



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

Ponencia 3: Evaluación de logros funcionales mediante análisis biomecánicos.

Ángel Manuel Gil Agudo

Jefe de Sección del Servicio de Rehabilitación. Unidad de Investigación Biomecánica y Ayudas Técnicas. Hospital Nacional de Parapléjicos. Toledo.

APLICACIONES CLÍNICAS DEL ANÁLISIS BIOMECÁNICO A LA LESIÓN MEDULAR

1. DEFINICIÓN DE BIOMECÁNICA
2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS BIOMECÁNICO
3. LIMITACIONES EN EL ÁMBITO CLÍNICO
4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIDAD DE BIOMECÁNICA Y AYUDAS TÉCNICAS DEL HNP
5. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Dr. Angel Manuel Gil Agudo. Jefe de Sección Sº Rehabilitación y Responsable de la Unidad de Biomecánica y Ayudas Técnicas Hospital Nacional de Parapléjicos de Toledo.



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

1. DEFINICIÓN DE BIOMECÁNICA

Una de las definiciones más aceptadas sobre Biomecánica es “ciencia interdisciplinar que, con el apoyo de otras ciencias biomédicas, utiliza los conocimientos de la mecánica y distintas tecnologías para estudiar el comportamiento del cuerpo humano y resolver los problemas derivados de las diversas condiciones a las que puede verse sometido” En esta definición han de subrayarse algunas ideas:

- Que a la Biomecánica le compete el estudio de todos los fenómenos biológicos y, por una evidente e interesada cuestión de antropocentrismo, del cuerpo humano en especial.
- Que la Mecánica, con un amplio apoyo tecnológico, posee métodos propios, más o menos peculiares, que pueden aplicarse al estudio de los seres vivos.
- Que la Biomecánica se ha desarrollado porque aporta un enfoque útil en el estudio y soluciona los problemas que afectan al hombre. De lo contrario, probablemente no estaríamos ocupándonos de ella con tanto interés.

2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS BIOMECÁNICO

Además de constituirse en una disciplina de conocimiento ha generado su propia instrumentación que permite el análisis global desde un punto de vista biomecánico del ser humano. Las técnicas más habitualmente empleadas son las que se citan a continuación:

Técnicas de Análisis Visual

Se trata del grupo de técnicas más elementales pero a la vez insustituibles. El proceso de análisis visual se efectúa de forma más adecuada en dos etapas. En primer lugar, una observación global de la acción a analizar y, posteriormente, una secuencia anatómica, con la intención de ordenar los múltiples acontecimientos que ocurren en los diferentes segmentos corporales.



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

Para obtener estos parámetros se utilizan técnicas sencillas:

- *Cronómetro y Cinta métrica*: Para la obtención de los parámetros generales descriptivos.
- *Interruptores plantares*: Son dispositivos que permiten detectar cuándo hace contacto con el suelo u otra superficie la zona en la que están instalados.
- *Pasillo instrumentado*: Es un equipo que permite medir los tiempos de contacto y la posición de los pies.
- *Pasillo de espejos*
- *Vídeo*

Técnicas de análisis cinemático

Las técnicas de análisis cinemático estudian las características del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que lo generan, es decir, se emplean para describir la posición, velocidad, aceleración y velocidad angular de los diferentes segmentos corporales.

Los más empleados en nuestros días son los electrogoniómetros, los acelerómetros y los equipos de fotogrametría.

Electrogoniometría

Un electrogoniómetro simple se basa en la utilización de un potenciómetro y un sistema de sujeción mecánica que permita convertir el giro de una articulación en un giro del potenciómetro. De esta forma es posible obtener directamente una señal eléctrica linealmente proporcional al ángulo girado. Según su número de ejes, el goniómetro puede ser uniaxial, biaxial o triaxial.

Puede conectarse directamente con cables a un ordenador, ir asociado a un sistema de registro y almacenamiento, o bien a un equipo de telemetría.

Acelerómetros

Los acelerómetros son captadores, usados frecuentemente en ingeniería mecánica, capaces de traducir una aceleración en una señal eléctrica. En general, su funcionamiento se basa en la inercia de una masa situada sobre un captador de fuerzas, de acuerdo a la segunda ley de Newton ($F=m \cdot a$). Existen acelerómetros capaces de medir en una, dos o tres direcciones. Para el estudio de los movimientos humanos se utilizan acelerómetros piezorresistivos, basados en extensometría, porque



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

tienen un excelente rango de aceleración útil en biomecánica (0 a 100m/s²) y permiten la medida de bajas frecuencias. Pueden ser de peso muy pequeño y tienen gran precisión.

Fotogrametría

La estéreo-fotogrametría permite obtener información espacial a partir de imágenes planas. Inicialmente se ha utilizado con imágenes fotográficas, pero también se utiliza con imágenes cinematográficas o con cualquier otro elemento que nos permita captar la posición de un marcador. Según la tecnología empleada, se distinguen dos tipos de dispositivos. Por un lado, están los dispositivos que utilizan marcadores activos en los que el propio marcador emite una señal que es captada por un sistema de registro y los que emplean marcadores pasivos, en los que el marcador no emite ninguna señal siendo su posición registrada por unas cámaras.

Los sistemas de marcadores activos ofrecen como mayor ventaja el que al no tener que digitalizar la imagen, es decir, el laborioso proceso que consiste en indicar fotograma a fotograma la posición de los marcadores, los resultados aparecen inmediatamente después de efectuar el registro. Los sistemas de marcadores activos más utilizados son Coda-motion ® y Optotrak ® que utilizan unos marcadores que emiten una luz infrarroja que, a su vez, es captada por unas unidades de registro tipo scáner. En los equipos de marcadores pasivos, la necesaria digitalización una vez efectuado el registro, ralentiza el proceso de análisis aunque como ventaja ofrece la posibilidad de modificar la posición de los marcadores después de la adquisición. Ejemplos de estos últimos son Kinescan-IBV ® y Vicon ®. La configuración típica de un sistema de fotogrametría de marcadores pasivos consta de los siguientes elementos: marcadores, sistemas de referencia, focos de alumbrado, cámaras de vídeo, equipo de digitalización, un ordenador y otros accesorios.

Técnicas de análisis cinético

Son aquellas técnicas que estudian y analizan el movimiento atendiendo a las causas que lo generan. Es decir, nos van a informar sobre las fuerzas o presiones que se producen en un movimiento determinado en los 3 planos del espacio. Aunque hasta ahora, este tipo de técnicas se utilizaban fundamentalmente para el estudio de la



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

marcha (plantillas instrumentadas, plataformas dinamométricas), recientemente y, sobre todo, en el campo de la lesión medular, se están introduciendo con éxito nuevos dispositivos que se emplean, bien para determinar las presiones detectadas en los asientos o bien para determinar las fuerzas ejecutadas en la propulsión de la silla de ruedas. A continuación, se describen las técnicas cinéticas más habituales con su indicaciones más relevantes.

Plataformas dinamométricas

Una plataforma dinamométrica es un instrumento electrónico que permite la medida y el análisis de la fuerza de reacción que un individuo ejerce sobre el suelo en la ejecución de un movimiento o gesto determinado.

Plantillas instrumentadas

El pie es esencial para la locomoción humana y se adapta constantemente para facilitar un acoplamiento compatible entre el cuerpo y su medio, contribuyendo así a un movimiento efectivo.

Las plantillas instrumentadas permiten la medición de la interacción pie-calzado sin restricciones de espacio, pudiendo el sujeto caminar libremente y obteniendo así un seguimiento de la evolución de su marcha, imposible de lograr con plataformas de fuerza o podómetros fijados al suelo. Resulta de gran interés, entre otras cuestiones, para la prescripción de ortesis de pie, aunque de escasa utilización en pacientes con lesión medular.

Sistema de registro presiones superficie de apoyo

Permite detectar los parámetros de presión en superficies de apoyo en sedestación y, concretamente, en la interfase entre el usuario y el asiento. Esta información es muy útil para detectar zonas de riesgo de aparición de escaras, para sugerir modificaciones a un cojín determinado o para prescribir el tipo de superficie más adecuado. Los equipos más utilizados son Xsensor®, FSA®, Tekscan®. Una de las tecnologías más empleadas es la de los sensores capacitivos.

Smartwheel®

El SmartWheel® es un sistema de análisis utilizado para investigar la biomecánica de un individuo propulsando una silla de ruedas. El sistema fue desarrollado para detectar



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

fuerzas y momentos de fuerza aplicadas al aro de propulsión de la rueda. Además registra, almacena y procesa los datos obtenidos, y despliega la información cinética para analizarla.

El sistema consiste en una rueda modificada con tres barras dirigidas hacia el centro del aro de propulsión. Cada barra está instrumentada con dos juegos de galgas extensiométricas sensibles a movimientos perpendiculares a los soportes que las sostienen. La fuerza que actúa en el aro de propulsión y el momento que ésta genera sobre el centro es correlacionada con las señales de las seis galgas extensiométricas, mediante un complejo modelo matemático.

Técnicas complementarias

Para completar el análisis biomecánico existen dos tipos de técnicas de gran interés. Una de ellas es la antropometría que se define como una rama de la antropología que estudia las medidas del cuerpo humano. La mayor parte de los datos ofrecidos por cualquiera de los dispositivos citados anteriormente está en relación con las dimensiones de la persona analizada. Por eso, antes de nada tenemos que registrar todas las variables antropométricas (peso, talla, longitud de los segmentos corporales, etc). Los dispositivos de medición antropométrica más habituales son: tallímetro, báscula, goniómetro, medidor del pliegue cutáneo, compás para medir distancias (tórax, bitrocantérea), calibre para medir anchura articulaciones.

Otra de las técnicas complementarias de gran utilidad son las de análisis fisiológico. Por medio de ellas, la información puramente mecánica trasciende al ámbito funcional. Tanto el Electromiograma (EMG) como la Espirometría o análisis del consumo metabólico constituyen las técnicas más importantes de análisis fisiológico. El EMG se utiliza como un indicador indirecto de la actividad muscular. La medición del consumo metabólico proporciona una información global acerca de la efectividad del gesto analizado (marcha, propulsión en silla) y es un medio de cuantificar la alteración fisiológica producida como resultado de la lesión medular.



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

3. LIMITACIONES EN EL ÁMBITO CLÍNICO

Ante las enormes expectativas que despiertan este tipo de análisis en determinados foros parece recomendable señalar sus principales limitaciones:

- Heterogeneidad de los equipos: Este es un inconveniente puesto que, en ocasiones, los resultados se presentan de forma distinta según el equipo empleado por lo que resulta difícil comparar los datos de dos centros que no dispongan del mismo dispositivo.
- Ausencia de base de datos de normalidad: Cuando nos ofrecen los resultados de una analítica de sangre, nos presentan los datos del paciente acompañados del correspondiente intervalo de normalidad (ej: glucosa, colesterol, etc). En el caso de los equipos de análisis biomecánico, al tratarse de una disciplina relativamente joven, la mayor parte no disponen de datos de normalidad. Esta cuestión dificulta la inmediata aplicación clínica de los resultados.
- Necesidad de incorporar personal técnico en el equipo clínico: La gran cantidad de datos generados por estos equipos, así como, la necesidad de desarrollar técnicas de modelaje matemático de determinados segmentos del aparato musculoesquelético, como por ejemplo, los distintos elementos que configuran el miembro superior para el caso de la propulsión en silla de ruedas, justifican la necesidad de incorporar personal de perfil técnico (ingeniería) junto a los de perfil clínico.

4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIDAD DE BIOMECÁNICA Y AYUDAS TÉCNICAS DEL HNP

En nuestra Unidad las líneas de investigación que se llevan a cabo son las citadas a continuación:

a) Análisis biomecánico de determinados movimientos como son la marcha en población con patología neurológica y la propulsión en silla de ruedas

El análisis de la marcha humana normal es objeto de numerosas investigaciones.

Nosotros hemos abierto una línea de trabajo para aportar conocimientos y



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

metodología en el estudio de la marcha de pacientes con problemas neurológicos, fundamentalmente en lesiones medulares con posibilidades de realizar una marcha. No obstante, somos conscientes de que la mayor parte de la población con lesión medular es usuaria de silla de ruedas (80%) y, por tanto, hemos desarrollado una línea de investigación más específica en nuestro centro como sería la de analizar con técnicas biomecánicas la propulsión manual de la silla de ruedas. Es una línea mucho más novedosa y en la que trabajan muy pocos centros a escala internacional que tratan a esta población. Se está estudiando la posibilidad de aportar datos para la definición y la caracterización de los distintos patrones de propulsión según los niveles de lesión medular y valorar las posibles actuaciones terapéuticas aplicadas.

b) Definición y puesta en marcha de protocolos de valoración funcional de ayudas técnicas

Actualmente son muy escasos los datos sobre la valoración funcional de una ayuda técnica. El proceso de prescripción y adaptación de una ayuda técnica (ej: silla de ruedas) se convierte habitualmente en un proceso empírico donde existe una falta notable de conocimientos científicos. En muchos casos no sabemos realmente si lo que prescribimos cumple la función para la que ha sido diseñado. La valoración funcional es complementaria a la valoración técnica y tan importante como aquella. Desde nuestra Unidad se está potenciando la aplicación de técnicas instrumentales al análisis del comportamiento de la ayuda técnica, registrando una serie de variables de interés (asociadas al producto, al usuario y, en su caso, al asistente) para evaluar su funcionamiento. De este modo, no sólo llevamos a cabo una evaluación funcional de la ayuda técnica en cuestión (ej: cojín antiescaras, sillas de ruedas) sino que también generamos criterios de diseño de nuevos productos.

c) Nuevas tecnologías. Robótica y Realidad virtual

Se trata de una línea de reciente creación y que pretende aplicar las nuevas tecnologías existentes en el mercado o desarrollar alguna nueva para la mejora de la calidad de vida de los lesionados medulares y que están relacionadas con el análisis del movimiento. En este sentido, esta Unidad, en colaboración con los principales centros de investigación del país, está participando en proyectos innovadores de gran calado tecnológico como son el proyecto HYPER (desarrollo de neurorobot y



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

neuropótesis con funcionamiento híbrido para tratar y compensar los trastornos motores de los lesionados medulares), el proyecto REHABILITA (constituirá un nuevo paradigma centrado en una Rehabilitación ubicua, personalizada y basada en la evidencia) o el proyecto TOYRA (sistema de realidad virtual desarrollado para tratar los déficits motores de los miembros superiores).

5. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Sánchez-Lacuesta J. Biomecánica de la marcha humana normal. En: Sánchez-Lacuesta J, Prat J, Hoyos JV, Viosca E, Soler C, Comín M, Lafuente R, Cortés A, Vera P eds. Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. Valencia. IBV, 1993;21-111.

Gil-Agudo A, De la Peña-González A, Del Ama-Espinosa A, Pérez-Rizo E, Díaz Domínguez E, Sánchez-Ramos A. Comparative study of pressure distribution at the user-cushion interface with different cushions in a population with spinal cord injury. Clin Biomech 2009; 24: 551-557.

Gil-Agudo A, Pérez-Rizo E, Del Ama-Espinosa A; Crespo-Ruiz B, Pérez-Nombela S, Sánchez-Ramos A. Comparative biomechanical gait analysis of patients with central cord síndrome walking with one crutch and two crutches. Clin Biomech 2009; 24: 558-563.

A Gil-Agudo, AD Ama- Espinosa, E Pérez-Rizo, S Pérez-Nombela, B Crespo-Ruiz. Shoulder joint kinetics during wheelchair propulsion on a treadmill at two different speeds in spinal cord injury patients. Spinal Cord 2010; 48: 290-296.

A Gil-Agudo, A Del Ama-Espinosa, E Pérez-Rizo, S Pérez-Nombela, LP Rodríguez-Rodríguez. Upper limb joint kinetics during manual wheelchair propulsion in patients with different levels of spinal cord injury. J Biomech 2010; 43:2508-2515.



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

Peñasco-Martín B, De los Reyes-Guzmán A, Gil-Agudo A, Bernal-Sahún A, Pérez-Aguilar B, De la Peña-González AI. "Aplicación de la realidad virtual en los aspectos motores de la neurorrehabilitación" Rev Neurol 2010; 51: 481-8.

Gil-Agudo A, Pérez-Nombela S, Forner-Cordero A, Pérez-Rizo E, Crespo-Ruiz B, Del Ama-Espinosa A. Gait kinematic analysis in patients with a mild form of Central Cord Syndrome. Journal of Neuroeng Rehab 2011, 8:7.

De Mauro A, Carrasco E, Oyarzun D, Ardanza A, Frizera Nieto A, Torricelli D, Pons JL, Gil A, Florez J. Virtual reality system in conjunction with neurorobotics and neuroprosthetics for rehabilitation of motor disorders. Stud Health Technol Inform 2011;163:163-165.

Stinson MD, Porter-Armstrong A, Eakin P. Seat-interface pressure: a pilot study of the relationship to gender, body mass index and seating position. Arch Phys Med Rehabil 2003; 84:405-9.

Cooper RA, Robertson RN, VanSickle MS, Boninger ML. Methods for determining three-dimensional wheelchair pushrim forces and moments: A technical note. J Rehabil Res Dev 1997;34:162-70.

Esquenazzi A, Talaty M. Normal and pathological gait analysis . En Grabois M, Garrison S, Hart K, Don Lehmkul eds. Physical Medicine and Rehabilitation: the complete approach. Malden. Blackwell Science, Inc 2000;242-62.

Van der Woude LHV, Veeger HEJ, Dallmeijer AJ, Janssen TWJ, Rozendaal LA. Biomechanics and physiology in active manual wheelchair propulsion. Med Eng Phys 2001;23:713-33.



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

Boninger ML, Cooper RA, Baldwin MA, Shimada SD, Koontz A. Wheelchair pushrim kinetics: body weight and median nerve function. Arch Phys Med Rehabil 1999;80:910-5.

Ferrarin M, Andreoni G, Pedotti A. Comparative biomechanical evaluation of different wheelchair seat cushions. J Rehabil Res Dev 2000;37:315-24.



**XXVII JORNADAS NACIONALES DE LA SEP
XVI SIMPOSIUM DE ASELME
Palacio de Congresos de Granada**

Ponencia 3: Evaluación de logros funcionales mediante análisis biomecánicos.

D. José Luis Pons Rovira

Responsable Grupo de Bioingeniería del CSIC

Título: Aplicación de la Neuroprotésica y Neurorrobótica en el Tratamiento de los pacientes afectos de Lesión Medular

Resumen: La neurorrobótica o la neuroprotésica no han demostrado hasta la fecha avances significativos en los procesos terapéuticos o en la sustitución funcional con respecto a la terapia física clásica o a las ayudas asistenciales tradicionales. Sin embargo son cada vez más numerosos los grupos de investigación en todo el mundo que centran su actividad precisamente en una supuesta solución tecnológica a la rehabilitación motora de trastornos severos de origen neurológico, como la lesión medular, o a la sustitución funcional cuando esta recuperación no es posible. Esta divergencia pone de manifiesto que el punto de vista del ingeniero que considera que su investigación tiene una beneficio social no esta suficientemente contrastado desde el punto de vista del personal clínico y en particular de las agencias que han de apostar por soluciones tecnológicas.

La aproximación clásica de la robótica de rehabilitación ha consistido en justificar su papel en el tratamiento de pacientes de lesión medular u otras dolencias a partir de la capacidad de aportar intervenciones terapéuticas más intensivas pero no significativamente distintas a la terapia física tradicional. En el Grupo de Bioingeniería del CSIC reconocemos que el potencial de estas tecnologías, más que en la intervención física en sí, ha de centrarse en su mayor capacidad para valorar el estado de los circuitos neurales (CNS y PNS) del paciente que se pretenden normalizar con la terapia. Es esta mejor valoración del estado del paciente lo que puede dirigir terapias focalizadas en la mejora del estado del paciente. En esta ponencia se presentarán las experiencias del proyecto Consolider HYPER y del proyecto europeo Better, ambos centrados en la aplicación de tecnologías neurorrobóticas y neuroprotésicas, y en los que se empieza a desarrollar esta nueva aproximación.