

Rehabilitador multiterapéutico post-operatorio de rodilla controlado vía inalámbrica por dispositivos inteligentes (Smartphones).

González Sandoval, Carlos Augusto¹, Velázquez Castro, Joan Magdiel¹, LTF. Ruiz Aguirre, José Adrián², Dr. En C. Beltrán Ramírez, Jesús Raúl^{1,3}

¹Centro de Enseñanza Técnica Industrial (CETI Colomos), Guadalajara Jal. México.

²Unidad de atención a pacientes con quemaduras del Hospital Civil Nuevo de Guadalajara (Dr. Juan I. Menchaca), Guadalajara Jal. México.

³Departamento de sistemas de información, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas (CUCEA), Guadalajara Jal. México.

Resumen— Los actuales procesos de fisioterapia se ejecutan por medio de diversos dispositivos, provocando que el equipamiento completo de un área fisioterapéutica cueste cantidades enormes de dinero, sin embargo se propone como solución el desarrollo de un equipo rehabilitador que integre las 3 terapias más utilizadas por expertos en terapia física, cabe destacar que es interesante proponer un sistema de control inalámbrico por medio de un Smartphone para el desarrollo del equipo. Se planea generar un estudio de usabilidad comparando las terapias manuales con las asistidas por equipos y las generadas por el rehabilitador multiterapéutico.

Palabras clave—Fisioterapia, Rodilla, Smartphone, Rehabilitación.

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas de rodilla se pueden llegar a presentar desde la infancia y las estadísticas crecen considerablemente en las personas de la tercera edad [1].

Existen varios problemas severos que requieren intervención quirúrgica como las lesiones en los ligamentos principales que conforman la rodilla, la osteoartritis, la tendinitis rotularia (rodilla de saltador) y rupturas de los meniscos [2], donde la rehabilitación juega un papel muy importante para la recuperación de la actividad fisiológica y la readaptación de la anatomía [3] [4]. Actualmente no se le da un correcto seguimiento a los problemas de rodilla debido a que los pacientes reanudan sus actividades de manera temprana y sin terminar la rehabilitación, algo que es menos común con los problemas de miembro superior ya que no los utilizan para desplazarse naturalmente.

Para sobrellevar una terapia física se utilizan agentes físicos en rehabilitación que son: la energía y los materiales aplicados para asistir la rehabilitación del paciente. Estos se dividen en tres tipos, los térmicos, mecánicos y electromagnéticos (calor, frío, agua, presión, sonido, radiación electromagnética y corrientes eléctricas) [5]. Los agentes físicos se encuentran diversificados en una gran cantidad de dispositivos que cumplen con funciones específicas y delimitadas, por lo cual se ve necesaria la adquisición de múltiples equipos para llevar a cabo una sola sesión terapéutica [5] [6].

El estado del arte de los actuales dispositivos rehabilitadores de rodilla se resumen a una sola terapia por dispositivo.

Las rehabilitaciones postquirúrgicas de miembros inferiores en el sector de salud público se reducen a rutinas de ejercicios proporcionadas por los especialistas dejando la recuperación en manos del paciente, lo que provoca en la mayoría de los casos un seguimiento inadecuado en la rehabilitación. Cuando el paciente lleva el control de sus ejercicios crece la oportunidad de que no se realicen de manera periódica o con una calidad inferior a la necesaria, lo que puede desencadenar una disminución en la actividad fisiológica del miembro y posibles cambios en la biomecánica articular del paciente. La falta de espacios equipados en el sector salud público se debe a que se requieren de diversos equipos de rehabilitación para entregar un óptimo servicio terapéutico y los presupuestos para equipar un salón de fisioterapia completo son excesivos. Una manera de proporcionar un mejor servicio médico en rehabilitación es diseñar y desarrollar equipos multiterapia que cumplan con las funciones de dos o más dispositivos simultáneamente [7], lo que generará una disminución considerable en los costos de equipamiento. Además pueden llegar a ser más amigables y prácticos si se fusionan con las tecnologías móviles para controlar la actividad de los agentes físicos involucrados.

La creciente tendencia de las tecnologías móviles para ejercicios cotidianos en conjunto de la gran aceptación por la sociedad, genera un ambiente amplio para el desarrollo de nuevas tecnologías. Una aplicación móvil proporciona una herramienta sencilla y práctica para diversas ramas tecnológicas incluyendo el área biomédica. Se tiene en consideración el control asistido por un Smartphone pensando en la comodidad del usuario para obtener un mejor seguimiento a sus terapias. De este modo el experto programará rutinas y tendrá la confianza de que el paciente está ejecutando de manera correcta sus rutinas. Incluir al sector salud un equipo con varias terapias y de interfaz móvil generará un cambio positivo en las actividades de los expertos.

En este trabajo se describen las características técnicas y pruebas para el desarrollo de un equipo multiterapéutico enfocado a mejorar y apoyar al sector salud. ArtroSemper®

asistirá de manera práctica y controlada la rehabilitación postquirúrgica de rodilla mediante la implementación de los tres tipos de agentes físicos (térmicos, mecánicos y electromagnéticos). Además se compararán los resultados del uso simultaneo de agentes de rehabilitación de ArthroSemper® con las terapias generadas por diversos equipos y con las respuestas de una terapia realizada por kinesiólogos y fisioterapéutico.

II. METODOLOGÍA

Para desarrollar el sistema multiterapia se deben incluir más de dos agentes físicos en rehabilitación los cuales se pueden apreciar en la figura 2, dentro de los métodos se incluye un estudio de flexibilidad y mejora muscular de 40 pacientes con intervenciones quirúrgicas previas de miembro inferior.

Se requirieron los siguientes elementos: Módulo bluetooth HC-05, Microcontrolador TIVA C Texas instruments, servo actuador lineal de 300N, 10 Leds de colores azul y rojo como indicadores, 2 rodamientos de 2.5cm de diámetro, varillas de aluminio cortadas a chorro de agua, estireno termoformado para los contenedores y carcasas, neopreno textil, 3 tiras de aluminio flexible de 20 cm, 200 gr de gel de sílice, placa de peltier de 5x5 cm a 12 volts 5W (TC1205), software de programación Android Studio versión 1.0 y un equipo de cómputo Asus K55VD para ejecutar el software .

1) *Agente térmico*: Este transfiere energía al paciente para producir un aumento en la temperatura del tejido teniendo un proceso fisiológico de vasodilatación con el consecuente incremento de circulación sanguínea. Con ello la contractura y la inflamación disminuyen y como fenómeno reflejo, se relajan los músculos liso y estriado produciéndose un estado de analgesia. [5][6][8].

La tabla I. muestra las funciones fisiológicas que aumentan y disminuyen cuando se somete a termoterapia del tejido superficial.

TABLA I
EFECTOS FISIOLÓGICOS DEL CALOR

Aumenta	Disminuye
Metabolismo local.	Tono muscular.
Vasodilatación de arteriolas y capilares.	Espasmo muscular.
Flujo sanguíneo en la zona con temperatura elevada.	Rigidez articular.
Producción de leucocitos y de la fagocitosis.	Adherencias.
Permeabilidad capilar.	
Elasticidad de los músculos, ligamentos y fibras musculares.	
Analgesia.	
Formación de edema.	

Existen distintos tipo de agentes térmicos de calentamiento superficial como: bolsas calientes, compresas químicas, baños de parafina, etc. [5] [7]. El que mejor se adapta al concepto del rehabilitador portátil ArthroSemper® es la compresa química debido a sus propiedades espaciales y configuración sencilla. Se diseñó una variante a la compresa que combina la tecnología del gel de sílice con la de un cojín eléctrico, el diseño del nuevo agente térmico está fabricada como una protección rotuliana con canales de disipación térmica, esta va conectada a un semiconductor generador de temperatura a partir de voltaje (Placa Peltier TC-1205), la temperatura se disipa a través de canales de aluminio flexibles que calientan por conducción el gel de sílice circundante. Las temperaturas que se logran con el sistema de control de temperatura de lazo abierto alcanzan los 50 °C y se puede controlar mediante la frecuencia de pulsos eléctricos en Hertz (Hz) generados por el microcontrolador. Esta variante representa una gran ventaja debido a que elimina los problemas de los dos agentes térmicos; en el caso de la compresa de sílice, el equilibrio de temperatura en determinado tiempo entre el tejido superficial y el material térmico, y las posibles quemaduras superficiales generadas por los cojines eléctricos.

En la figura 1 se observa el cambio de temperatura (°C) con respecto al tiempo (segundos) de los cojines diseñados específicamente para ArthroSemper®, el cambio de temperatura está dado por el modelo matemático inscrito en la figura, la temperatura máxima ideal para una compresa caliente común es de 50 °C, es por eso que se tomó ese valor como límite superior del mecanismo térmico del dispositivo. Gracias a la fuente de poder en conjunto a la célula de peltier se lograron tiempos de respuesta de 1.5 minutos para llegar al valor deseado teniendo un factor .98 de estabilidad. Dicha unidad se activa por medio del micro controlador y permanece encendida el tiempo programado por el celular.

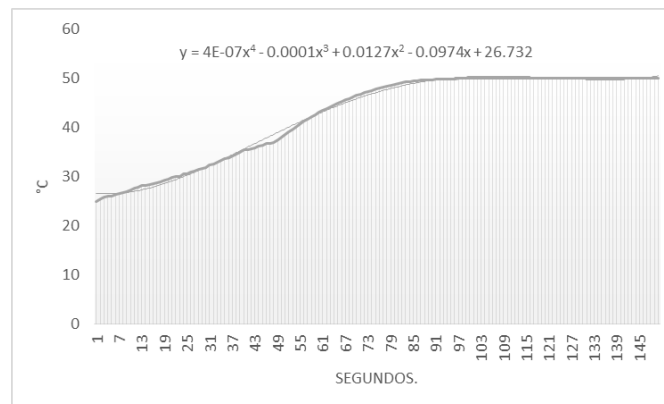


Fig. 1. Curva de temperatura-tiempo del sistema térmico compuesto por cojines de gel y una membrana de aluminio, la información está dada en grados centígrados (°C) y segundos.

2) *Agente mecánico*: Los agentes mecánicos consisten en la aplicación de fuerza para aumentar o disminuir la presión sobre el cuerpo del paciente. Algunos ejemplos de agentes mecánicos incluyen el agua, la tracción y la compresión [5] [9]. La flexión controlada y progresiva de la articulación genera una tracción mecánica donde se incorporó este principio al equipo ArthroSemper®, mediante un servo actuador lineal de 900N de fuerza, la cual se aplica en dos puntos específicos de los soportes laterales cada uno ubicado en una varilla diferente como se aprecia en la figura 1. Las flexiones irán desde 0 grados hasta 135 grados debido a la elongación del actuador, siendo controlado por el microcontrolador en movimientos suaves y prolongados.

Para el diseño del mecanismo se evaluaron las fuerzas lineales de extensión y flexión de pierna de 15 personas completamente sanas de distintas complejiones, el promedio de fuerza fue de 155 Newtons (N). Además se registraron esfuerzos máximos de flexión y extensión sucesivamente, el esfuerzo promedio fue de 285 N. A partir de la ecuación 1 se obtiene la fuerza necesaria para el actuador lineal.

$$|EM| \text{ Coseno } (10^\circ) = \text{Fuerza Lineal} \quad (1)$$

$$285 \text{ N} * \text{Coseno } (10^\circ) = 280.67 \text{ N} \quad (2)$$

Tomando como magnitud de fuerza el esfuerzo máximo (285 N) y el ángulo como el límite superior angular de la pierna (10°) se obtiene una fuerza lineal máxima de 281 N como se indica en la ecuación 2, por lo tanto se considera un actuador lineal de 300 N para impulsar y retraer la pierna. Al contemplar fuerzas de personas sanas y atléticas la máxima fuerza que resiste el mecanismo queda sobrada para los fines de rehabilitación de pacientes con personas con problemas articulares de rodilla.

3) *Agente electromagnético*: Aplican energía en forma de radiación electromagnética o de corriente eléctrica, algunos ejemplos son la radiación UV (ultra violeta), radiación infrarroja (IR), la diatermia y la corriente eléctrica. Los agentes de corriente eléctrica corresponden a la electroestimulación (EE) y se dividen en dos tipos; la EMS (Electroestimulación Muscular) y los TENS (Estimulación Transcutánea Nerviosa) [10]. En el rehabilitador se va a integrar un equipo TENS debido a que es una de las herramientas más utilizadas por los expertos en terapia física por sus propiedades curativas y analgésicas. ArthroSemper incluye un compartimento para guardar los TENS que vienen de fábrica, estos reciben la información de la frecuencia y duración que es enviada por el Smartphone hacia el microcontrolador y de este a los electroestimuladores. El elemento es completamente intercambiable, siendo versátil para incluir TENS más sofisticados e innovadores que en un futuro salgan al

mercado. El rango de frecuencias que incorpora el dispositivo TENS será desde 1Hertz a 10 KHz



Fig. 2. Diseño conceptual de la nueva versión de ArthroSemper v1.2. El agente térmico está dado por los cojinetes verdes circulares que abarcan los ligamentos principales que rodean la rótula. El agente mecánico de tracción esta ejemplificado por el sistema de movimiento angular generado por los dos puntos de apoyo del servoactuador lineal. El agente electromagnético de corriente eléctrica está representado como equipo TENS guardado en el contenedor principal ubicado en la parte superior del soporte lateral de aluminio. La media esfera de leds es indicadora del proceso de rehabilitación que se está llevando a cabo.

4) *Interfaz de control*: El sistema de control se compone de tres elementos principales; el dispositivo móvil, el módulo bluetooth y el microcontrolador. El equipo inteligente envía la información ingresada por los expertos en el área al módulo bluetooth el cual se encarga de entregar la información al microcontrolador y este envía las señales necesarias a los elementos de acción terapéutica. En la figura 3 se puede observar el proceso de envío de información.

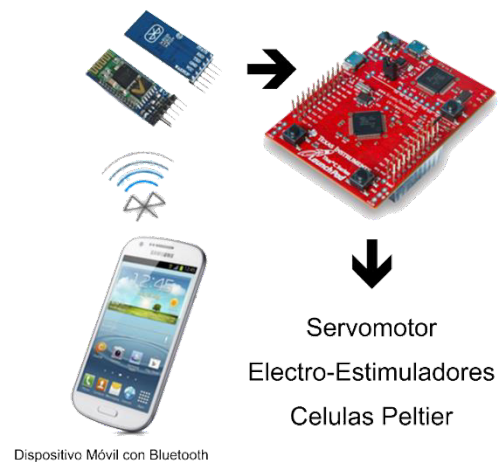


Fig. 3. Sistema de transferencia de información de ArthroSemper.

5) *Estudio de usabilidad*: Para determinar la eficacia del tratamiento asistido por ArthroSemper se planea realizar un estudio con 40 pacientes que se sometieron anteriormente a

cirugía de rodilla proporcionados por el Licenciado en Terapia Física, José Adrián Ruiz Aguirre, se van a dividir los 40 sujetos en 3 grupos; el grupo control, conformado por 14 sujetos que únicamente se someterán a rehabilitación física asistida manualmente por un fisioterapeuta, el segundo grupo integrado por 13 sujetos a los que se les otorgará rehabilitación asistida por equipos de terapia independientes como se practica en las sesiones normales y el tercer grupo de 13 personas que utilizarán únicamente el equipo ArtroSemper como instrumento para su recuperación.

La duración de las terapias será de 4 semanas, 3 días a la semana, lunes, miércoles, y viernes. Para llevar el registro del progreso se graficarán dos valores, el progreso en la flexión por medio de un goniómetro, y la actividad eléctrica muscular a partir de lecturas electromiográficas para revisar el progreso de fuerza muscular [11], este procedimiento se hará cada semana con los 3 grupos.

III. RESULTADOS

A. Proyección a futuro.

Se propone a ArtroSemper como un precursor de una nueva tendencia en la rama de mHealth enfocado a la fisioterapia, ya que según se tiene documentado en una búsqueda de patentes por el IMPI (Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual) no hay registro de un rehabilitador fisioterapéutico de miembros inferiores que estén controlados por un Smartphone.

El proyecto tiene el potencial suficiente para ser introducido al sector de salud público y privado, según los estudios de mercado realizados el potencial de ventas asciende al 8 % de los hospitales públicos de país, representando más de 100 unidades vendidas en el primer año.

B. Prototipos desarrollados y mejoras disponibles.

En el mes de junio del 2016 finalizó la primera etapa de desarrollo a partir del diseño previo de ArtroSemper mostrado en la figura 4, dando lugar al prototipo v1.1 (véase figura 3), este fue realizado con una impresora 3D y textiles sintéticos. Dicho prototipo incorporó un elemento inestable que generaba 100 N de levantamiento por lo tanto se pensó en otro elemento mecánico para la tracción de la pierna. En la figura 5 se aprecia el desarrollo previo a mejoras y reingeniería. La Tabla II muestra las mejoras más considerables del proyecto.

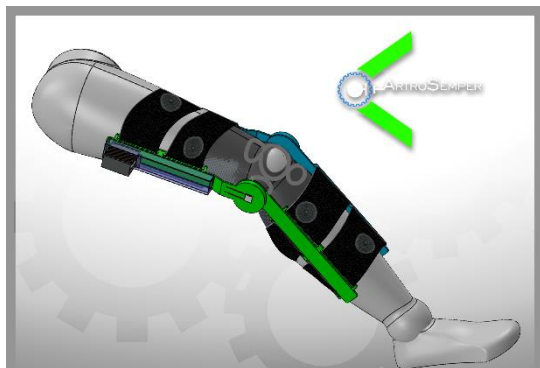


Fig. 4. Diseño conceptual ArtroSemper v.1.1.



Fig. 5. ArtroSemper v.1.1.

TABLA II
MEJORAS PROPUESTAS PARA EL DESARROLLO v1.2

Mejoras
<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de elemento electromotriz por servomotor lineal. • Implementación de carcasa de estireno termoformado para almacenaje de TENS. • Carcasas de estireno termoformado como cubiertas protectoras del servomotor lineal. • Cambio de material textil por Neopreno, debido a sus características térmicas. • Indicador óptico de led para mostrar el tipo de terapia que se está ejecutando.

IV. DISCUSIÓN

Las actuales prácticas de rehabilitación de rodilla en el sector público son muy austeras debido a los altos precios de los rehabilitadores modernos. El éxito de una cirugía se da por la calidad de la rehabilitación. Si se llegaran a mejorar los equipos de rehabilitación y que estos se encuentren al alcance de todo tipo de población repercutirá directamente en la cantidad de personas con problemas causados por la rehabilitación post-operatoria.

Los equipos recientes son grandes y de muy alto costo y no todos los hospitales y centros de fisioterapia cuentan con ellos, otorgando una terapia digna solamente a las personas de clase alta o con seguro de gastos médicos mayores en hospitales muy prestigiados.

Además ninguno de los equipos que hay en el mercado contiene más de un fin fisioterapéutico ya que se especializan únicamente en una o dos terapias, haciendo las terapias más costosas ya que es necesaria la adquisición de más de un equipo para dar una terapia completa.

V. CONCLUSIÓN

El funcionamiento de este prototipo impacta directamente al sector salud y al económico ya que reducirá considerablemente los costos de los actuales rehabilitadores de rodilla. La forma ergonómica en la que estará desarrollado el prototipo hará que los pacientes se sientan más cómodos y satisfechos con los resultados obtenidos, puesto que una vez finalizada la terapia, sus músculos y sus articulaciones no resentirán la atrofia causada por la inmovilización.

Producirá un gran impacto en los pacientes que sufren de problemas de rodillas puesto que la cantidad de personas que tendrán acceso a un buen rehabilitador aumentará.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado por el centro de enseñanza técnica industrial, a la Dra. En C. Consuelo Ventura Mejía por todas las tardes de preparación de materiales, la confección de los materiales textiles y el apoyo incondicional entregado. Al Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas junto con la Dra. Rocío Maciel Arellano, y a la unidad de atención a pacientes con quemaduras del Hospital Civil Nuevo de Guadalajara (Dr. Juan I. Menchaca) por las atenciones y las asesorías proporcionadas por la institución.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robles Raya, M. J., Subiela, M., Torres, S., Basseda, R. M., Duarte, E., Cervera, A. M., ... & Muniesa, J. M. (2007). Factores relacionados con el ingreso en una unidad geriátrica de convalecencia tras artroplastia total de rodilla. Experiencia de colaboración entre los servicios de geriatría, rehabilitación y cirugía ortopédica. *Revista Multidisciplinar de Gerontología*, 17(3), 127-130.
- [2] *Derschild GL and Col. : Knee Disorders. J Am Phys Ther Assoc* 60:1582, 1589
- [3] Noyes FR, Keller CS, Good ES, et al: Advances in the understanding of knee ligament injury, repair, and rehabilitation. *Med Sci Sports Exercise* 16:427
- [4] Rudavsky, A., & Cook, J. (2014). Physiotherapy management of patellar tendinopathy (jumper's knee). *Journal of physiotherapy*, 60(3), 122-129.
- [5] Cameron, M. (2014). *Agentes físicos en rehabilitación* (pp. 1:30). Amsterdam: Elsevier.
- [6] Guerra, J. (2004). *Manual de Fisioterapia* (pp. 100:173). Mexico.
- [7] Sakaguchi, A., Ookawara, T., & Shimada, T. (2010). Inhibitory effect of a combination of thermotherapy with exercise therapy on progression of muscle atrophy. *Journal of Physical Therapy Science*, 22(1), 17-22.
- [8] Nadler, S. F., Weingand, K., & Kruse, R. J. (2004). The physiologic basis and clinical applications of cryotherapy and thermotherapy for the pain practitioner. *Pain physician*, 7(3),

395-400. [7] Guerra, J. (2004). *Manual de Fisioterapia* (pp. 100:173). Mexico.

- [9] Gramatikova, M., Nikolova, E., & Mitova, S. (2014). Kinesitherapy after reconstruction of anterior cruciate ligament of knee joint. *Research in Kinesiology*, 42(2), 180-187.
- [10] Callaghan, M. J., & Oldham, J. A. (2004). Electric muscle stimulation of the quadriceps in the treatment of patellofemoral pain. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 85(6), 956-962.
- [11] Brownstein, B. A., Lamb, R. L., & Mangine, R. E. (1985). Quadriceps torque and integrated electromyography*. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 6(6), 309-314.