



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNIDAD JURIQUILLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Prueba de valoración biomecánica de Marcha con el **sensor inercial**



Dr. Raide Alfonso González Carbonell

Dr. Igor Salinas Sánchez

Dr. Demetrio Villanueva Ayala

Dr. Jesús Manuel Dorador González

Dr. Armando Ortiz Prado

Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz

Juriquilla, 2024

Prueba de valoración biomecánica de Marcha con el sensor inercial.

Dr. Raide Alfonso González Carbonell, Dr. Igor Salinas Sánchez, Dr. Demetrio Villanueva Ayala, Dr. Jesús Manuel Dorador González, Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional por la Universidad Nacional Autónoma de México, 2024. Avenida Universidad 3000, Coyoacán, Ciudad de México, 04510.



Se cuenta con autorización para el uso de las imágenes que contienen la tecnología y las capturas de pantalla por parte de BTS Bioengineering (Milan, Italia). Las imágenes contenidas en este documento que no especifican la fuente, son de elaboración propia.

Título de la colección: Protocolos funcionales de valoración biomecánica.

ISBN de la colección: 978-607-30-9209-8.

Volumen 1.

ISBN Volumen: 978-607-30-9210-4.

Diseño de portada: Lic. Ana Karen Valadez Rodríguez.

Agradecimientos:

Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME PE100121.

Los autores quieren agradecer el apoyo de las instituciones en la realización de este trabajo:

- Laboratorio de Biomecánica del Instituto de Neurobiología, Campus Juriquilla, UNAM.
- Centro de Rehabilitación Integral Querétaro.
- Centro para Rehabilitación Integral de Minusválidos del Aparato Locomotor. I.A.P.
- Fisiomechanics.
- A los alumnos de pregrado y postgrado.

A todos, muchas gracias.

Índice:

Introducción.....	1
La marcha humana.....	2
1. Subfases de la fase de apoyo.....	4
2. Subfases de la fase de balanceo.....	4
3. Apoyo unipodal y bipodal.....	5
Variables para caracterizar el ciclo de marcha.....	5
Alteraciones observadas en la marcha.....	6
Tecnología disponible para el estudio de la marcha.....	6
Sensor inercial GS2 y sistema G-Walk.....	7
Prueba de marcha (Walk+ con el sensor inercial).....	9
Etapas de preparación.....	9
1. Preparación del área de trabajo.....	9
2. Instalación de las cámaras de video en el final del recorrido y en lateral.....	9
3. Conectar el equipamiento a la computadora.....	10
4. Ofrecer indicaciones al paciente sobre la prueba.....	10
5. Colocar el sensor en el paciente.....	11
Etapas de captura.....	12
6. Iniciar proceso de grabación de video con las cámaras.....	12
7. Iniciar el proceso de captura en el programa.....	12
Etapas de creación del reporte.....	14
8. Informe de resultados.....	14
Indicaciones para la aplicación del protocolo en las clases prácticas.....	19
Referencias.....	22

Introducción.

La marcha humana es un modo de locomoción en posición bípeda que origina una secuencia de movimientos coordinados y alternantes de los miembros inferiores y superiores logrando un equilibrio dinámico con desplazamiento del centro de masa (CoM) con una gran eficiencia biomecánica. Un individuo sano puede trasladarse largas distancias con un gasto mínimo de energía, esto cuando el desplazamiento vertical del CoM es el menor posible para evitar grandes trabajos de los músculos debido a la modificación de la energía potencial gravitatoria (Di Gregorio & Vocenas, 2021).

La marcha es un proceso motor complejo que se puede ver alterado por diversos factores, esto, debido a la participación de tejidos, como huesos, cartílago, tendón, músculo y el Sistema Nervioso Central. Las actividades musculoesqueléticas durante la marcha ocurren simultáneamente a diferentes niveles articulares y en diferentes planos y ejes, esto a su vez ocasiona un continuo movimiento de balanceo, Rotación y basculación del centro de gravedad. Las alteraciones en cualquiera de estas estructuras pueden determinar patrones de la marcha anómalos o no funcionales.

El protocolo de valoración funcional de la marcha con el sensor inercial permite realizar un análisis rápido de la marcha mediante el empleo de un sensor inercial que se ubica en la pelvis de las personas, a la altura de la vértebra S2. De manera precisa y sencilla se puede determinar la calidad global de la marcha a partir de los parámetros de la cinemática lineal. Los datos resultantes del ensayo garantizan un análisis objetivo de las habilidades motoras y los resultados de la terapia seleccionada. Es posible comparar varias pruebas realizadas en el mismo paciente en diferentes momentos (previa y posterior al tratamiento) para establecer la efectividad de la rehabilitación.

Este manual se orienta a fortalecer el aprendizaje de la valoración biomecánica de la marcha con el sensor inercial. Se sugiere que durante las actividades prácticas de laboratorio o en la realización de proyectos de investigación los alumnos tengan a la mano este material, para que consulten los pasos de cada etapa de la ejecución de la prueba para su correcta ejecución. Se recomienda que los alumnos consulten el audiovisual de “Valoración biomecánica de marcha con el sensor inercial” antes de realizar la prueba para su preparación independiente. El profesor debe proporcionar la dirección de internet para su consulta.

La marcha humana.

Durante la marcha y para mantener el equilibrio, la línea de gravedad (proyección del centro de masa en la superficie de apoyo) se debe ubicar dentro de la base de sustentación (Devetak et al., 2019). Como se observa en la Fig. 1, el tamaño de la base de sustentación es variable, durante el simple apoyo está formada por la superficie de contacto del pie que está en contacto con el suelo, mientras que durante el doble apoyo está formada por la superficie que existe entre los pies. Durante el simple apoyo ocurre la propulsión y el centro de masa está por delante de la base de soporte para favorecer el desplazamiento hacia el frente, que luego, vuelve a estar sobre la base de soporte en el resto de las etapas del ciclo de marcha.

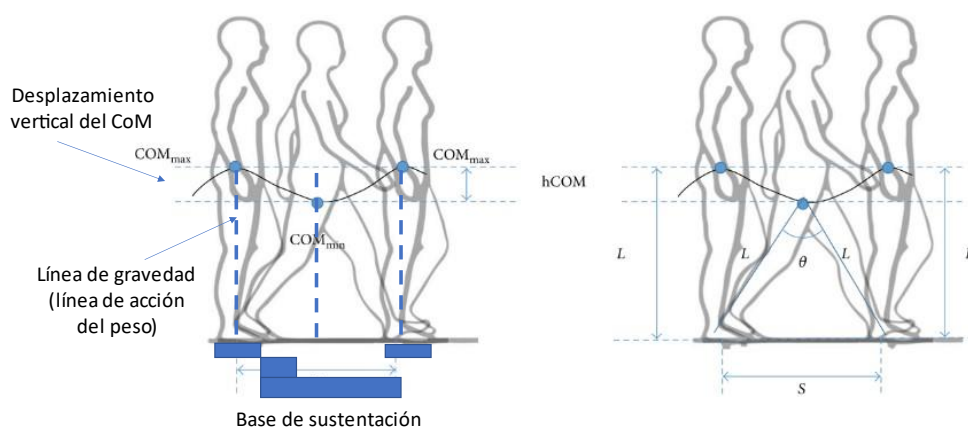
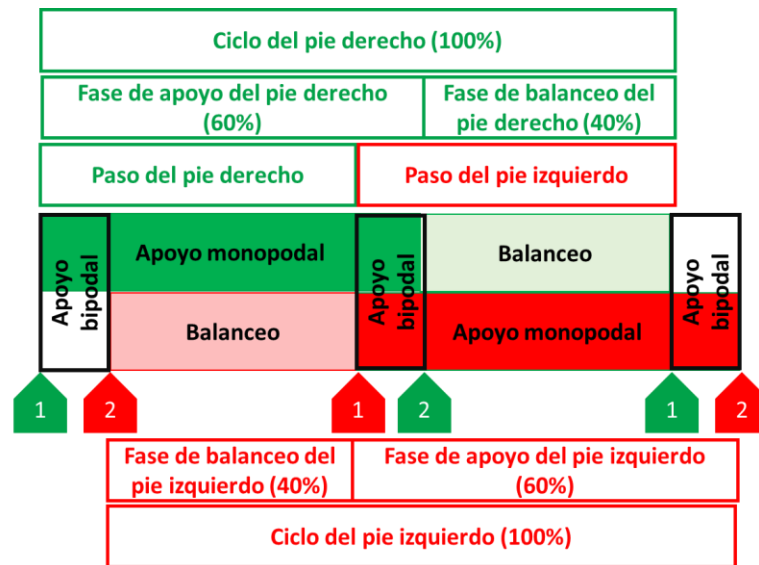


Fig. 1. Desplazamiento del centro de masa, la línea de gravedad y variación de la base de sustentación.

Fuente: Adaptación de (Fusca et al., 2018). Licencia CC-BY 4.0.

Por otro lado, el centro de masa (CoM) se encuentra elevado sobre la base de sustentación, a la altura de la vértebra S2, aproximadamente al 55% de la talla del individuo (Fig. 1), lo que ocasiona que la marcha bípeda propia de los seres humanos es inherentemente inestable (Lugade et al., 2011; Mariana Haro, 2014). Los músculos anti gravitatorios mantienen el tronco erguido sobre las extremidades inferiores asegurando que la línea de gravedad se encuentre dentro de la base de soporte para mantener la estabilidad (Chastan et al., 2010).

Los movimientos durante la marcha tienen un carácter cíclico, por lo que es posible establecer un ciclo de marcha y dividirlo en dos Fases: Fase de Apoyo y Fase de Balanceo (Han et al., 2019; Ridao-Fernández et al., 2019) (Fig. 2). Estas fases se dan de manera simultánea durante el ciclo de la marcha normal de un individuo. El apoyo representa la etapa en la que existe una transferencia del peso del sujeto hacia el suelo, cuando uno de los pies se encuentra en contacto con el suelo. Mientras en uno de los pies se está desarrollando la fase de apoyo, en el otro se lleva a cabo la fase de balanceo. Para su mejor entendimiento, las dos fases se segmentan en cinco subfases para el apoyo y tres para el balanceo (Fig. 3) (Aqueveque et al., 2020; Han et al., 2019).



Eventos de la marcha



Fig. 2. Fases de la marcha: apoyo, balanceo, apoyo bipodal y monopodal. Los eventos de apoyo de talón y despegue de dedos definen las fases de la marcha.

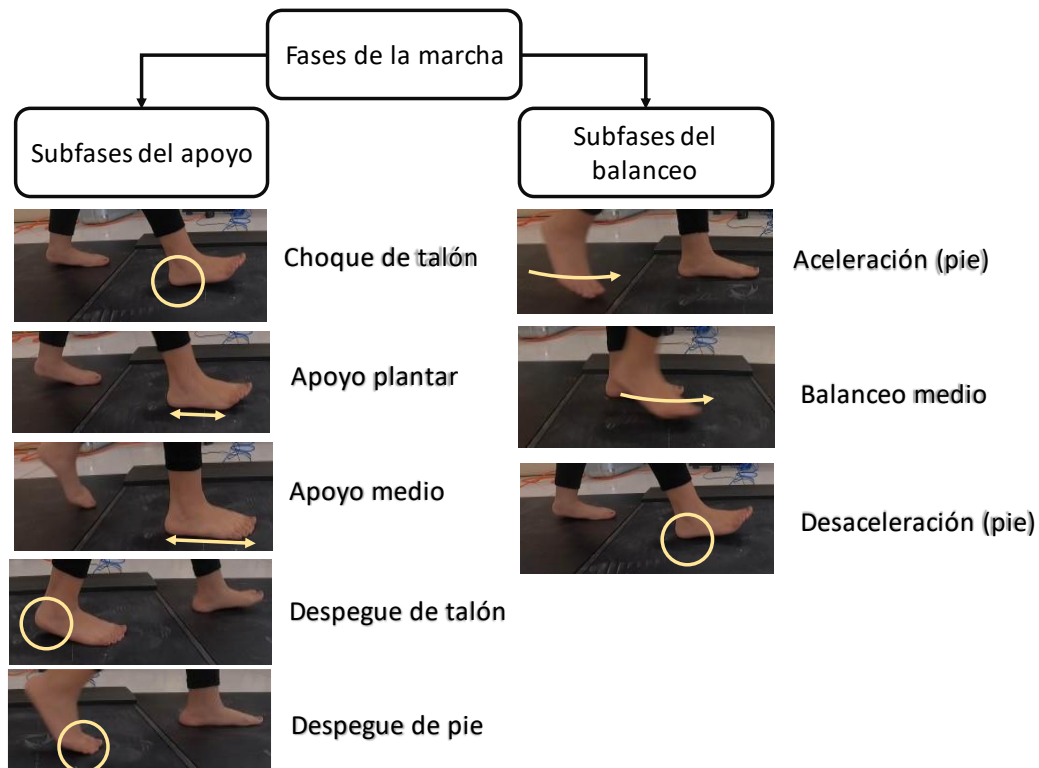


Fig. 3. Fases de la marcha: Segmentado del ciclo de marcha en cinco subfases de apoyo y tres de balanceo.

1. Subfases de la fase de apoyo.

1.1 Choque de talón/contacto inicial.

Se refiere al momento en que el talón (base del hueso calcáneo) asume contacto con el piso. Este momento de la marcha da inicio al ciclo, el cual culmina con un nuevo choque de talón del mismo pie.

La acción de los flexores dorsales del tobillo, isquiotibiales en la rodilla, tibial anterior, extensores y abductores de la cadera son necesarios para una buena ejecución.

1.2 Apoyo plantar/Fase inicial de apoyo/Respuesta a la carga.

Momento en que el borde lateral inferior (hueso cuboides y quinto metatarsiano) entran en contacto con el piso. Este es un momento breve de transición donde el centro de gravedad inicia su lateralización hacia la fase de apoyo. La participación de los músculos: cuádriceps, tibial anterior, vastos, crural, abductores de la cadera (glúteo medio y tensor de la fascia lata), aductores, isquiotibiales y glúteo mayor de la extremidad que está en la fase de apoyo son esenciales para estabilizar esta subfase de la marcha.

1.3 Apoyo Medio.

En este momento, la planta del pie entra en un contacto total con el piso, la descarga final del peso corporal radica en los tres puntos de apoyo (calcáneo, cabeza del quinto metatarsiano y cabeza del primer metatarsiano). El pie se prepara para llevar un impulso hacia el frente con la acción de sóleo, abductores de cadera, tensor de la fascia lata, tibial posterior y los tendones peroneos.

1.4 Despegue de talón/Fase final de apoyo.

Da inicio la transición del peso corporal al pie contralateral. Esta subfase se caracteriza por el despegue del talón y el choque de talón del pie contralateral, por lo que la carga se distribuye entre las cabezas metatarsianas del pie en apoyo (arco transversal) y el talón (base del hueso calcáneo) del pie contralateral. Para este momento el pie contralateral se ha ubicado al frente y el pie en apoyo está por detrás de la línea media coronal con acción del glúteo mayor, de igual manera se encuentra la predominante acción de los músculos gemelos, soleo y tríceps sural.

1.5 Despegue de pie/Prebalanceo/Preoscilación.

En este momento termina la fase de apoyo. La carga residual se encuentra ubicada en el ante pie sobre los dedos (ortejos) mientras que la mayor carga pasa a la fase de apoyo medio del pie contralateral. El primer oratejo tiene una inherente función en esta subfase, ya que su disfunción o pérdida por amputación puede modificar de manera significativa la marcha humana.

La musculatura que predominantemente actúa es la flexora de la cadera, flexores plantares, recto anterior, recto interno y el aductor mayor.

2. Subfases de la fase de balanceo.

2.1 Aceleración/oscilación inicial.

Inicia el traslado del centro de gravedad hacia delante, el individuo avanzará. La característica principal de esta subfase se observa ya que al despegar el pie del piso y con la energía acumulada por la acción del glúteo mayor, el pie se acelera en forma de péndulo hacia el frente para llegar a la línea media coronal

del cuerpo. La activación del psoas iliaco, recto anterior, bíceps crural, gemelos y el aductor mayor son preponderantes para este evento.

2.2 Balanceo medio/oscilación media.

Segundo momento de la fase de balanceo. El pie continúa su movimiento con la inercia pendular inicial, alcanza y pasa la línea media coronal del cuerpo llegando al frente. La acción del músculo tibial anterior es indispensable ya que mantiene la articulación del tobillo en posición neutral (el ángulo entre el pie y la pierna es de 90°) evitando que el individuo tropiece.

2.3 Desaceleración/refrenamiento/oscilación final.

Es el momento final del ciclo de la marcha, como se mencionó en la subfase de choque de talón, el pie está a punto de tener contacto nuevamente con el piso. En este momento la inercia del movimiento pendular de la extremidad ha terminado, la flexión de cadera está en la mejor posición con el refrenamiento de los extensores de la cadera y junto con la extensión total de la rodilla por los músculos isquiotibiales el tibial anterior mantiene la posición neutra del tobillo y los abductores de la cadera estabilizan la posición de la extremidad. En este evento se observa el nuevo choque de talón.

3. Apoyo unipodal y bipodal.

Además de la fase de apoyo (simple o unipodal) del ciclo de la marcha, existe también un momento en que ambos pies se encuentran en contacto con el piso, que se conoce como apoyo bipodal.

El apoyo bipodal es aquel evento que se da durante las subfases de choque de talón de un pie y el despegue de talón del pie contralateral, es indispensable en la transición de carga entre las extremidades y en el movimiento del centro de gravedad. Además de la velocidad, el apoyo bipodal es el evento que separa la marcha deportiva, de la carrera, ya que en la segunda no se presenta el apoyo bipodal.

A partir del ciclo de la marcha, se establecen los parámetros espacio temporales (longitud y tiempo) que permiten detectar alteraciones de esta, como es el paso, la zancada, el apoyo bipodal, apoyo unipodal y balanceo.

El paso se identifica entre el apoyo de talón del pie derecho respecto al izquierdo y viceversa, la zancada guarda relación con un ciclo de marcha, pues se identifica con el apoyo de talón del mismo pie.

Variables para caracterizar el ciclo de marcha.

Con el fin de estandarizar los eventos de la marcha y poder comparar entre individuos, la duración del ciclo se expresa en porcentajes, así el choque de talón o contacto inicial del pie representa el 0% de la marcha y el próximo contacto de talón el 100% (Willems et al., 2012).

De este modo, tomando como referencia el pie derecho, se observa que la duración de las fases de la marcha en función del porcentaje del ciclo es:

- 0-15% primer apoyo bipodal,
- 15-50% apoyo simple o unipodal, el pie izquierdo se encuentra realizando el balanceo.
- 50-65% segundo apoyo bipodal, el pie derecho está en la etapa de prebalanceo y descargando el peso hacia el pie izquierdo.
- 65-100% balanceo del pie derecho y apoyo simple del pie izquierdo.

También se pueden determinar otras variables cinemáticas como (Gouelle & Mégrot, 2017):

- Velocidad de la marcha, que tiene un valor promedio de 1.2 metros por segundo.
- Cadencia: que es lo referente a cantidad de pasos dados en un minuto y en promedio es de 90 a 120 pasos por minuto.
- Longitud del paso: que es la distancia entre el choque de talón de un pie y el choque de talón de otro, esta tiene una distancia promedio de 35 a 41 cm.
- Zancada: correspondiente a un ciclo de marcha y se observa del choque de talón a choque de talón del mismo pie y es de alrededor de 70 a 82 cm.
- Es importante saber además que existe un ángulo de rotación externa de los pies que oscila entre los 8 y 28 grados durante la marcha.
- Por último, una base de sustentación dinámica que se mide entre talón y talón durante la marcha y en promedio tiene una distancia de entre 5 y 10 cm.

Alteraciones observadas en la marcha.

La marcha es un proceso motor complejo que se puede ver alterado por diversos factores, esto, debido a la participación de tejidos, como huesos, cartílago, tendón, músculo y el Sistema Nervioso Central. Alteraciones a cualquiera de estas estructuras puede determinar patrones de la marcha anómalos o no funcionales.

El análisis cuantitativo de la marcha tiene múltiples aplicaciones clínicas entre ellas (Mariana Haro, 2014):

- Amputaciones
- Parálisis cerebral
- Desordenes degenerativos en las articulaciones
- Reemplazos articulares
- Poliomielitis
- Esclerosis múltiple
- Distrofia muscular
- Traumas cerebrovasculares
- Marcha antiálgica

Tecnología disponible para el estudio de la marcha.

Las compensaciones que el individuo emplea en su marcha pueden encubrir alguna comorbilidad o patología preexistente, además de ser difíciles de diferenciar de las alteraciones primarias a simple vista.

En las últimas décadas, se ha incrementado el uso de las tecnologías no invasivas de valoración funcional biomecánica para analizar las actividades cotidianas de las personas (Mohammed et al., 2016) y discriminar el rango de normalidad de las variaciones de los movimientos con una mayor precisión en comparación con el método de observación clínica. Las nuevas herramientas están compuestas por sistemas electrónicos y paquetería de procesamiento de las señales capturadas durante los estudios (Ridao-Fernández et al., 2019).

Entre ellas se encuentran:

- Cámaras de vídeo digitales de alta velocidad con anillos de luz infrarroja que rodean las lentes capturan imágenes de alto contraste de los marcadores reflectantes. Laboratorio de Biomecánica.
- Plataformas de fuerzas.
- Electromiografía de contacto de superficie.
- Baropodometría.
- Sensor inercial.

Es posible estudiar la marcha patológica, identificar patrones patológicos comunes y establecer sistemas de clasificación en distintas entidades clínicas que permiten analizar de manera objetiva la condición del individuo en un determinado momento, observar su evolución en el tiempo y en respuesta a los tratamientos terapéuticos.

De este modo ha sido posible entender que las desviaciones de la marcha provienen en muchos casos “patologías específicas”, siendo muy diversas las causas subyacentes y por tanto el abordaje será distinto en cada caso, no es posible aplicar los mismos principios para el tratamiento de las diversas patologías.

Sensor inercial GS2 y sistema G-Walk.

Un acelerómetro es un dispositivo destinado a medir las aceleraciones. Basan su principio mediante la medición del cambio de capacidad eléctrica de un condensador que provoca el movimiento de una masa sísmica situada entre las placas de este, que al moverse hace cambiar la corriente que circula entre las placas del capacitor.

Al combinar el acelerómetro de tres ejes, con un giroscopio y un magnetómetro, entonces se pueden obtener la aceleración lineal en cada eje, la velocidad angular, los desplazamientos angulares con una referencia al norte magnético. Tienen incorporado un sensor de temperatura para ajustar la medición de los parámetros y reducir el efecto de esta variable física. Los dispositivos que tienen estos sensores se conocen como sensores inerciales (Fong & Chan, 2010). Se emplean cinco tipos de algoritmos para estimar la orientación o las posiciones: integración, observación de vectores, filtrado de Kalman, filtrado complementario y otros algoritmos (López-Nava & Muñoz-Meléndez, 2016).

El sistema G-Walk (BTS Bioengineering, Milán, Italia) está compuesto por el sensor inercial G-Sensor y el programa de procesamiento G-Studio para la evaluación funcional de movimiento. A través de una antena Bluetooth se recibe la información de la cinemática del movimiento que permite realizar pruebas clínicas esenciales en la rehabilitación. Es de gran ayuda para médicos y especialistas pues complementa la evaluación de la eficacia de terapias o programas de rehabilitación. Las pruebas son muy fáciles de hacer y los resultados son inmediatamente comparables con el rango de normalidad. El sensor inercial G-Sensor se ubica en la posición anatómica de interés por medio de un cinturón elástico (Fig. 4).



Fig. 4. Sensor inercial G-Sensor, cable y antena Bluetooth y cinturón para la colocación del dispositivo en la anatomía del paciente.

Los protocolos integrados ofrecen la posibilidad de hacer análisis completos y detallados de las principales pruebas clínicas. Entre las pruebas que ofrece el sensor se encuentran los protocolos de

- 1- Marcha.
- 2- Marcha cronometrada.
- 3- Prueba cronometrada de levanta y anda.
- 4- Giro.
- 5- Correr.
- 6- Saltos.
- 7- Libre.

Prueba de marcha (Walk+ con el sensor inercial).

El protocolo Walk+ permite realizar un análisis rápido, preciso y sencillo de la marcha. Los datos resultantes del ensayo garantizan un análisis objetivo de las habilidades motoras y los resultados de la terapia seleccionada. Es posible comparar varias pruebas realizadas en el mismo paciente en diferentes momentos (previa y posterior al tratamiento) para establecer la efectividad de la rehabilitación. Este protocolo ofrece los siguientes datos:

- Parámetros espacio temporales globales y diferenciados del lado derecho e izquierdo.
- Parámetros generales de la cinemática globales y diferenciados del lado derecho e izquierdo.
- Índices de simetría del movimiento y propulsión.
- Desplazamientos angulares en los tres planos anatómicos de la pelvis.

Para realizar la prueba es necesario realizar los siguientes pasos:

Etapa de preparación.

1. Preparación del área de trabajo.

Es un recorrido en línea recta hasta que complete cinco ciclos completos de marcha, lo que se logra en aproximadamente 7 metros. Por tanto, se debe preparar el punto de partida y destino, con ayuda de los conos de colores (Fig. 5).

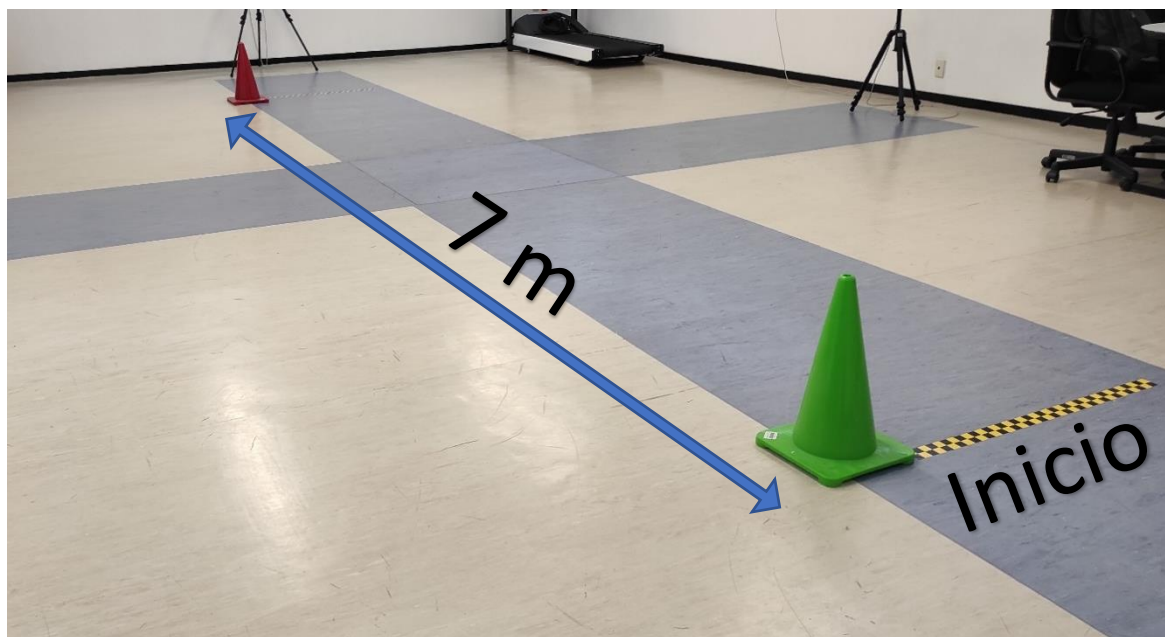


Fig. 5. Preparación del área de trabajo, el recorrido debe ser mayor a 7 m para completar los ciclos.

2. Instalación de las cámaras de video en el final del recorrido y en lateral.

Colocar las cámaras para la captura del movimiento en el plano frontal y en el plano sagital, para analizar la relación entre las variables espacio temporales del sensor inercial con lo observado en el video.

De este modo se podrá describir también de manera cualitativa las diferentes etapas de la marcha y las variaciones en las gráficas.

3. Conectar el equipamiento a la computadora.

Insertar la antena Bluetooth receptora del sensor inercial en el puerto USB (Fig. 6a) y prender el sensor inercial. El interruptor del sensor se encuentra, tomando como referencia la cara del logo del sensor, en el lateral derecho (Fig. 6a). La luz del indicador LED blanco comenzará a parpadear, indicando que está prendido.

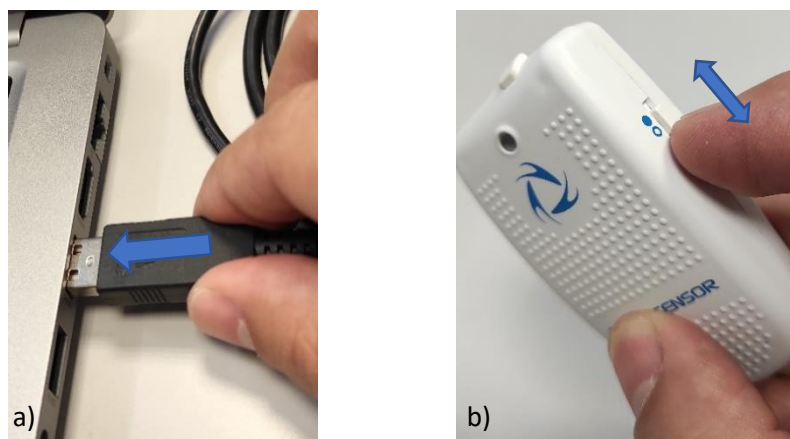


Fig. 6. Conexión de la antena al puerto USB de la computadora y encendido.

Abrir el programa G-Studio y conectar el sensor al dar clic en el ícono de la pestaña dedicada al Manejo de G-Sensor de la Barra de herramientas. Una vez conectado el sensor, el ícono de conexión cambia de color gris a azul, y el ícono de la batería muestra el nivel de carga del sensor inercial (Fig. 7).



Fig. 7. Barra de herramientas del G-Studio. Conexión del sensor inercial.

4. Ofrecer indicaciones al paciente sobre la prueba.

Las indicaciones serán las siguientes:

La prueba biomecánica consiste en medir sus movimientos con equipamiento destinado para este fin, como es el sensor inercial. A usted se le colocará el sensor inercial por medio de un cinturón elástico, abrazando la espalda baja en la región sacra, en la línea que conecta los dos hoyuelos de Venus, que corresponde a la ubicación entre las vértebras S1-S2.

Desde una posición erguida, usted caminará en línea recta aproximadamente 7 metros, hasta el otro cono (identificar con color). Luego, permanecerá durante tres segundos al lado del cono, le dará la vuelta y regresará de igual manera siguiendo una línea recta. Al completar la distancia, se dará por concluida la prueba.

La trayectoria que debe seguir estará señalizada, por lo que usted no deberá preocuparse por recordar la distancia recorrida, simplemente guiarse por la trayectoria, la que no está obligado a seguir forzosamente, al contrario, realice los gestos de movimiento de la manera más natural posible.

Al inicio de la prueba, usted debe permanecer inmóvil en posición erguida durante unos segundos, debido a que se requiere que el sensor que tiene colocado en la espalda se estabilice. Cuando este proceso haya concluido, se le indicará que puede caminar.

En todos los casos, la información que usted proporcione al personal que participa en las pruebas será de carácter estrictamente confidencial, se utilizará exclusivamente por el personal involucrado en los estudios, y no estará disponible para ningún otro propósito. Usted y la información que nos proporcione quedarán identificados con una clave y no con su nombre, de tal manera que ninguno de los integrantes del equipo de investigación ni ninguna otra persona pueda conocer su identidad. Los resultados de este estudio serán publicados únicamente con fines científicos y docentes. El equipo de investigación y la UNAM se comprometen a proteger sus datos personales.

Los beneficios de participar en este estudio son: usted recibirá por correo electrónico un reporte detallado y la interpretación de las pruebas biomecánicas que realizó, también recibirá orientación médica sobre las posibles asimetrías del movimiento y la estrategia para su corrección. De manera indirecta usted contribuirá al desarrollo científico y tecnológico del país, que optimizará la atención integral de personas con amputaciones para su rehabilitación.

Los riesgos de participar en el estudio se atribuyen principalmente a la incomodidad y/o cansancio durante las pruebas de funcionalidad. Cabe destacar que los sensores empleados en el estudio no emiten radiaciones ionizantes ni genera campos magnéticos potentes; por lo que se considera una técnica inocua.

5. Colocar el sensor en el paciente.

Primero inserte el sensor en el bolsillo de la correa. El logo de BTS del sensor debe quedar apuntando hacia la parte externa de la correa, con el indicador de luz del sensor parpadeando. El sensor se ubica en la región sacra entre las vértebras S1-S2.

Identifique la posición anatómica antes mencionada y coloque, bien ajustada, la correa, con el sensor centrado sobre la columna. Garantice que el sensor no se mueva y que el paciente no sienta una sensación de compresión en la zona (Fig. 8).

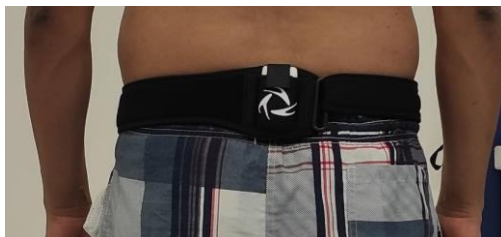


Fig. 8. Colocación del sensor inercial en el paciente, a la altura de la vértebra S2.

Etapa de captura.

6. Iniciar proceso de grabación de video con las cámaras.

Asegurarse que las cámaras tienen suficiente espacio para grabar la prueba.

7. Iniciar el proceso de captura en el programa.

Primero debe dar alta al paciente a estudiar. Si el paciente ya existe en la base de datos, entonces se omite. Para dar alta a un paciente, se selecciona el ícono de la Barra de herramientas dedicado a la Gestión de paciente (Fig. 9).



Fig. 9. Barra de herramientas del G-Studio. Gestión de Paciente.

Se desplegará una ventana para capturar los datos del paciente, como nombre, apellidos, fecha de nacimiento, código del paciente, peso, longitud de las extremidades (desde la cresta ilíaca anterior hasta el maléolo lateral), patología y notas donde se podrán agregar los motivos del estudio, entre otras (Fig. 10). En la sección de patologías, se pueden seleccionar algunas como Amputación de Miembro inferior, Osteoartritis de cadera, Parkinson, Adultos mayores, Accidentes cardiovasculares y Desordenes vestibulares. Al seleccionar una de estas patologías, el programa comparará los parámetros espacio temporales con los valores normalizados de cada una de las patologías. Luego seleccione aceptar para guardar los datos del paciente.

The image shows the 'Agregando nuevo paciente...' window. It contains a form for entering patient data. The fields include: 'Código personal' (text box), '*Apellido' (text box with 'Pamé' entered), '*Nombre' (text box), '*Fec. Nac.' (date picker), '*Peso' (text box with 'kg' unit), '*Altura' (text box with 'cm' unit), '*Genero' (dropdown menu with 'M' selected), 'Hº zapato' (text box with 'Europe' unit), 'Patología' (dropdown menu), and 'Notas' (text area). A diagram of a human figure is shown in the center, with labels for 'Altura' (height), 'P.drch' (right leg length), and 'P.izq' (left leg length). A button 'Aceptar' is at the bottom right.

Fig. 10. Ventana para capturar los datos del paciente.

Se selecciona el protocolo Walk+ de la barra de herramientas de la izquierda de la pantalla.

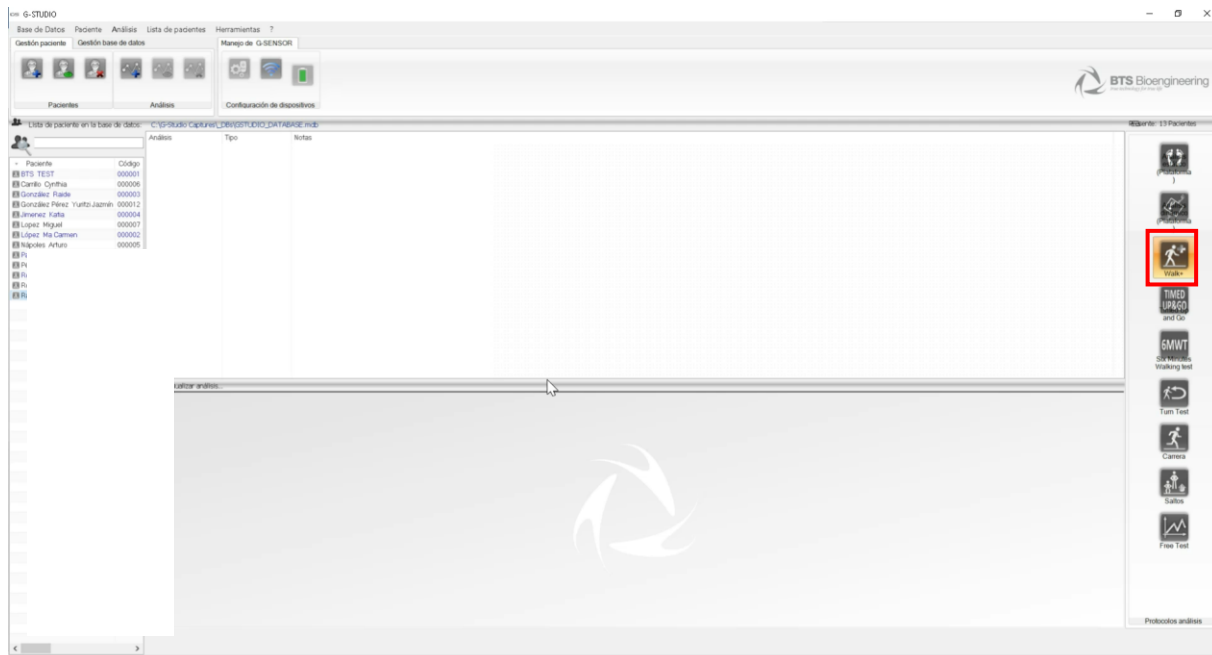


Fig. 11. Selección del protocolo Walk+ para el análisis de marcha.

Aparecerá la ventana dedicada a esta prueba y se selecciona la opción iniciar. Se debe indicar al paciente que se coloque en posición erguida al lado del cono que indica la partida. El programa iniciará el proceso de estabilización del sensor y cuando este proceso termine, indique al paciente que puede comenzar el ciclo (Fig. 12).

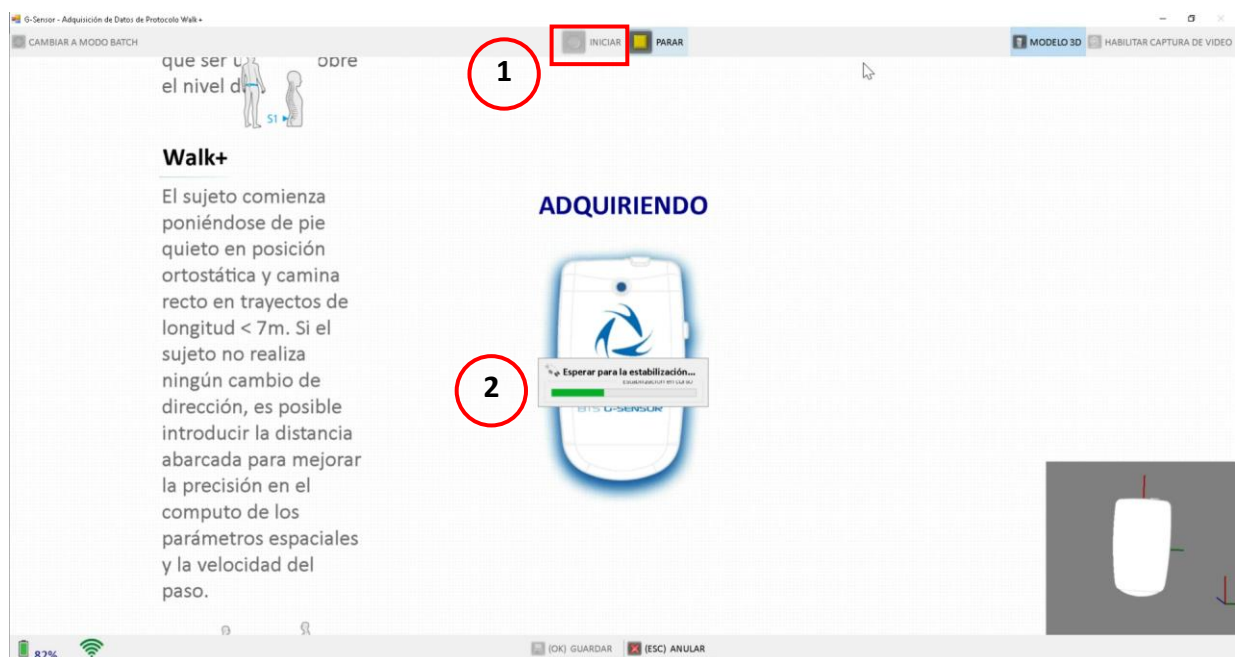


Fig. 12. Ventana de captura de la prueba de marcha. Inicio de la grabación.

Una vez que el paciente haya completado el recorrido, seleccione detener la prueba y guarde los datos de la marcha (Fig. 13).



Fig. 13. Ventana de captura de la prueba de marcha. Detener y guardar los datos del análisis.

Etapas de creación del reporte.

8. Informe de resultados.

El programa de manera inmediata ofrece los resultados del análisis, donde se genera un reporte de los datos.

Interpretación de los resultados.

Índice de calidad de la marcha.

El primer indicador es el índice de calidad de la marcha para ambas extremidades. Este índice evalúa la habilidad del sujeto de realizar el ciclo de marcha con la extremidad inferior derecha e izquierda comparado con la duración ideal de la fase de apoyo y balanceo (Fig. 14). El índice ideal de 100% se obtiene cuando el sujeto realiza la fase de apoyo en un 60% y la de balanceo en un 40%. El rango de normalidad es de 90 a 100%.



Fig. 14. Índice de calidad de la marcha para ambas extremidades.

Duración de las fases del ciclo.

El reporte muestra la duración de las fases del ciclo de marcha para ambas extremidades y los rangos de normalidad (Fig. 15). La duración se expresa en porcentaje del ciclo de marcha y guarda relación con el índice de calidad de la marcha.

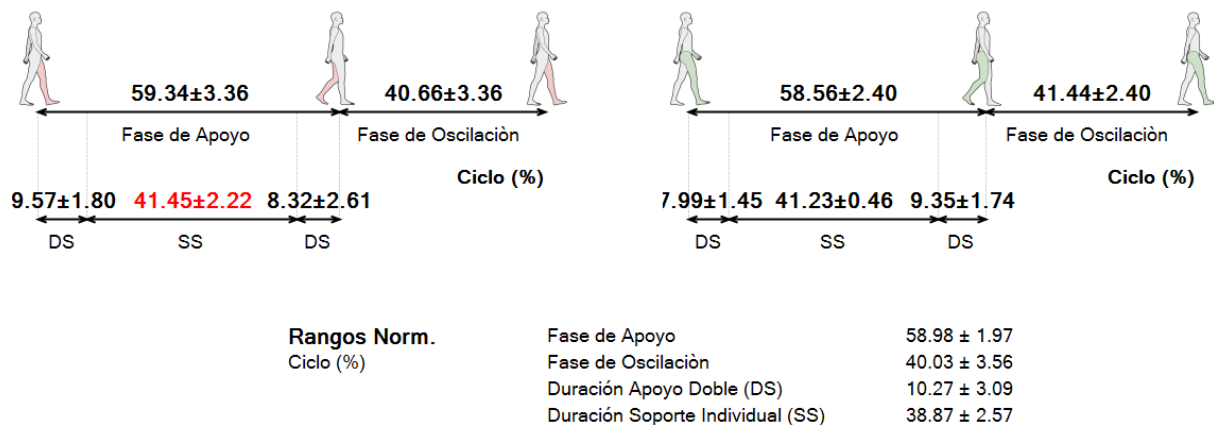


Fig. 15. Duración de las fases del ciclo de marcha para ambas extremidades y los rangos de normalidad.

Parámetros espacio temporales.

La siguiente información que ofrece el reporte son los parámetros espacio temporales de la marcha (Fig. 16). Entre ellos la velocidad de traslación, la duración de la prueba, la duración de un ciclo de marcha, la longitud de la zancada respecto a la altura del participante, la longitud del paso y los pasos elaborados.

Parámetros espacio-temporales	Valor (Media ± Desviación Estándar)	Valor Normal (Media ± Desviación Estándar)
Duración de Análisis (s)	27.3	
Cadencia del Paso (pasos/min)	99.95 ± 2.64	118.80 ± 7.80
Velocidad (m/s)	1.04 ± 0.07	1.23 ± 0.11

Parámetros espacio-temporales	Valor Izquierdo (Media ± Desviación Estándar)	Valor Derecho (Media ± Desviación Estándar)	Valor Normal (Media ± Desviación Estándar)
Duración Ciclo de Marcha (s)	1.20 ± 0.03	1.20 ± 0.03	1.12 ± 0.15
Longitud Zancada (m)	1.25 ± 0.05	1.24 ± 0.06	1.23 ± 0.07
%Longitud Zancada/Altura (% Altura)	6899.72 ± 276.42	6836.66 ± 326.49	84.70 ± 6.10
Longitud de Paso (%Longitud Zancada)	54.09 ± 2.89	45.91 ± 2.15	50.00 ± 0.70
Pasos elaborados	8	8	

Fig. 16. Parámetros espacio temporales de la marcha.

Índice de simetría y de propulsión.

El índice de simetría ofrece información sobre la simetría general del paciente, se determina a partir de la habilidad de obtener la misma aceleración del centro de masa con ambas extremidades (Fig. 17). Los participantes sin alteraciones patológicas muestran un índice superior al 90%. El índice de propulsión muestra la habilidad del paciente de recibir la carga completa sobre una pierna luego de la desaceleración

y mover el cuerpo hacia el frente. A mayor propulsión, mayor será la capacidad de progresión del paciente en la fase de apoyo simple o unipodal.



Fig. 17. Índice de simetría y propulsión del paciente.

Aceleración del baricentro.

En el gráfico se muestra con línea gruesa la media y con una franja coloreada la desviación estándar de la aceleración del baricentro, donde la pendiente ascendente de la gráfica muestra la capacidad de progresión del paciente (Fig. 18). A mayor pendiente, mayor propulsión del paciente. Si el paciente tiene una buena repetitividad de sus movimientos, las franjas de las gráficas serán más estrechas. En estas gráficas se puede visualizar el comportamiento de la aceleración del paciente y una interpretación de los índices de simetría y propulsión, pues ambos guardan relación con la aceleración.

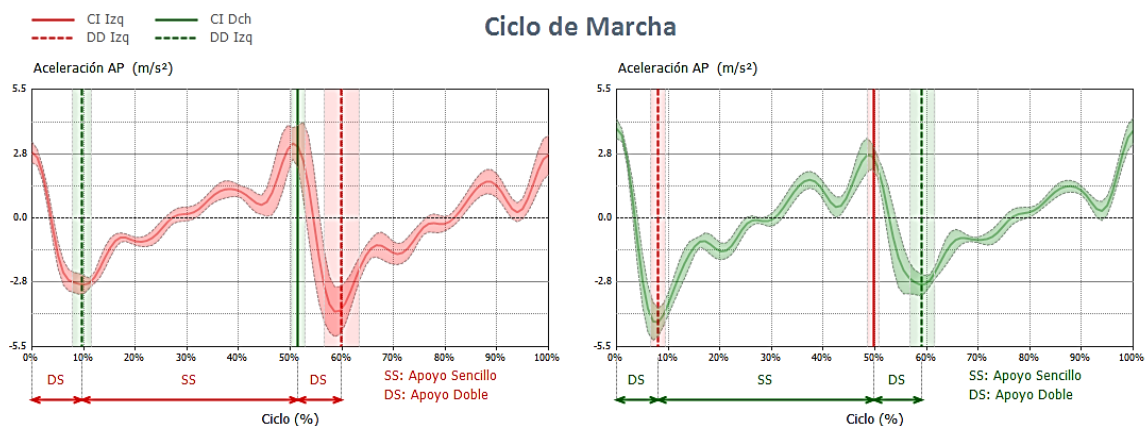


Fig. 18. Aceleración antero-posterior del baricentro.

Ángulos de la pelvis.

En cuanto a la cinemática de la pelvis, se muestran los movimientos de inclinación, basculación u oblicuidad y la rotación (Fig. 19). Se muestra la curva del valor medio de los ciclos y el comportamiento esperado según la norma. El paciente estudiado a nivel de la pelvis tiene una alteración en la basculación de la cadera cuando el pie izquierdo inicia la fase de apoyo. Se aprecia que el ángulo es menor a la norma cuando ocurre el primer apoyo bipodal. En esta subfase, la basculación de la pelvis para el pie derecho se incrementa. El ángulo vuelve a disminuir en la fase de balanceo del pie izquierdo.



Fig. 19. Cinemática de la pelvis. Desplazamiento angular medio para todos los ciclos de marcha.

La siguiente figura es otra forma de mostrar los ángulos de la pelvis, separados para cada extremidad y en función del ciclo de la marcha. La línea gruesa indica el valor medio, mientras que el área sombreada la desviación estándar. Mientras más fina es el área sombreada, el participante tiene mayor repetibilidad de los movimientos y control sobre los movimientos.

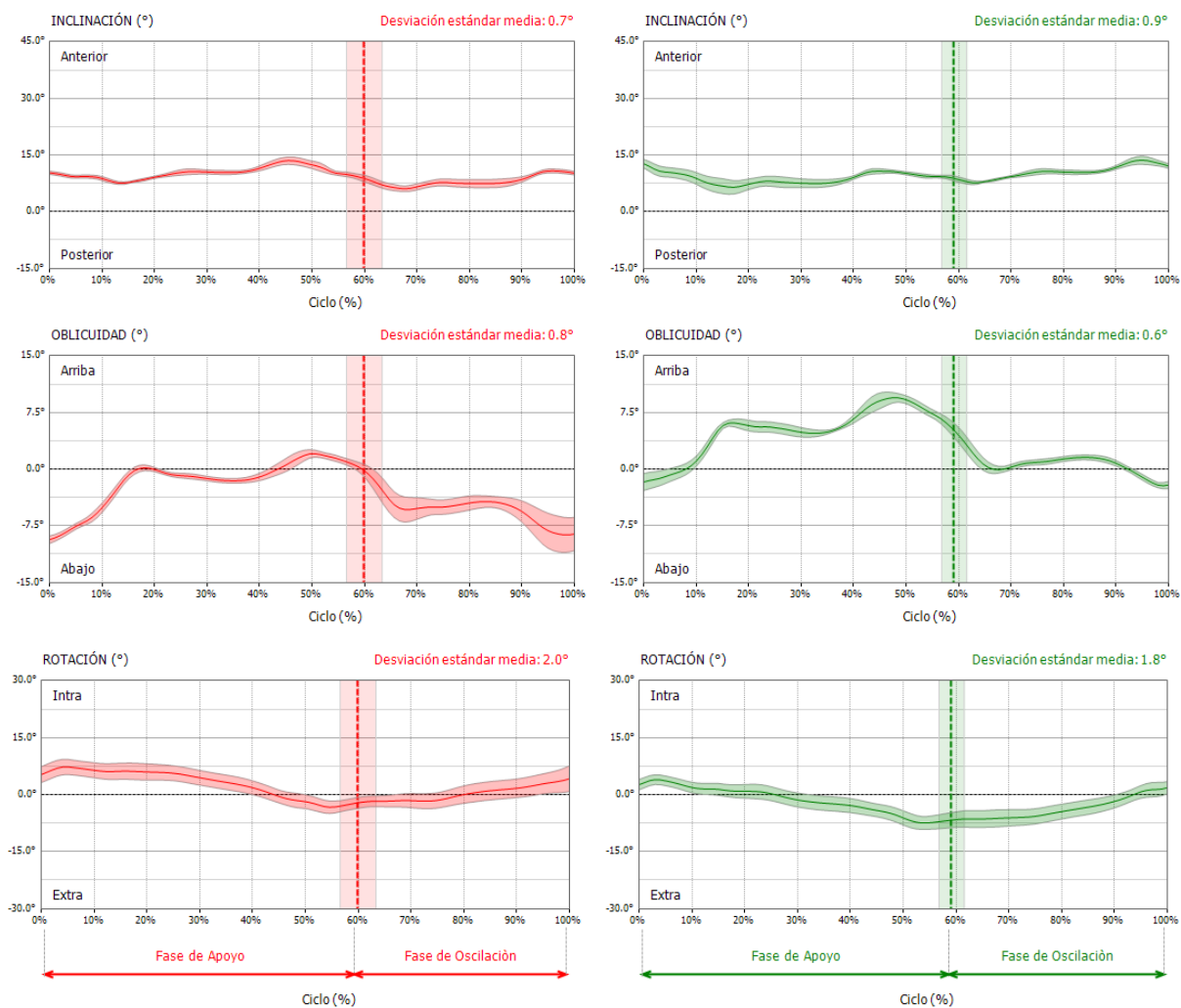


Fig. 20. Ángulos de la pelvis según el ciclo de cada extremidad. Las líneas verticales indican el fin de la fase de apoyo.

Indicaciones para la aplicación del protocolo en las clases prácticas.

El protocolo contiene la secuencia lógica de operaciones que debe realizar el estudiante (o investigador), como ente activo en el proceso de construcción del conocimiento, para la aplicación práctica de las técnicas de valoración biomecánica. Mediante las clases prácticas, el docente buscará contribuir al desarrollo de habilidades profesionales para “identificar las alteraciones de los movimientos ocasionados por daños del sistema musculoesquelético de los pacientes”. De este modo, los alumnos estarán en mejores condiciones para diseñar la intervención ortoprotésica de acuerdo con las necesidades del paciente (Fig. 21).

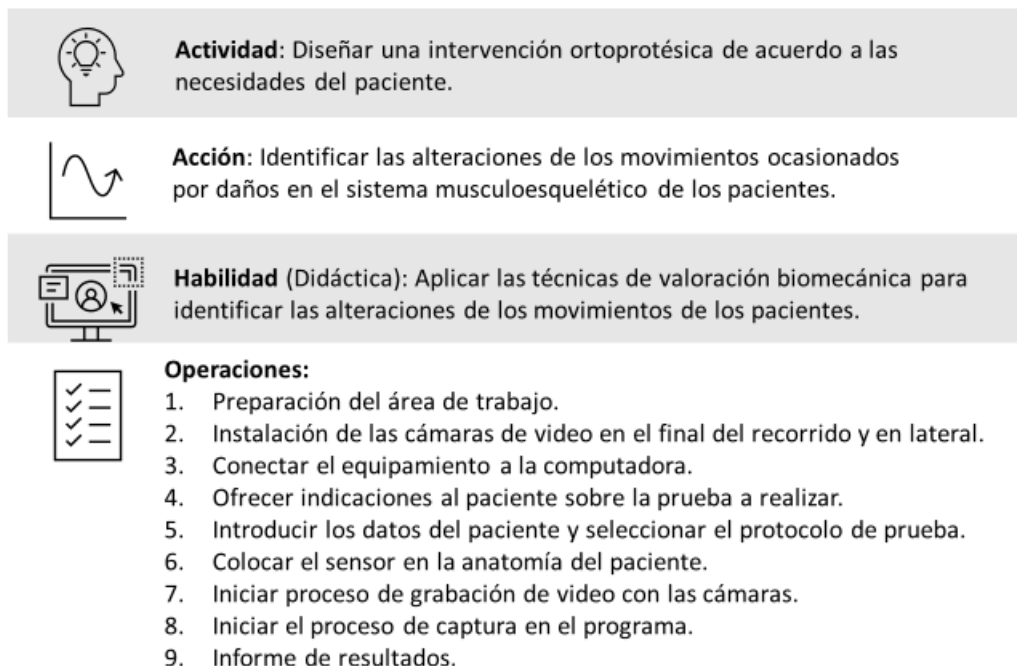


Fig. 21. Relación entre la actividad, acción, habilidades y operaciones que se requieren desarrollar en la actividad práctica.

Después de abordar temas relacionados con la valoración de los movimientos con la tecnología, se debe orientar la práctica de laboratorio. Para ellos se sugiere que los docentes pongan a disposición de los estudiantes el documento en PDF con las instrucciones detalladas de la prueba, así como los audiovisuales. Ambos materiales contienen información para la autopreparación de los alumnos. En las guías de las prácticas se ponen a disposición tres casos de estudio. El docente puede escoger otros casos de estudios de acuerdo a la dinámica con la que se desarrolle el tema o la necesidad de abordar nuevos casos.

La evaluación de la práctica se desarrollará en tres momentos, al inicio, durante y al final (Fig. 22). Esto con la finalidad de comparar la formación de conocimiento mediante el proceso enseñanza-aprendizaje. En la guía de la práctica se pone a disposición del estudiantado las indicaciones para desarrollar la práctica y de las evaluaciones.

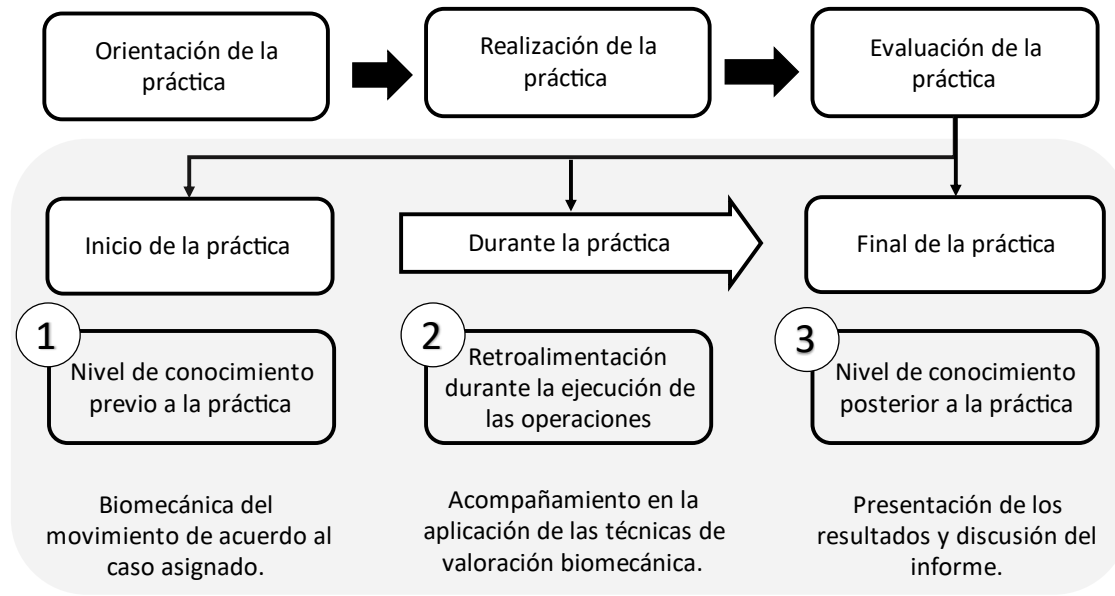


Fig. 22. Esquema de la evaluación del proceso de enseñanza-aprendizaje en tres momentos de la práctica.

Guía de la práctica.

Objetivo:

Identificar las alteraciones de la marcha provocadas por daños al sistema musculoesquelético mediante el empleo del sensor inercial.

Caso 1:

Se trata de paciente masculino de 35 años, el cual se presenta a la valoración tras una lesión de tobillo que causa dolor y molestia al caminar. Durante la exploración física se observa asimetría postural, con movimiento asimétricos durante la marcha y claudicación de importancia.

Caso 2:

Se trata de paciente femenino de 4 años con Dx de Parálisis Cerebral Infantil PCI, el cual es enviado por el servicio de pediatría para seguimiento de aplicación de tratamiento a través de valoración con laboratorio de movimiento.

Caso 3:

Se trata de masculino de 30 años, el cual se presenta a valoración funcional enviado del área de ortopedia tras retiro de yeso post fractura de fémur con evolución de 6 semanas, se pide evaluar la simetría del movimiento durante la marcha con apoyo de bastón.

Si usted fuera a evaluar la marcha, indique:

- ¿Qué condiciones debe cumplir el lugar o laboratorio para realizar un examen de marcha?
- ¿Cuáles son las fases que se divide la marcha para su estudio?
- ¿Cuál es el porcentaje de duración de las fases de la marcha?
- ¿Cuál es el comportamiento esperado de la aceleración del baricentro en cada fase de marcha para un participante sano y para el paciente del caso asignado?
- ¿Cómo y con qué equipamiento se podría realizar una prueba objetiva de valoración de la marcha?
- En la prueba de marcha con el sensor inercial, ¿cuáles son las variables espacio temporales que se podrán analizar?

Instrumentos.

- Cinta métrica de 10 m.
- Conos de tránsito de 16 pulgadas.
- Cinta adhesiva reflejante.
- Laptop con el sistema G-Studio.
- Sensor inercial G-Sensor.
- Cinturón.
- Dos cámaras de video y trípodes.

Técnica operatoria.

1. Preparación del área de trabajo.
2. Instalación de las cámaras de video en el final del recorrido y en lateral.
3. Conectar el equipamiento a la computadora.
4. Ofrecer indicaciones al paciente sobre la prueba a realizar.
5. Introducir los datos del paciente y seleccionar el protocolo de prueba.
6. Colocar el sensor en el paciente.
7. Iniciar proceso de grabación de video con las cámaras.
8. Iniciar el proceso de captura en el programa.
9. Informe de resultados.

Informe de la clase práctica de laboratorio.

Elabore un informe en el que incluirá la descripción de la patología enunciada en la introducción, así como las posibles causas. Incluya los gráficos del reporte de la prueba y realice un comentario sobre lo que está observando. A manera de conclusión, recomiende un dispositivo para apoyar la marcha de este paciente.

Estructura del reporte:

En la primera página deberá incluir los datos de la institución, la materia y semestre que cursa, su nombre y el de los profesores. Además, deberá estructurar el trabajo con una Introducción, el Desarrollo, las Conclusiones y Referencias.

Prepare una presentación para la discusión de la práctica en el salón de clases.

Referencias.

- Aqueveque, P., Germany, E., Osorio, R., & Pastene, F. (2020). Gait Segmentation Method Using a Plantar Pressure Measurement System with Custom-Made Capacitive Sensors. *Sensors*, 20(3), 656. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/656>
- Chastan, N., Westby, G. W. M., Montcel, S. T. d., Do, M. C., Chong, R. K., Agid, Y., & Welter, M. L. (2010). Influence of sensory inputs and motor demands on the control of the centre of mass velocity during gait initiation in humans. *Neuroscience Letters*, 469(3), 400-404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.12.038>
- Devetak, G. F., Bohrer, R. C. D., Rodacki, A. L. F., & Manffra, E. F. (2019). Center of mass in analysis of dynamic stability during gait following stroke: A systematic review. *Gait & Posture*, 72, 154-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.06.006>
- Di Gregorio, R., & Vocenas, L. (2021). Identification of Gait-Cycle Phases for Prosthesis Control. *Biomimetics (Basel)*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6020022>
- Fong, D. T.-P., & Chan, Y.-Y. (2010). The Use of Wearable Inertial Motion Sensors in Human Lower Limb Biomechanics Studies: A Systematic Review. *Sensors*, 10(12), 11556-11565. <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/12/11556>
- Fusca, M., Perego, P., & Andreoni, G. (2018). Method for Wearable Kinematic Gait Analysis Using a Harmonic Oscillator Applied to the Center of Mass. *Journal of Sensors*, 2018, 4548396. <https://doi.org/10.1155/2018/4548396>
- Gouelle, A., & Mégrot, F. (2017). Interpreting Spatiotemporal Parameters, Symmetry, and Variability in Clinical Gait Analysis. In B. Müller, S. I. Wolf, G.-P. Brueggemann, Z. Deng, A. McIntosh, F. Miller, & W. S. Selbie (Eds.), *Handbook of Human Motion* (pp. 1-20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30808-1_35-1
- Han, Y. C., Wong, K. I., & Murray, I. (2019). Gait Phase Detection for Normal and Abnormal Gaits Using IMU. *IEEE Sensors Journal*, 19(9), 3439-3448. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894143>
- López-Nava, I. H., & Muñoz-Meléndez, A. (2016). Wearable Inertial Sensors for Human Motion Analysis: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 16(22), 7821-7834. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2609392>
- Lugade, V., Lin, V., & Chou, L.-S. (2011). Center of mass and base of support interaction during gait. *Gait & Posture*, 33(3), 406-411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.12.013>
- Mariana Haro, D. (2014). Laboratorio de análisis de marcha y movimiento. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 25(2), 237-247. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0716-8640\(14\)70034-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0716-8640(14)70034-3)
- Mohammed, S., Samé, A., Oukhellou, L., Kong, K., Huo, W., & Amirat, Y. (2016). Recognition of gait cycle phases using wearable sensors. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 50-59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.10.012>
- Ridao-Fernández, C., Pinero-Pinto, E., & Chamorro-Moriana, G. (2019). Observational Gait Assessment Scales in Patients with Walking Disorders: Systematic Review. *BioMed Research International*, 2019, 2085039. <https://doi.org/10.1155/2019/2085039>
- Willems, P. A., Schepens, B., & Detrembleur, C. (2012). Marcha normal. *EMC - Kinesiterapia - Medicina Física*, 33(2), 1-29. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1293-2965\(12\)61944-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1293-2965(12)61944-6)