideramos que no es apropiado ponderar un método de análisis sobre otro, en tanto que cada uno es importante en lo que se propone obtener. Ambos han de ser considerados como complementarios, según sea el propósito perseguido.

Entendiendo que la búsqueda de regularidades en el movimiento humano es una tarea propia de la Biomecánica, la existencia de patrones en las componentes de las fuerzas -a través del tiempo- indica que también han de existir patrones para su comportamiento relativo entre componentes, pudiendo identificárselos claramente en los gráficos FF.

De forma similar, la regularidad existente en la cinemática angular para cada articulación -con respecto al tiempo- garantiza que también existen patrones que involucran la combinación de variables cinemáticas y cinéticas que podrán ser identificados mediante los gráficos FA. Ciertamente, estos patrones podrán ser de valiosa ayuda para la comprensión de desviaciones de la normalidad, para el mejoramiento del rendimiento deportivo y para la investigación, entre otras posibilidades. Dejamos abierto el camino a futuras investigaciones para el reconocimiento y análisis de patrones FF y FA en diferentes campos de esta disciplina. Dado que la diversidad de situaciones es muy amplia, la posibilidad para que otros investigadores generen nuevo conocimiento es también muy grande y promisoria.

Referencias

- [1] Harris, G.F. and J.J. Wertsch. “Procedures of gait analysis”. *Arch Phys Med Rehabil.* 75:216-225 (1994).
- [2] Winter, D.A. “Concerning the scientific basis for the diagnosis of pathological gait and for rehabilitatin protocols”. *Physiotherapy Canada.* 37(4):245-252 (1985).
- [3] Pedotti, A. “Simple Equipment Used in Clinical Practice for Evaluation of Locomotion”. *IEEE Trans. Biomed. Engng,* BME-24(5):456-461, 1977.
- [4] DeLisa, J. *Gait Analysis in the Science of Rehabilitation.* Department of Veterans Affairs. p.57. Baltimore (1998).
- [5] Muñoz, J.C., F. Montané., M. Vales Flores., R. Cassibba., R. Corrao., G. Represas. (2011). “La fuerza de reacción terrestre durante la marcha normal y protésica. Parte 1”. *Orthopädie-Technik,* Edición española. I. pp. 11-14. OT Medien GMBH. Dortmund. (2011).
- [6] Boccardi, S., G. Chiesa, and A. Pedotti. “New Procedure for Evaluation of Normal and Abnormal Gait”. *Amer J. Phys. Med,* 56(4) .163-182. (1977).
- [7] Srinivas B. and S. Kambhampati. “Constructing a Pedotti diagram using excel charts”. *Journal of Biomechanics.* 40 (16): 3748–3750 (2007).