



IBEROAMERICANA
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA

2019

Instrumentación de una máquina de remo para sujetos con lesión medular, y su uso para la evaluación biomecánica

**Angie Stephanie Vega Toro
Angélica María Ramírez Martínez
Sandra Shefelbine**

**Fisioterapia
Facultad de Ciencias de la Salud
Corporación Universitaria
Iberoamericana**



Instrumentación de una máquina de remo para sujetos con lesión medular, y su uso
para la evaluación biomecánica

Instrumentation of a rowing machine for subjects with spinal cord injury, and its use for
biomechanical evaluation

Angie Stephanie Vega Toro
Corporación Universitaria Iberoamericana

Angélica María Ramírez Martínez
Universidad Central

Sandra Shefelbine
Northeastern University

Diciembre 20 de 2019

Resumen

El ejercicio de remo puede ser aplicado en ámbitos deportivos, recreacionales, clínicos y de rehabilitación. Para poder ampliar el ejercicio del remo fuera del agua se ha diseñado una máquina que simula la ejecución de movimiento. Así mismo, para la aplicación del ejercicio de remo en la rehabilitación, específicamente en el caso de sujetos con lesión medular, se ha instrumentado la máquina de remo para que éstos sujetos puedan ejecutar el movimiento. Por tanto, además de sólo permitir la ejecución del ejercicio, el proceso de instrumentación de una máquina tiene como meta la evaluación del gesto de movimiento, específicamente en lo que a variables biomecánicas se refiere. Uno de los intereses principales en la evaluación de movimiento deportivo con el uso de la instrumentación, es la adquisición de datos no sólo de movimiento, sino también de reacciones articulares en términos de fuerza. De manera que se requiere generar un proceso de instrumentación de una máquina de remo, para la adquisición de datos de movimiento y fuerza de reacción de brazos y pies, que además pueda ser utilizada en sujetos con lesión medular. De esta forma, el objetivo de éste proyecto es realizar la adaptación de la máquina de remo para la práctica de éste ejercicio por parte de sujetos con lesión medular, permitiendo la medición de variables cinemáticas y cinéticas.

Palabras Clave: Desempeño Psicomotor, Deportes Acuáticos e Ingeniería Biomédica.

Abstract

The rowing exercise can be applied in sports, recreational, clinical and rehabilitation fields. In order to extend the exercise of rowing out of the water, a machine that simulates the execution of movement has been designed. Likewise, for the application of rowing exercise in rehabilitation, specifically in the case of subjects with spinal cord injury, the rowing machine has been instrumented so that these subjects can execute the movement. Therefore, in addition to only allowing the execution of the exercise, the process of instrumentation of a machine has as its goal the evaluation of the movement gesture, specifically as regards biomechanical variables. One of the main interests in the evaluation of sports movement with the use of instrumentation is the acquisition of data not only of movement, but also of joint reactions in terms of strength. So it is necessary to generate a process of instrumentation of a rowing machine, for the acquisition of movement data and reaction force of arms and feet, which can also be used in subjects with spinal cord injury. In this way, the objective of this project is to adapt the rowing machine for the practice of this exercise by subjects with spinal cord injury, allowing the measurement of kinematic and kinetic variables.

Key Words: Psychomotor Performance, Water Sports and Biomedical Engineering.

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	10
Capítulo 1 – Antecedentes, Justificación, Fundamentación Conceptual y Teórica	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Justificación	11
1.2.1 Lesión Medular	11
1.2.2 Ejercicio de Remo	13
1.2.3 Ejercicio de Remo y Lesión Medular	15
1.3 Marco Conceptual	15
1.3.1 Lesión Medular	15
1.3.2 Ejercicio de remo	16
Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo	177
2.1 Procedimiento e Instrumentos	17
2.1.1 Diseño para la adaptación de la máquina para sujetos con lesión medular	17
2.1.2 Diseño para la instrumentación de la máquina para sujetos con lesión medular	18
2.1.3 Evaluación del proceso de adaptación e instrumentación	20
2.2 Adquisición de datos	21
2.3 Procesamiento de datos	22
Capítulo 3 – Resultados y Discusión	23
Capítulo 4 – Producción Asociada al Proyecto	25
Anexos	26
Referencias	27
Índice de Figuras	32

INTRODUCCIÓN

El ejercicio de remo puede ser aplicado en ámbitos deportivos, recreacionales, clínicos y de rehabilitación. Para poder ampliar el ejercicio del remo fuera del agua se ha diseñado una máquina que simula la ejecución de movimiento (Jin-sun Kim et al., 2016). Así mismo, para la aplicación del ejercicio de remo en la rehabilitación, específicamente en el caso de sujetos con lesión medular, se ha instrumentado la máquina de remo para que éstos sujetos puedan ejecutar el movimiento (Draghici, Picard, Taylor, & Shefelbine, 2017).

Por sus ventajas, el ejercicio del remo permite ser aplicado en la rehabilitación de diferentes condiciones; ejemplo de ésta condición son los sujetos con lesión medular. En el tratamiento de esta población se han desarrollado diferentes formas de generar mayores activaciones músculo-esqueléticas y sistémicas (Andrews, Gibbons, & Wheeler, 2017) (Jung, Park, Lee, & Kim, 2012) (Davoodi, Andrews, Wheeler, & Lederer, 2002). Una de estas formas está representada por el uso del ejercicio del remo como movimiento cíclico similar a la marcha, con la asistencia dada por la máquina de remo instrumentada que permite la acomodación del paciente con lesión medular según sus condiciones (Draghici et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002).

Es así que además de permitir la ejecución del ejercicio, el proceso de instrumentación de una máquina tiene como meta la evaluación del gesto de movimiento, específicamente en lo que a variables biomecánicas se refiere. Uno de los intereses principales en la evaluación de movimiento deportivo con el uso de la instrumentación, es la adquisición de datos no sólo de movimiento, sino también de reacciones articulares en términos de fuerza.

El proceso de instrumentación de una máquina de remo es desarrollado para la evaluación del gesto deportivo a partir de la adquisición de datos que caracterizan el movimiento. En sujetos con lesión medular, se han desarrollado aproximaciones a la instrumentación de máquinas en deportes como el ciclismo (Jamil & Sherwani, 2015). Para el caso del remo, el proceso de instrumentación se ha utilizado para realizar

entrenamientos que permiten la mejora de la condición cardiovascular en estos sujetos (Draghici et al., 2017) (D. I. Kim, Park, Lee, & Jeon, 2014) (Shephard, 1998), teniendo en cuenta las características en la ejecución de movimiento en la que se involucran grandes grupos musculares (Jones, Allanson-Bailey, Jones, & Holt, 2010) (Kornecki & Jaszczak, 2010).

El diseño para la instrumentación de la máquina de remo ha considerado una silla para la estabilización de tronco, así como apoyo a nivel de las piernas para la ejecución de movimiento en los miembros inferiores (Laskin et al., 1993). En el diseño además se considera una silla dinámica y una base de los pies estática, que con un sistema de resortes permite la transición en el gesto de movimiento (“An Improved Functional Electrical Stimulation (FES) Rowing Device [University of Alabama at Birmingham] | RESNA Student Design Competition,” n.d.). En relación a la instrumentación para la toma de datos en la máquina de remo, se han desarrollado aproximaciones para cuantificar el desempeño cinemático y cinético (M. Hofmijster, n.d.). En algunos casos se considera el ejercicio de remo como un movimiento uniplanar desarrollado en el plano sagital, utilizando un sensor ubicado en la silla de la máquina para obtener los datos de la translación antero-posterior de la cadera, y de esta manera calcular el movimiento de la rodilla en flexión y extensión (Hawkins, 2000).

Por otro lado, se encuentran los sistemas optoelectrónicos, con los cuales se realiza el análisis cinemático tridimensional de las diferentes articulaciones (Skublewska-Paszowska, Lukasik, & Smolka, 2016) (E. Buckeridge, Hislop, Bull, & McGregor, 2012) (Sforza, Casiraghi, Lovecchio, Galante, & Ferrario, 2012) (Kornecki & Jaszczak, 2010) (Pudlo, Pinti, & Lepoutre, 2005) (Hase, Kaya, Zavatsky, & Halliday, 2004). Para el análisis cinético se hace uso de sensores unidireccionales para determinar las fuerzas de reacción a nivel de los miembros superiores (E. Buckeridge et al., 2012) (Černe, Kamnik, & Munih, 2011) (Kornecki & Jaszczak, 2010) (Hase et al., 2004), y para medir la fuerza normal del apoyo de los pies (Černe, Kamnik, Vesnicer, Žganec Gros, & Munih, 2013), junto con el uso de las plataformas de fuerza (Pudlo et al., 2005) (Hase et al., 2004).

Pese a que la literatura reporta algunas aplicaciones del ejercicio de remo a partir de la instrumentación de la máquina para sujetos con lesión medular, aún faltan reportes sobre el proceso de diseño que permita entender mejor la adaptación e instrumentación de la máquina para ser utilizada en sujetos con lesión medular, tanto para la evaluación biomecánica, como para la ejecución del gesto de movimiento.

De manera que se requiere generar un proceso de instrumentación de una máquina de remo, para la adquisición de datos de movimiento y fuerza de reacción de brazos y pies, que además pueda ser utilizada en sujetos con lesión medular. De esta forma, el objetivo de éste proyecto es realizar la adaptación de la máquina de remo para la práctica de éste ejercicio por parte de sujetos con lesión medular, permitiendo la medición de variables cinemáticas y cinéticas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar la adaptación de la máquina de remo para la práctica de éste ejercicio por parte de pacientes con lesión medular, permitiendo la medición de variables cinéticas y cinemáticas.

Objetivos Específicos

1. Adaptar la máquina de remo utilizada en sujetos saludables, para sujetos con lesión medular teniendo en cuenta los requerimientos necesarios para éste tipo de población.
2. Establecer en la máquina adaptada la instrumentación necesaria para la toma de datos cinemáticos y cinéticos en el ejercicio del remo para pacientes con lesión medular.
3. Comprobar el funcionamiento de la máquina de remo adaptada e instrumentada para la toma de datos cinéticos y cinemáticos en sujetos con lesión medular en la práctica del ejercicio del remo.

Capítulo 1 – Antecedentes, Justificación, Fundamentación Conceptual y Teórica

1.1 Antecedentes

Existen distintos tipos de máquinas para realizar entrenamiento físico de acuerdo a la necesidad de los sujetos. Ejemplo de estas aplicaciones pueden ser: acondicionamiento físico, reducción de peso, rehabilitación, entre otras. Dentro del acondicionamiento físico se encuentran máquinas que permiten realizar ejercicios cardiovasculares y fortalecer distintas áreas del cuerpo. La máquina de remo ejercita la mayoría de los grupos musculares simultáneamente imitando el movimiento real del remo en el agua. Una de las principales ventajas de la máquina de remo en comparación con otras máquinas de ejercicio cardiovascular es el bajo impacto en las articulaciones, así como se desarrollan una mejor coordinación y concentración.

El ejercicio del remo permite por sus ventajas ser aplicado en la rehabilitación de diferentes condiciones; ejemplo de ésta condición son los pacientes con lesión medular. Es así, que en el tratamiento de pacientes con lesión medular se han desarrollado diferentes formas de generar mayores activaciones músculo-esqueléticas y sistémicas (Draghici et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002). Una de estas formas está representada por el uso del ejercicio del remo como movimiento cíclico similar a la marcha, con uso de la asistencia dada por la máquina de remo instrumentada que permite la acomodación del paciente con lesión medular según sus condiciones (Andrews et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002) (Wheeler et al., 2002).

Davoodi y cols., en 2002 desarrollaron una máquina de remo instrumentada con un sistema manual de activación de electroestimulación funcional (FES), la cual contaba con un sistema de estabilidad de tronco, con ajustes para la espalda para dar la estabilidad necesaria al tronco según el caso. Adicionalmente, este mecanismo cuenta con seguros para la estabilidad en los miembros inferiores para una mejor adaptación del mecanismo FES (Davoodi et al., 2002). La máquina instrumentada de remo cuenta con diferentes mecanismos que complementan la estabilidad de las estructuras corporales en pacientes

con lesión medular. Mecanismos como: soporte de pies, y apoyo en las manos para la transmisión de fuerzas y la activación del sistema FES.

En el año 2017 se presenta en el VIII Congreso Internacional de Ingenierías Mecánica y Mecatrónica y VI de Material, Energía y Medio Ambiente el trabajo titulado “Instrumentación de una Máquina de Remo para Análisis Tridimensional Cinemático y Cinético” por parte el Grupo COMMNOS de la Universidad Central, en la que se estructuró un protocolo de instrumentación para el análisis cinemático y cinético de movimiento en la máquina de remo aprobado para los estudios sobre la máquina en personas saludables. A partir de esto se pretende realizar la instrumentación de la máquina de remo para pacientes con lesión medular.

1.2 Justificación

1.2.1 Lesión Medular

La limitación de movimiento causada por la LM conlleva a la pérdida de la independencia y presencia de diferentes grados de discapacidad, viéndose afectada de forma negativa la calidad de vida de la persona. Según reporte dado al año 2013 por la Organización Mundial de la Salud (OMS), al menos 500.000 personas sufren lesiones medulares cada año (“Organización Mundial de la Salud,” n.d.). A nivel mundial, entre los años 1959 y 2011, el rango de prevalencia global para la LM fue de 236 a 4187 casos por millón de habitantes, y al año 2007, el rango de incidencia global fue de 133 a 226 miles de casos de LM dados por accidentes, auto-lesiones o violencia. En la Región de Latino América (Tropical), específicamente en Brasil, la incidencia anual es de 10 - 29 por millón de habitantes (“International Spinal Cord Society | ISCoS,” n.d.). Para el caso de Colombia la LM ocurre en 1 de cada 40 pacientes que ingresan en hospitales debido a causas traumáticas. Además, en centros de atención médica de todos los niveles de complejidad, una de las razones más frecuentes de consulta es la LM como resultado de la violencia en el país y los accidentes de tránsito (Perrin, Morlett, Leonor, & Esteban, 2017). Para la

ciudad de Bogotá, la edad de las personas con LM es en promedio de 35,8 años, en una relación de 4,1:1 (hombre:mujer) (Perrin et al., 2017).

En términos de discapacidad, Bogotá cuenta con el mayor número de personas en esta situación, con un valor de 285.392, y 64.12% de ellas no presenta ningún tipo de ingreso económico. El movimiento del cuerpo y extremidades representa la alteración que más afecta a las personas con discapacidad (34,2%), y de las actividades en las que participan, las deportivas se encuentran en un tercer lugar (11%) (Oficina & Febrero, 2018). En relación a los costos anuales asociados a la atención de individuos con LM, se presenta un estimado de 31 billones de pesos en Norte América, que puede incrementarse al contemplar la cantidad de hospitalizaciones, y la presencia de condiciones patológicas asociadas o relacionadas a la falta de tratamiento (French, Campbell, & Sabharwal, 2007).

La ausencia de una rehabilitación oportuna y efectiva incrementa el riesgo de mortalidad (“Organización Mundial de la Salud,” n.d.). En países subdesarrollados como en Colombia, la deficiencia en la atención ante la LM y sus posibles alteraciones secundarias, afecta las condiciones de vida tanto del individuo como de su entorno familiar y social, disminuye la capacidad productiva de la persona e igualmente impacta las finanzas del sistema de salud por el aumento de los costos por tratamiento de complicaciones clínicas asociadas (Cbtfe et al., 2011). Por tal razón, en estas regiones la tasa de supervivencia en individuos con LM es menor. Para atender esta problemática, la OMS ha reglamentado el tratamiento de individuos con LM, donde se incluye el uso de dispositivos de asistencia, así como el acceso a actividades lúdico-deportivas para favorecer el desempeño funcional, la autonomía y la relación social del individuo. Esta inclusión en actividades de motivación y participación activa, permite que se sobrepasen las barreras ambientales y sociales asociadas a la discapacidad, mejorando la percepción de los individuos en su calidad de vida y por consiguiente, asegurando una mayor adherencia al tratamiento de neurorehabilitación (Arango-lasprilla, Nicholls, & Leonor, 2010) (Patricia & Ernesto, 2016).

1.2.2 Ejercicio de Remo

Siendo que la práctica del ejercicio del remo durante el invierno se dificulta por las altas temperaturas, se han desarrollado metodologías simuladas para la ejecución de éste ejercicio en ambientes cerrados. Las máquinas desarrolladas que simulan el ejercicio del remo se componen de un manillar que es halado por los brazos haciendo girar el volante de inercia (damper) simulando la resistencia de la palada del agua. Los pies se aseguran en una base fija y la silla se desliza sobre un riel horizontal (Figura 1).

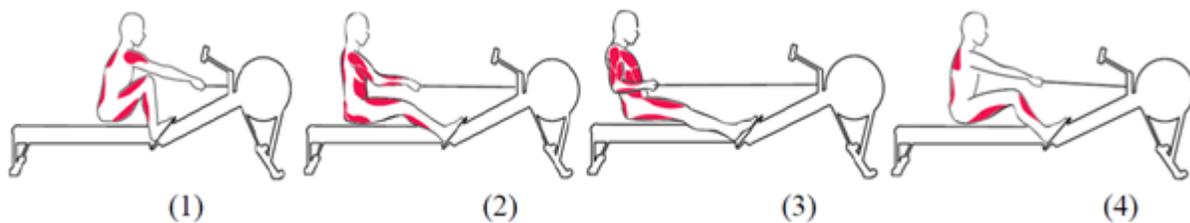


Figura 1. En el pase el remero inclina su cuerpo hacia adelante con las rodillas dobladas y los brazos extendidos hacia la rueda volante (a); efectúa todo el trabajo inicialmente con las piernas y la espalda (b), y al finalizar con los hombros y los brazos (c). En la recuperación se retoma la posición inicial primero extendiendo los brazos y doblando el torso hacia adelante con el fin de evitar roces entre las rodillas y las manos al mover el asiento hacia el frente (d). (Concept II).

El gesto de movimiento del remo comprende las fases de pase y recuperación (Figura 1). Cada ciclo del ejercicio del remo implica la flexión y la extensión completa de las piernas y brazos, lo que conlleva al reclutamiento de grandes grupos musculares (Hase et al., 2004) y por ello, al mejoramiento de la condición cardiovascular desempeño muscular y condición motora gruesa (Shephard & Shephard, 2016).

Con el fin de cuantificar el desempeño cinemático y cinético de los atletas, se han realizado diferentes aproximaciones de instrumentación tanto a los botes de remo, como a las máquinas de entrenamiento (M. J. Hofmijster, Lintmeijer, Beek, & van Soest, 2018).

Algunas aproximaciones que consideran el ejercicio de remo como un movimiento plano (plano sagital) utilizan un sensor ubicado en la silla de la máquina para conocer la traslación antero-posterior de la cadera y con ello calcular el movimiento de la rodilla en flexión-extensión (Baudouin & Hawkins, 2004). Con el avance de los sistemas opto electrónicos, se hizo posible el análisis cinemático tanto de las articulaciones de la extremidad inferior (Hase et al., 2004) como el análisis cinemático tridimensional de las articulaciones lumbar, hombro, codo y muñeca (E. Buckeridge et al., 2012) (Sforza et al., 2012). Para el análisis cinético se usan sensores unidireccionales que determinan las fuerzas de reacción de miembros superiores al halar el dámper (Suzanne E. Halliday, Zavatsky, & Hase, 2004) (E. M. Buckeridge, Bull, & McGregor, 2015) (Černe et al., 2011), y para hallar la fuerza normal (Černe et al., 2011) de apoyo de los pies. Quienes integran plataformas de fuerzas capturan la fuerza de reacción del pie en las tres direcciones (Suzanne E. Halliday et al., 2004).

Por otro lado, la práctica de ejercicio físico regular es un punto importante en la calidad de vida de los pacientes con lesión medular (Andrews et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002). En el tratamiento de éstos pacientes se han desarrollado métodos de activación similares al ejercicio cíclico de la marcha, que permiten un mayor reclutamiento muscular y mejores respuestas a nivel sistémico (Andrews et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002). Uno de los ejercicios adaptados para pacientes con lesión medular es el ejercicio del remo sobre ergómetro a través del uso de una máquina instrumentada.

El uso de la máquina de remo para la realización del ejercicio del remo de manera simulada permite un mejor rendimiento a nivel del sistema respiratorio, circular, digestivo, urinario y músculo-esquelético (Andrews et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002). Además, el ejercicio de remo para los pacientes con lesión medular presenta beneficios sobre el desarrollo muscular, óseo y circulatorio (Draghici et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002). Igualmente, el ejercicio del remo requiere de una condición de fuerza física para una rápida condición muscular que permite el reclutamiento de energía anaeróbica que de otro modo es difícil de desarrollar en

pacientes con lesión medular (Andrews et al., 2017) (Jung et al., 2012) (Davoodi et al., 2002).

1.2.3 Ejercicio de Remo y Lesión Medular

Las limitaciones que tienen los sujetos con lesión medular por su condición física hacen que sea difícil ubicar un ejercicio o actividad física de manera integral. Sin embargo, en el ejercicio del remo practicado desde el ergómetro presenta una opción terapéutica para los sujetos con esta condición. El ejercicio del remo tiene grandes ventajas debido a que es un ejercicio que trabaja uniformemente las extremidades inferiores, superiores incluyendo el tronco y permite desarrollo motriz del sujeto por medio de los movimientos sincronizados de acuerdo con la naturaleza del ejercicio (Miarka, Bello, Brito, Vaz, & Del Vecchio, 2018).

Las ventajas de implementar el ergómetro en la terapia para sujetos con lesión medular incluyen la realización del ejercicio en recintos cerrados, fuera del agua brindando seguridad y control. De acuerdo con los trabajos que se han realizado con este tipo máquinas siempre se requiere realizar adaptaciones e instrumentar, para controlar las variables del ejercicio y poder usar sistemas alternos como la electroestimulación para que los sujetos con lesión medular puedan realizar un trabajo completo sin la asistencia de otra persona (Davoodi et al., 2002) (Laskin et al., 1993).

1.3 Marco Conceptual

1.3.1 Lesión Medular

La médula espinal tiene una forma cilíndrica, con característica blanda, rodeada por la columna vertebral. Tiene como inicio la unión con el bulbo raquídeo y termina en la carilla superior de la vértebra lumbar 2. Su función radica en la transmisión de información

sensitiva hacia las estructuras cerebrales y de forma consecuente participa en la regulación de la función motora y autónoma en el cuerpo humano. Cualquier daño o lesión en la médula espinal, puede producir alteraciones de estas funciones, por debajo del nivel vertebral afectado (Ruz, 2010).

Posterior a la lesión, además de la pérdida de la función voluntaria, se presentan cambios inmunológicos que deterioran la función autonómica afectando órganos y sistemas, incluyendo intestino, riñón y bazo. Igualmente, el metabolismo de la glucosa se ve alterado y por consiguiente el uso de la energía, llevando a la presencia de catabolismo muscular principalmente dirigido a la masa muscular de extremidades inferiores. Así mismo, se presenta resistencia a la insulina por parte del músculo esquelético, disminución de la actividad mitocondrial, distribución anormal de grasa intramuscular y alteraciones en la actividad cardiovascular (Clark & Findlay, 2017).

Debido a la compleja naturaleza de la lesión medular, se presentan diversas estrategias terapéuticas que tratan la variedad de aspectos generados por el trauma dentro de las que se encuentra la Neuro-rehabilitación, basada en el ejercicio físico, el cual ha demostrado efectos benéficos a nivel celular y molecular que pueden traducirse en la recuperación del movimiento y la función (Sandrow-Feinberg & Houlé, 2015).

1.3.2 Ejercicio de remo

El remo en ergómetro es un deporte cíclico que consiste en una secuencia coordinada de movimiento que comprende las fases de pase y recuperación: en el pase, el remero inclina su cuerpo hacia adelante flexionando las rodillas con los brazos extendidos desplazándose hacia la rueda volante; efectúa todo el trabajo inicialmente con las piernas y el tronco superior desde la cadera y al finalizar esta fase, con los hombros y los brazos. En la recuperación, se retoma la posición inicial flexionando los brazos con las piernas en extensión, moviendo el asiento hacia atrás. Para lograr una mayor velocidad del sistema (E. Buckeridge et al., 2012), se requiere que estos movimientos, repetidos de

manera cíclica, se combinen de una forma precisa, continua y fluida (Kane, Jensen, Williams, & Watts, 2008) generando la potencia suficiente para el desplazamiento del bote (Černe et al., 2011).

El entrenamiento en remo es desarrollado en gran parte en el agua, pero los ergómetros de remo permiten la simulación de las demandas biomecánicas y metabólicas de remar en el agua, y dan la posibilidad de establecer pruebas y evaluaciones con parámetros estandarizados, que en el agua son difíciles de controlar (Greene, Sinclair, Dickson, Colloud, & Smith, 2013).

Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo

2.1 Procedimiento e Instrumentos

La instrumentación de la máquina de remo, y la prueba de su funcionamiento se divide en los siguientes pasos:

1. Diseño para la adaptación de la máquina para sujetos con lesión medular
2. Diseño para la instrumentación de la máquina para sujetos con lesión medular
3. Evaluación del proceso de adaptación e instrumentación

2.1.1 Diseño para la adaptación de la máquina para sujetos con lesión medular

La adaptación correcta de la máquina depende del reconocimiento de los componentes del ergómetro y las fases del ejercicio del remo.

El ergómetro de remo está compuesto por un manillar (permite la sujeción de las manos) que hace girar un volante de inercia o (damper), simulando la resistencia de la palada en el agua. En la estructura del ergómetro se encuentra una silla donde se sienta la persona que va a realizar el ejercicio permitiendo el desplazamiento axial direccionado por un riel

que tiene el soporte para los pies y permite realizar el ejercicio (Retailleau, Domalain, Ménard, & Colloud, 2017) (Gorgey, Caudill, & Khalil, 2016).

El gesto de movimiento del remo comprende las fases de pase y recuperación (Figura 1). Cada ciclo del ejercicio del remo implica la flexión y la extensión completa de las piernas y brazos, lo que conlleva al reclutamiento de grandes grupos musculares (Suzanne E. Halliday et al., 2004) y por ello, al mejoramiento de la condición cardiovascular desempeño muscular y condición motora gruesa (Shephard & Shephard, 2016).

En sujetos con LM su condición no les permite desarrollar el ejercicio independientemente y es necesario implementar un sistema de asistencia al movimiento que le permita ejecutar la secuencia del ejercicio. Este sistema consiste en un electroestimulador funcional, aplicado sobre las estructuras musculares de los miembros inferiores, durante la ejecución de movimiento (Cameron, Rodríguez Rodríguez, & GEA Consultoría Editorial., 2009).

Se requiere apoyar el proceso de rehabilitación de sujetos con lesión medular (LM), con nivel T8 o menor, que realizan el ejercicio de remo en un ergómetro asistido con electroestimulación. El problema radica en que, durante este ejercicio, el desplazamiento en las fases iniciales y terminales se dificulta ya que son los puntos donde cambia el sentido del movimiento por lo que debe ejercerse más fuerza para romper la inercia. Adicionalmente, en estos mismos instantes de tiempo, se requiere controlar el encendido del electroestimulador que activa los músculos extensores y flexores de la rodilla.

Para el desarrollo de cada uno de los sistemas del remo se deben definir los requerimientos del usuario y de ingeniería que permitan cumplir los estándares mínimos determinados mediante procesos de diseño.

2.1.2 Diseño para la instrumentación de la máquina para sujetos con lesión medular

- Sistema de captura para análisis cinemático

El movimiento tridimensional se captura a través del sistema optoelectrónico SMART-E @ 50Hz (BTS Bioeng, Italia) de la Universidad Central. Se hace uso 27 marcadores reflectivos, puestos sobre el paciente de acuerdo al modelo de modelo Davis (Vaughan, Davis, & O'Connor, 1999), modificándolo al cambiar la posición del marcador intermedio de cada segmento, con el fin de evitar la oclusión de puntos durante el movimiento y de asegurar la existencia de al menos 3 marcadores no colineales por segmento. Se definen así los segmentos de pies, pierna, muslo, torso, brazo y antebrazo.

- Instrumentación para el análisis cinético

Se elige instrumentar la máquina de remo Concept II, Modelo D-PM5 (Morrisville, USA) por ser una de las más utilizadas para el entrenamiento y la investigación (Hase et al., 2004) (Suzanne E. Halliday et al., 2004) (Suzanne E. Halliday et al., 2004) (Lintmeijer, Hofmijster, Schulte Fishedick, Zijlstra, & Van Soest, 2018) (M. J. Hofmijster, Van Soest, & De Koning, 2008) (E. M. Buckeridge et al., 2015) (Sforza et al., 2012). A ésta se le adaptan dos celdas de carga: una para medir la fuerza de reacción en el apoyo en los pies y otra para medir la fuerza de reacción de los brazos (Figura 2).

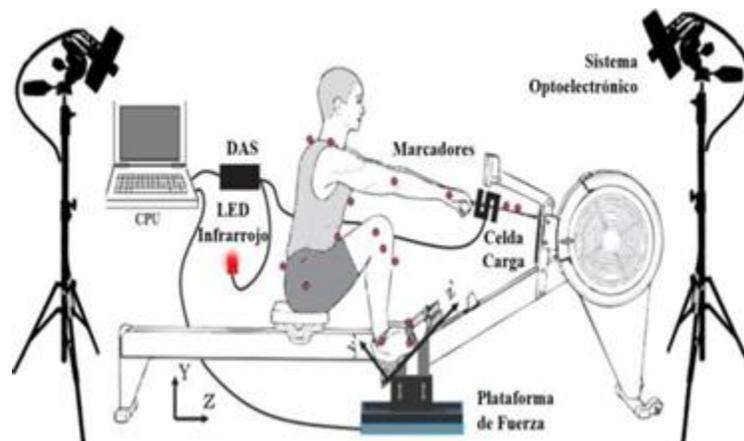


Figura 2. Esquema del sistema de instrumentación de la máquina de remo.

- Fuerza en los pies

Para medir la fuerza de reacción tridimensional en el apoyo del pie derecho, se usa una plataforma KISTLER 9286A sobre la que se soporta una estructura ajustable en altura y ángulo, la cual transmite la fuerza desde el pie a la plataforma. Se contrarrestar la inercia del empuje ejercido por el pie utilizando un contrapeso de (100 Kg) de acuerdo a las reacciones máximas reportadas por (Černe et al., 2011).

La adquisición de la plataforma se realiza por medio del SMART-E del sistema optoelectrónico, esto permite conocer el punto de presión, la magnitud de la fuerza y los momentos generados. Los datos registrados por la plataforma tienen un sistema coordenado X-Y-Z.

- Fuerza en las manos

Para obtener datos de la fuerza de reacción realizada por los brazos, se mide la tensión de la cadena ubicando una celda de carga entre el manillar y la cadena. De acuerdo con el valor máximo (816 N) registrado por (Černe et al., 2011) (Černe et al., 2011). La celda de carga utilizada es tipo 'S' LEXUS la cual tiene una capacidad máxima de 100 kg. Se ubicarán dos marcadores en el manillar para que el sistema BTS pueda rastrear su trayectoria (Figura 2).

La sincronización entre los dos sistemas de adquisición se da a través del sistema optoelectrónico el cual reconoce una señal de un LED de emisión de luz infrarroja incorporado en el Arduino-Matlab (Software MatLab) el cual es activado y desactivado al superar el umbral de 5 Kg (Figura 2).

2.1.3 Evaluación del proceso de adaptación e instrumentación

- Población

Una persona no entrenada (mujer, peso=50 kg, altura=1.68 m), firmó el consentimiento informado, y llevó a cabo una prueba sobre la máquina de remo, completando un recorrido de 500 m con el máximo nivel de resistencia en el dámper. Se realizó seguimiento a la frecuencia cardíaca durante la prueba para controlar la respuesta ante el ejercicio, manteniendo las pulsaciones en aquellas correspondientes al cálculo del submáximo de su frecuencia cardíaca de reserva.

2.2 Adquisición de datos

- Adquisición de datos del movimiento

La medición de los datos cinemáticos correspondientes a los ángulos de movimiento articular se realizó con el uso de un Sistema de Captura de Imagen, a partir de un modelo de marcadores (Vaughan et al., 1999) adaptado. Se obtuvieron los datos correspondientes a los ángulos de flexión y extensión, y rotación interna y externa, a nivel de hombro, codo, cadera, rodilla y tobillo, registrados durante todo el ciclo de movimiento.

- Adquisición de datos de fuerza para los brazos

Para obtener los datos de la fuerza de reacción proporcionada por los miembros superiores en la acción de tracción del manillar, se mide la tensión de la cadena ubicando una celda de carga entre ésta y el manillar (ver proceso de instrumento en la sección 2.1.2).

- Adquisición de datos de fuerza para los pies

Para obtener los datos de la fuerza de reacción proporcionada por los miembros inferiores, específicamente por el apoyo de los pies sobre el sistema de plataformas, se mide la fuerza ejercida y registrada por las plataformas de fuerza (ver proceso de instrumento en la sección 2.1.2).

2.3 Procesamiento de datos

Para estimar el movimiento corporal en tres dimensiones y la interacción con fuerzas externas se emplearon las herramientas Inverse Kinematics e Inverse Dynamics de OpenSim (Delp et al., 2007), respectivamente, siempre sobre el modelo biomecánico Full Body Model, seleccionado por su certificación para análisis clínico de la marcha (Jinsoo Kim et al., 2018). Debido a las características propias del ejercicio de remo, la posición de los marcadores, los límites de movimiento articular y los grados de libertad en la rodilla y el tobillo son adaptados para garantizar la adquisición sin problemas de oclusión.

Capítulo 3 – Resultados y Discusión

Gracias al proceso de instrumentación de la máquina de remo, se logró simular un recorrido de 500 metros ejecutado por el sujeto evaluado. Para el análisis se escogió un ciclo específico y en cuanto a la descripción de movimiento se encontraron los resultados expuestos en la figura 3, en la cual se evidencian los grados de movimiento, y las fuerzas de reacción de brazos y pies vs el porcentaje de ciclo del gesto deportivo, dividido en ataque y recuperación.

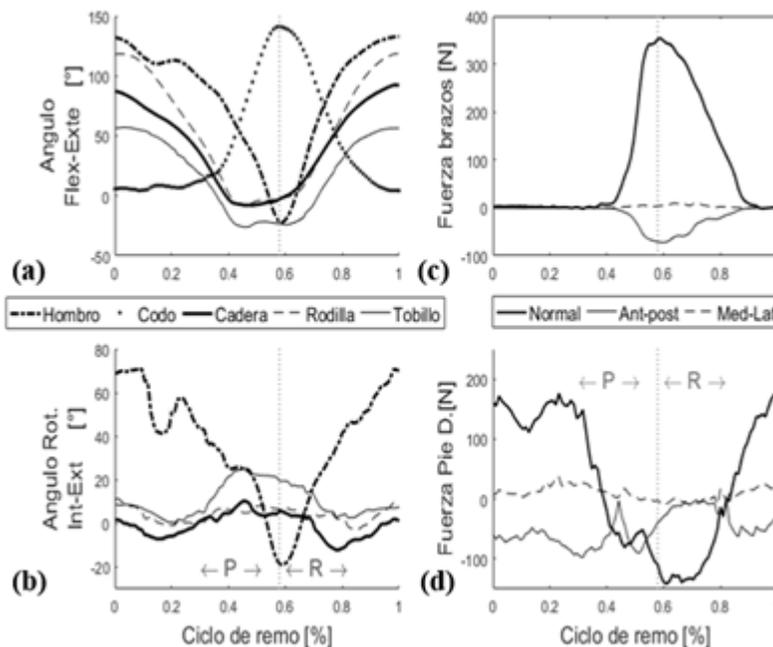


Figura 3. Movimiento de las articulaciones en flexo-extensión (a) y en rotación interna y externa (b). Fuerzas del sistema de instrumentación de los brazos (c) y el pie derecho (d).

Se observa un punto de inflexión en la gráfica de ángulos de flexión-extensión y rotaciones interna-externa diferente para miembros superiores e inferiores, siendo de 58% y 40% del ciclo de movimiento, respectivamente (figura 3). El comportamiento evidenciado en los rangos y patrones de movimiento resultó estar en concordancia con lo mostrado en anteriores estudios (Jin-sun Kim et al., 2016) (E. Buckeridge et al., 2012)

(S E Halliday, Zavatsky, Andrews, & Hase, 2001), con lo que se comprueba la efectividad de la adaptación de la máquina en relación al sistema de posicionamiento del sujeto y transición del movimiento de una fase a otra del ciclo del ejercicio.

La obtención de los datos cinemáticos comprobó la efectividad de la adaptación de la silla para la resolución del problema respecto a la obstrucción de los marcadores, el cual debido a la adaptación del sujeto con lesión medular a la máquina, representaría un problema al momento de la captura de movimiento.

En relación con los datos de la cinética, se encontró que entre el 60 y 65% del ciclo de movimiento se presentan las fuerzas máximas de los brazos, y entre el 23 y el 25% del ciclo se dan las máximas fuerzas de reacción del pie evaluado (derecho) (figura 3). La fuerza máxima de los brazos fue de 350N y la presentada en el pie evaluado fue de aproximadamente 200N. Las componentes anteroposterior y mediolateral de la fuerza de reacción en el pie alcanzan valores el 55% y 21%, respectivamente, de la componente normal máxima de la fuerza (175N) (figura 3). Estos hallazgos resultaron ser concordantes con aquellos presentados en la literatura(Černe et al., 2011) (Pudlo et al., 2005) (Hase et al., 2004). Por tanto, los análisis realizados sobre los datos de las fuerzas encontradas, comprueban inicialmente el funcionamiento de los mecanismos instrumentados para la medición de las fuerzas de reacción, así como permiten ser predictores de la correcta consecución del ejercicio que genere un efecto sobre el desarrollo de la fuerza durante el movimiento ejecutado.

La adquisición de datos cinemáticos y cinéticos, permitió en conjunto comprobar el funcionamiento de la adaptación e instrumentación de la máquina de remo, que aunque comprobada en un sujeto saludable, viabiliza el uso en sujetos con lesión medular, permitiendo tanto la ejecución de movimiento, como la medición de variables biomecánicas.

Capítulo 4 – Producción Asociada al Proyecto

A continuación, se presenta una relación de las actividades realizadas en el marco del desarrollo del proyecto de investigación.

EVENTO: “XXVI Congreso Nacional de Fisioterapia”.

TIPOLOGÍA: Ponencia Oral “Marco de Trabajo para el Análisis Cinemático Tridimensional de Extremidades Inferiores: Aplicación al Ejercicio del Remo”.

FECHA – LUGAR: 01, 02 y 03 de noviembre de 2019 – Barranquilla, Colombia.

EVENTO: “VI Congreso Internacional de Investigación en Salud y Envejecimiento & IV Congreso Internacional de Investigación en Salud”.

TIPOLOGÍA: Comunicación Oral “Electroestimulación en el Paciente con Lesión Medular: Revisión Bibliográfica”.

FECHA – LUGAR: 04 y 05 de julio de 2019 – Madrid, España (Participación Online).

EVENTO: “XIX Semana de Ingeniería y Ciencias Básicas – Universidad Central”.

TIPOLOGÍA: Póster “Modelo biomecánico computacional basado en la coordinación de movimiento para el desarrollo de un nuevo protocolo de electroestimulación aplicado a sujetos con lesión medular en el ejercicio de remo sobre ergómetro”.

FECHA – LUGAR: 22 al 25 de mayo de 2019 – Bogotá, Colombia

Anexos

ANEXO 1: EVIDENCIA DE ARTÍCULO DE MEMORIAS DE CONGRESO



Marco de trabajo para el análisis cinemático tridimensional de extremidades inferiores: Aplicación al ejercicio del remo

Angie Stephanie **Vega Toro**⁴; Nicolás **Figueroa Ceballos**²; Anderson Steven **Peña Sabogal**³; Angélica María **Ramírez-Martínez**¹

1 de Noviembre de 2019

¹ ORCID: 0000-0002-9186-5848

Filiación: Universidad Central.

Email: aramirezm3@ucentral.edu.co; amramirezm@unal.edu.co

² Filiación: Laboratorio de Análisis de Movimiento (MovyLab).

Email: nicolas.figueroace@gmail.com

³ Filiación: Universidad Politécnica de Valencia

Email: anpesa3@posgrado.upv.es; aspenas@unal.edu.co

⁴ ORCID: 0000-0002-5411-552X

Filiación: Corporación Universitaria Iberoamericana

Email: angie.vega@ibero.edu.co; asvegat@unal.edu.co

Palabras claves:

Movimiento, Fenómenos Biomecánicos y Deportes Acuáticos

Resumen:

El análisis tridimensional de movimiento ha sido desarrollado comúnmente alrededor del gesto de movimiento de la marcha. Davis describe la dinámica de la marcha humana como un ciclo de causa y efecto, en el que el proceso comienza con un impulso nervioso en el SNC y termina en la generación de fuerzas y momentos articulares a través de la tensión desarrollada por los músculos. Esta descripción funciona no únicamente para la marcha, sino que se extiende para el análisis de cualquier otro movimiento, como por el ejemplo, el del ejercicio de remo. En general, el análisis de este movimiento se hace con sistemas optoelectrónicos que adquieren la posición en el espacio de unos marcadores que han sido puestos sobre cada

Referencias

- An Improved Functional Electrical Stimulation (FES) Rowing Device [University of Alabama at Birmingham] | RESNA Student Design Competition. (n.d.). Retrieved December 19, 2019, from <https://sites.psu.edu/resnasdc/2014/06/05/an-improved-functional-electrical-stimulation-fes-rowing-device-university-of-alabama-at-birmingham/>
- Andrews, B., Gibbons, R., & Wheeler, G. (2017). Development of Functional Electrical Stimulation Rowing: The Rowstim Series. *Artificial Organs*, 41(11), E203–E212. <https://doi.org/10.1111/aor.13053>
- Arango-lasprilla, J. C., Nicholls, E., & Leonor, S. (2010). Health-related quality of life in individuals with spinal cord injury in Colombia , South America, 27, 313–319. <https://doi.org/10.3233/NRE-2010-0614>
- Baudouin, A., & Hawkins, D. (2004). Investigation of biomechanical factors affecting rowing performance. *Journal of Biomechanics*, 37(7), 969–976. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2003.11.011>
- Buckeridge, E., Hislop, S., Bull, A., & McGregor, A. (2012). Kinematic asymmetries of the lower limbs during ergometer rowing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(11), 2147–2153. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182625231>
- Buckeridge, E. M., Bull, A. M. J., & McGregor, A. H. (2015). Biomechanical determinants of elite rowing technique and performance. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(2), e176–e183. <https://doi.org/10.1111/sms.12264>
- Cameron, M. H., Rodríguez Rodríguez, L.-P., & GEA Consultoría Editorial. (2009). *Agentes físicos en rehabilitación : de la investigación a la práctica*. Elsevier. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Agents_Fisicos_en_Rehabilitacion.html?hl=es&id=SzOSEZqPiDMC&redir_esc=y
- Cbtf, S., Qfstqfdujwf, P. O., Eb, S., Patricia, C., Lema, H., Ernesto, J., & Parra, P. (2011). Modelo predictivo del grado de discapacidad en adultos con lesión medular : resultados desde el WHO-DAS II, 9(2), 159–172.
- Černe, T., Kamnik, R., & Munih, M. (2011). The measurement setup for real-time

biomechanical analysis of rowing on an ergometer. *Measurement*, 44(10), 1819–1827. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2011.09.006>

Černe, T., Kamnik, R., Vesnicer, B., Žganec Gros, J., & Munih, M. (2013). Differences between elite, junior and non-rowers in kinematic and kinetic parameters during ergometer rowing. *Human Movement Science*, 32(4), 691–707. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.11.006>

Clark, J. M., & Findlay, D. M. (2017). Musculoskeletal Health in the Context of Spinal Cord Injury. *Current Osteoporosis Reports*, 15(5), 433–442. <https://doi.org/10.1007/s11914-017-0400-1>

Davoodi, R., Andrews, B. J., Wheeler, G. D., & Lederer, R. (2002). Development of an indoor rowing machine with manual FES controller for total body exercise in paraplegia. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 10(3), 197–203. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2002.802880>

Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., ... Thelen, D. G. (2007). OpenSim : Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement, 54(11), 1940–1950.

Draghici, A. E., Picard, G., Taylor, J. A., & Shefelbine, S. J. (2017). Assessing kinematics and kinetics of functional electrical stimulation rowing. *Journal of Biomechanics*, 53, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.01.007>

French, D. D., Campbell, R. R., & Sabharwal, S. (2007). Health Care Costs for Patients With Chronic Spinal Cord Injury in the Veterans Health Administration, (May 2006), 477–481.

Gorgey, A. S., Caudill, C., & Khalil, R. E. (2016). Effects of once weekly NMES training on knee extensors fatigue and body composition in a person with spinal cord injury. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 39(1), 99–102. <https://doi.org/10.1179/2045772314y.0000000293>

Greene, A. J., Sinclair, P. J., Dickson, M. H., Colloud, F., & Smith, R. M. (2013). The effect of ergometer design on rowing stroke mechanics. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 23(4), 468–477. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01404.x>

Halliday, S E, Zavatsky, A. B., Andrews, B. J., & Hase, K. (2001). Kinematics of the Upper and Lower Extremities in Three-Dimensions during Ergometer Rowing. *Proc. in the*

International Society of Biomechanics Conference, (Figure 1), 22–24.

Halliday, Suzanne E., Zavatsky, A. B., & Hase, K. (2004). Can functional electric stimulation-assisted rowing reproduce a race-winning rowing stroke? *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(8), 1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.11.025>

Hase, K., Kaya, M., Zavatsky, A. B., & Halliday, S. E. (2004). Musculoskeletal loads in ergometer rowing. *Journal of Applied Biomechanics*, 20(3), 317–323. <https://doi.org/10.1123/jab.20.3.317>

Hawkins, D. (2000). A new instrumentation system for training rowers. *Journal of Biomechanics*, 33(2), 241–245. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(99\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(99)00139-6)

Hofmijster, M. (n.d.). *Mechanics and Energetics of Rowing*.

Hofmijster, M. J., Lintmeijer, L. L., Beek, P. J., & van Soest, A. J. K. (2018). Mechanical power output in rowing should not be determined from oar forces and oar motion alone. *Journal of Sports Sciences*, 36(18), 2147–2153. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1439346>

Hofmijster, M. J., Van Soest, A. J., & De Koning, J. J. (2008). Rowing skill affects power loss on a modified rowing ergometer. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(6), 1101–1110. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181668671>

International Spinal Cord Society | ISCoS. (n.d.). Retrieved April 26, 2019, from <https://www.iscos.org.uk/>

Jamil, M. M. A., & Sherwani, F. (2015). Framework Model Development for Spinal Cord Injury Application : Part 1, 1–5.

Jones, J. A., Allanson-Bailey, L., Jones, M. D., & Holt, C. A. (2010). An ergometer based study of the role of the upper limbs in the female rowing stroke. *Procedia Engineering*, 2(2), 2555–2561. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.031>

Jung, D. W., Park, D. S., Lee, B. S., & Kim, M. (2012). Development of a motor driven rowing machine with automatic functional electrical stimulation controller for individuals with paraplegia; a preliminary study. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 36(3), 379–385. <https://doi.org/10.5535/arm.2012.36.3.379>

Kim, D. I., Park, D. S., Lee, B. S., & Jeon, J. Y. (2014). A six-week motor-driven functional electronic stimulation rowing program improves muscle strength and body composition in

people with spinal cord injury: A pilot study. *Spinal Cord*, 52(8), 621–624. <https://doi.org/10.1038/sc.2014.76>

Kim, Jin-sun, Cho, H., Han, B., Yoon, S., Park, S., Cho, H., ... Lee, H. (2016). Comparison of Biomechanical Characteristics of, 26(1), 21–30.

Kim, Jinsoo, O'Neill, C., Pathak, K., Rajagopal, S. S., Moyne, M., Picard, G., ... Walsh, C. (2018). Automatically triggered fes rowing device for SCI patients with motorized return. *Frontiers in Biomedical Devices, BIOMED - 2018 Design of Medical Devices Conference, DMD 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1115/DMD2018-6824>

Kornecki, S., & Jaszczak, M. (2010). Dynamic analysis of rowing on concept II type c ergometer. *Biology of Sport*, 27(3), 187–194. <https://doi.org/10.5604/20831862.919338>

Laskin, J. J., Ashley, E. A., Olenik, L. M., Burnham, R., Cumming, D. C., Steadward, R. D., & Wheeler, G. D. (1993). Electrical stimulation-assisted rowing exercise in spinal cord injured people. A pilot study. *Paraplegia*, 31(8), 534–541. <https://doi.org/10.1038/sc.1993.87>

Lintmeijer, L. L., Hofmijster, M. J., Schulte Fishedick, G. A., Zijlstra, P. J., & Van Soest, A. J. “Knoek. (2018). Improved determination of mechanical power output in rowing: Experimental results. *Journal of Sports Sciences*, 36(18), 2138–2146. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1367821>

Miarka, B., Bello, F. D., Brito, C. J., Vaz, M., & Del Vecchio, F. B. (2018). Biomechanics of rowing: Kinematic, kinetic and electromyographic aspects. *Journal of Physical Education and Sport*, 18(1), 193–202. <https://doi.org/10.7752/jpes.2018.01025>

Oficina, S., & Febrero, S. (2018). Sala situacional de las Personas con Discapacidad (PCD) Ministerio de Salud y Protección Social Oficina de Promoción Social.

Organización Mundial de la Salud. (n.d.). Retrieved April 26, 2019, from <https://www.who.int/es>

Patricia, C., & Ernesto, H. J. (2016). Adherencia a procesos de neurorrehabilitación funcional y su relación con la discapacidad y la calidad de vida en adultos colombianos con lesión medular, 64, 69–77.

Perrin, P. B., Morlett, A., Leonor, S., & Esteban, J. (2017). Multiple mediation path model of pain ' s cascading influence on physical disability in individuals with SCI from Colombia , South America, 40, 553–560. <https://doi.org/10.3233/NRE-171442>

- Pudlo, P., Pinti, A., & Lepoutre, F. X. (2005). Experimental laboratory apparatus to analyze kinematics and 3D kinetics in rowing. *Sports Engineering*, 8(1), 39–46. <https://doi.org/10.1007/bf02844130>
- Retailleau, M., Domalain, M., Ménard, M., & Colloud, F. (2017). Kinematics of the lumbar muscles in rowing: a preliminary study. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20, 173–174. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1382918>
- Ruz, A. E. de. (2010). *Lesión medular: enfoque multidisciplinario*. Editorial Médica Panamericana. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=FJ_4QwAACAAJ&dq=LESION+MEDULAR+LIBRO+PANAMERICANA&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwic2YfV9vTdAhWorVkKHbffDnEQ6AEIKDAA
- Sandrow-Feinberg, H. R., & Houlé, J. D. (2015). Exercise after spinal cord injury as an agent for neuroprotection, regeneration and rehabilitation. *Brain Research*, 1619, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.03.052>
- Sforza, C., Casiraghi, E., Lovecchio, N., Galante, D., & Ferrario, V. F. (2012). A Three-Dimensional Study of Body Motion During Ergometer Rowing, 22–28.
- Shephard, R. J. (1998). Science and medicine of rowing: A review. *Journal of Sports Sciences*, 16(7), 603–620. <https://doi.org/10.1080/026404198366416>
- Shephard, R. J., & Shephard, R. O. Y. J. (2016). Science and medicine of rowing : A review Science and medicine of rowing : A review, 0414(February). <https://doi.org/10.1080/026404198366416>
- Skublewska-Paszkowska, M., Lukasik, E., & Smolka, J. (2016). Algorithms for Tennis Racket Analysis Based on Motion Data. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(31), 255–262. <https://doi.org/10.12913/22998624/64019>
- Vaughan, C. L., Davis, B. L., & O'Connor, J. C. (1999). *The Three-Dimensional and Cyclic Nature of Gait. Dynamics of Human Gait*. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(01\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00080-X)
- Wheeler, G. D., Andrews, B., Lederer, R., Davoodi, R., Natho, K., Weiss, C., ... Steadward, R. D. (2002). Functional electric stimulation-assisted rowing: Increasing cardiovascular fitness through functional electric stimulation rowing training in persons with spinal cord injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(8), 1093–

1099. <https://doi.org/10.1053/apmr.2002.33656>

Índice de Figuras

Figura 1. Fases de Movimiento en el Ejercicio del Remo.....	13
Figura 2. Esquema del sistema de instrumentación de la máquina de remo	19
Figura 3. Gráfica de resultados.....	23