

# Diseño y construcción de un prototipo de máquina de movimiento pasivo continuo para rehabilitación física de rodilla.

Leidy Estefanía Zambrano Hernández, Daniel Alexander Benavidez Guadir  
Corporación Universitaria Autónoma de Nariño  
Pasto Nariño  
lez1028@hotmail.com, danielbena95@hotmail.com

**Resumen** — En el siguiente estudio se plantea un prototipo de máquina rehabilitadora debido a que la patología de la rodilla ha tomado hoy en día fuerza en las principales y diferentes clínicas especialistas en áreas de investigación y análisis locomotor del cuerpo, específicamente y con más frecuencia en las extremidades inferiores, catalogando a la articulación de rodilla como principal por ende se establece el diseño y la construcción de un prototipo máquina para realizar fisioterapia en la articulación de rodilla en cuanto a movimientos de flexión y extensión. La idea es permitir que un paciente pueda ser atendido por un profesional de la salud con un control más exacto por lo tanto una pronta recuperación, proporcionando la opción de realizar la terapia pasiva en casa sin necesidad de desplazamientos y realizándola durante jornadas amplias de tiempo facilitando el tratamiento de fisioterapia, haciéndolo provechoso en la relación costo-beneficio y considerando las problemáticas planteadas pensando en contribuir a futuro con la población nariñense se ha pensado en la creación de estos dispositivos de asistencia médica en rehabilitación física por fisioterapia.

*Abstract—In the following study a prototype of rehabilitation machine is proposed because the pathology of the knee has taken strength today in the main and different clinical specialists in areas of research and locomotor analysis of the body, specifically and more frequently in the extremities inferiors, cataloging the knee joint as main, therefore establishing the design and construction of a prototype machine to perform physiotherapy in the knee joint in terms of flexion and extension movements. The idea is to allow a patient to be treated by a health professional with a more accurate control and therefore a quick recovery, providing the option of performing passive therapy at home without the need for travel and performing it over a long period of time facilitating the treatment of physiotherapy, making it profitable in the cost-benefit relation and considering the problems posed thinking about contributing to the future with the population of Nariño, it has been thought about the creation of these medical assistance devices in physical rehabilitation by physiotherapy.*

**Índice de Términos** – Máquina de movimiento pasivo, rehabilitación de rodilla.

## I. INTRODUCCIÓN

La evolución de la medicina ha obligado a la ingeniería a actuar en conjunto con el fin de resolver problemáticas sociales relacionando el cuerpo humano a través áreas de conocimiento interdisciplinario tales como la biomecánica que pretende unificar componentes mecánicos y cinemáticos para trabajar en conjunto con la anatomía del cuerpo humano, de esta manera se han alcanzado logros indispensables dentro de la rama fisioterapéutica y de la salud. El tratamiento que se pretende realizar es el movimiento de flexión y extensión para pacientes con lesiones de rodilla, permitiendo generar un método de rehabilitación pasiva en donde el paciente no realiza movimiento sobre la articulación de la rodilla por acción voluntaria.

Dentro de esta investigación se logró observar el funcionamiento de dos máquinas existentes hasta la fecha, además de obtener información de diferentes centros de rehabilitación y clínicas a cerca de los tipos de terapia que están siendo implementados en San Juan de Pasto, de los cuales se encontraron aspectos por mejorar y son expuestos a través del desarrollo de este proyecto. Por lo tanto con el diseño y la construcción del prototipo de máquina de movimiento pasivo continuo para rehabilitación física de rodilla, se propone elaborar una estructura de acuerdo a la antropometría colombiana, estableciendo un sistema de barras autoajustable que genere comodidad para pacientes dentro de los rangos establecidos, fácil obtención, uso y comercialización dentro de la región debido al costo beneficio del prototipo, tanto a pacientes como a entidades de salud o universidades que pretendan realizar prácticas fisioterapéuticas.

Por medio de este proyecto se desarrolló un sistema que proporciona las herramientas adecuadas, con objeto de generar un tipo de rehabilitación sistematizada y controlada de lesiones de rodilla que se encuentren ligadas dentro de un rango de movimiento de **0° a 140°**.

Se pretende controlar la terapia acorde a tres aspectos:



### III. METODOLOGÍA

1. Tiempo en el que se realice el tratamiento según el tipo de lesión.
2. Número de sesiones semanales de acuerdo a la condición del paciente junto con las repeticiones por sesión.
3. Angulo al cual debe guiarse la rodilla acorde al movimiento de flexión y extensión.

Los impactos de la consecución exitosa del proyecto pueden ser altamente positivos. Pensando en adaptar este dispositivo y utilizarlo en el futuro en pacientes con estado de discapacidad transitoria.

**Tabla 1.** Componentes esperados con la construcción del prototipo de máquina rehabilitadora.

Impacto esperado	Plazo (años) Corto ( 1- 4) Medio (5-9) Largo (10+)	Indicadores de verificación	Supuestos
Atención personalizada	Mediano	Mayor control en la enfermedad por medio de base de datos del paciente	Seguimiento periódico al paciente
Diagnostico apropiado del paciente	Corto plazo	Atención eficiente a paciente en centros de salud.	Aumento de cobertura de la disposición de las maquinas

**Fuente:** La presente investigación – Año 2018

### II. OBJETIVOS

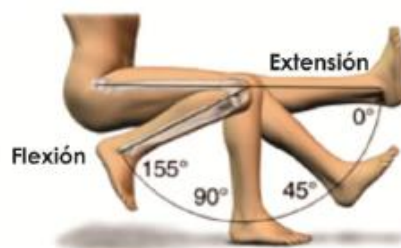
- ❖ Realizar un estudio del estado del arte para reconocer máquinas de rehabilitación de rodilla disponibles en el mercado y la Antropometría Colombiana.
- ❖ Definir características y especificaciones de diseño a través de un asesamiento por profesionales de la salud.
- ❖ Determinar especificaciones técnicas para establecer las características de diseño.
- ❖ Construir con elementos electrónicos, mecánicos y de sistematización.
- ❖ Desarrollar pruebas de ensayo para verificar el funcionamiento y validar la correspondencia entre lo construido y lo diseñado.
- ❖ Divulgar los resultados del proyecto a través de la presentación de artículos de investigación revistas científicas y o presentar ponencias en congresos de ingeniería.

El presente proyecto se desarrolla a partir de la metodología inductiva deductiva, apoyada en la filosofía de la ingeniería concurrente en donde principalmente se identifica la necesidad del usuario, seguidas por el diseño conceptual de la máquina, donde se tiene en cuenta el análisis del ciclo de vida para seguir al diseño del detalle, donde se consideran aspectos funcionales y se realizan la simulación de la máquina. Finalmente, se procede a construcción de la maquina donde se plantean escenarios de validación con el fin de confirmar el funcionamiento y el análisis de resultados obtenidos.

### IV. REFERENTES TEÓRICOS

La rodilla en el cuerpo humano cumple un papel indispensable en estado de movimiento y de quietud mientras el cuerpo se encuentra de pie; debido a que “es la articulación que soporta mayor peso en los dos estados mencionados, uniendo a su vez el muslo con la pierna y permitiendo su movimiento”<sup>1</sup>. En este contexto, esta articulación presenta dos características: de movimiento y de estabilidad. De esta forma, soporta cargas y momentos tanto estáticos como dinámicos, que involucran gran parte de la masa del cuerpo, haciéndola particularmente susceptible a lesiones. La rodilla es una articulación compleja de varios grados de libertad, Sin embargo, dos movimientos que resultan de gran interés y que son importantes en el proceso de rehabilitación física de rodilla son los movimientos de flexión y extensión que se esquematizan a continuación:

**Figura 1.** Flexión y extensión de una rodilla



**Fuente:** (Camacho, 2014).

<sup>1</sup> Cifuentes J. David. Desarrollo de una unidad de movimiento pasivo continuo (UPMC) de rodilla generando condiciones de confort en usuario principal. Tesis de pregrado. Universidad del valle. Ingeniería mecánica 2016.

En este sentido y teniendo en cuenta que la lesión de rodilla es una lesión muy común, existen en la actualidad empresas desarrolladoras de máquinas de movimiento pasivo para tratar la lesión de rodilla el problema con las maquinas comerciales, son las longitudes y tamaños pues que las maquinas diseñadas en otros países, son diseñadas teniendo en cuenta la antropometría de países diferentes a países latinoamericanos.

En este sentido, y teniendo en cuenta que la lesión de rodilla es una lesión muy común, existen en la actualidad empresas desarrolladoras de máquinas de movimiento pasivo para tratar la lesión de rodilla. A continuación en la tabla 2, se muestra un resumen de algunas de las maquinas comerciales disponibles.

**Tabla 2. Máquinas de rehabilitación de rodilla disponibles en el mercado**

Nombre máquina comercial	Precio en dólares (US)	País de fabricación
ORTIFLEX 3CPM	2 750	Estados Unidos
BLD	3 320	India
KLC Flexmate K-500	3 599	Estados Unidos
FISOTEK 200T	3 680	Inglaterra
Kinect Spectra CPM	7 041	Estados Unidos
ARTROMOT – K1	5 440	Rusia
ARTROMOT – K3	4 610	Rusia

**Fuente:** adaptado de (Jaramillo, 2013)

En la tabla 2. Se observa los el monto en dólares de las maquinas más populares dentro del mercado, la más económica es la llamada "ORTIFLEX 3CPM" que cuesta precio es de 2.750U\$, en pesos colombianos (tomando el dólar igual a \$3000) la maquina costaría de forma comercial \$8'250 000 sin incluir los costos de envío e importación del dispositivo.

Por otra parte, de la tabla 2 se puede ver que las maquinas son construidas en países extranjeros y por lo tanto son diseñadas teniendo en cuenta antropometrías diferentes a la latinoamericana y mucho menos colombianas, de tal forma que se pretende generar un prototipo de maquina rehabilitadora que presente longitudes limites en su estructura de acuerdo a las medidas antropométricas de la población laboral

colombiana añadiendo un sistema de barras autoajutable que permita un acople seguro.

El proyecto que se va realizar tiene como finalidad dar soluciones y aportar al desarrollo tecnológico de la región, implementado este tipo de iniciativas biomecánicas, en donde se facilite el tratamiento fisioterapéutico, pensando en la calidad de servicio que reciben los pacientes y la capacidad de técnica que generan las máquinas confiables. Por esta razón se quiso implementar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería mecánica para así ser parte del desarrollo y el crecimiento del departamento de Nariño.

## V. RESULTADOS

Con este propósito se pretende realizar el diseño y construcción de un prototipo de máquina de movimiento pasivo para la rehabilitación de rodilla, el cual trabaje de manera controlada obedeciendo señales desde un ordenador y o control manual a través de elementos electrónicos.

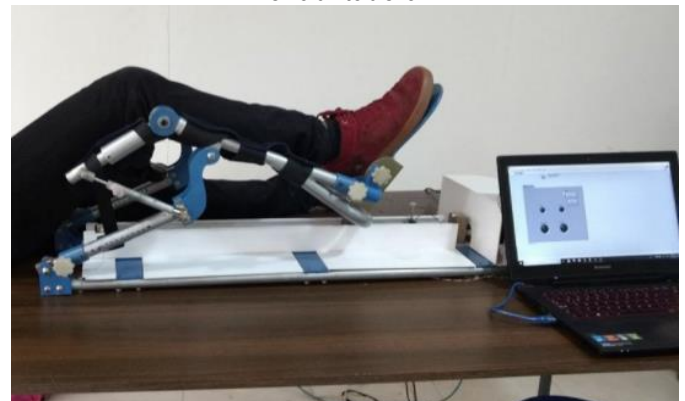
**Figura 2. Estructura visible del prototipo de maquina rehabilitadora.**



**Fuente:** La presente investigación – Año 2018

En la figura 2. Se presenta una parte de la estructura interna del prototipo, dejando a vista el mecanismo de transmisión de potencia que consta principalmente del el motor, tornillo sin fin y llave deslizante, al igual que el ensamble armónico elaborado para distribuir el peso por ende las cargas asociadas y amortiguar la fuerza generada por la pierna.

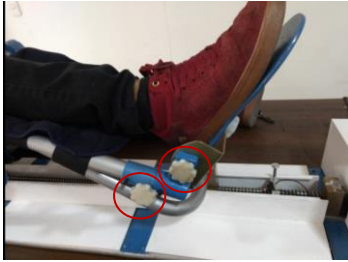
**Figura 3. Prueba de ensayo del prototipo de maquina rehabilitadora.**



**Fuente:** La presente investigación – Año 2018

En la figura 3 se definen factores de control, tales como la ubicación y funcionamiento de los sensores finales de carrera y encoder, al igual que la instalación del motor electrónico, su fuente y la manipulación de velocidad, distancia y ángulos modificando código realizado en la plataforma arduino.

**Figura 4. Mecanismo de autoajuste de barras**



**Fuente:** La presente investigación – Año 2018

En la figura 4 se evidencia el mecanismo de autoajuste de barras apoyadas con pernos de cabeza hexagonal, quienes fijan la posición de la barra según la longitud del muslo, tibia, y algunos segmentos del prototipo los cuales ayudan a transmitir el movimiento armónicamente.

## VI. CONCLUSIONES

La longitud de las barras propuesta en la estructura del prototipo se obtiene tras analizar el estudio de parámetros antropométricos de la población laboral colombiana, realizadas por la Universidad de Antioquia en el año 1995, con el fin de implementar un límite en las medidas y en el peso máximo que debe soportar la estructura; dentro de estos rangos se diseña un mecanismo de barras autoajutable que busca adaptar de forma más precisa el prototipo con cualquier tipo de persona que presente rasgos colombianos.

La mayor parte de la estructura se ha construido en aluminio, siendo este escogido por la combinación de propiedades que lo hacen útil para este prototipo, en específico su baja densidad de 2.700 kg/m<sup>3</sup> hace que su peso sea liviano beneficiando su portabilidad, además se facilita la manipulación y el maquinado de las piezas reduciendo costos de transporte y mano de obra, su alta resistencia a la corrosión hace que el material tienda a ampliar su vida útil y la resistencia al desgaste entre la de materiales donde existe fricción corresponde a tener un comportamiento aceptable como lo muestran los rodamientos, sin embargo en la zona donde se asienta y mantiene movimiento la cola de milano con la tapa deslizante, lo recomendable es agregar una mínima parte de lubricación con el propósito de disminuir y o evitar algún tipo de desgaste temprano. Una reducida parte del prototipo de

maquina es elaborada en acero inoxidable debido a la dificultad de doblado de los tubos que la componen.

Se realiza un proceso de mejora en cuanto a las maquinas rehabilitadoras ya conocidas en el mercado, dentro de las cuales se ha desarrollado un enfoque en dos tipos de máquina, la unidad de movimiento pasivo continuo para la rodilla proyecto de grado de interdisciplinario en áreas de ingeniería mecánica, ingeniería electrónica y diseño industrial de la universidad del valle en Cali y en la ciudad de Pasto en el hospital departamental se encuentra una máquina de rehabilitación pasiva la cual presenta algunos inconvenientes como su baja velocidad y ergonomía aun incómoda para los pacientes entre otros, en este proyecto se pretende ampliar los beneficios de este tipo de terapia de recuperación, logrando implementar soluciones tanto en la construcción como en el control del equipo; creando un sistema donde el prototipo pueda recibir señales desde un ordenador tales como las sesiones necesarias para cada terapia, el tiempo en que pueden transcurrir dichas sesión y el Angulo de inclinación de la rodilla el cual es estipulado por el especialista a cargo.

Teniendo en cuenta que este proyecto es un prototipo de maquina rehabilitador se escogió un motor aproximado a las especificaciones requeridas por el diseño en cuanto al torque y a revoluciones por minuto, dentro de las características más relevantes observadas fueron que se maneje en corriente continua, que funcione a través de una fuente de energía de 5A y 12 V, por lo tanto pueda ser controlada por la plataforma de hardware y software de código abierto arduino, implementando así el tipo de control a mediante sensores finales de carrera que también función como paro de emergencia en caso de que ocurra algún tipo de falla en el sistema de control y encoder de velocidad rotativa empleado como sensor de ángulo.

Durante el proceso de construcción se realizaron pruebas de funcionamiento, determinando criterios que ayuden a que el proceso tenga una mayor aceptación por parte de la población beneficiada, una vez terminada la estructura, se implementa el manejo de control en donde se va optando por probar cada uno de los mecanismos con el fin de verificar posibles fallas hasta lograr el correcto funcionamiento de cada componente consiguiendo así terminar el dispositivo por completo.

## VII. RECOMENDACIONES

El uso de este equipo de rehabilitación de rodilla se realizará exclusivamente para pruebas en pacientes; en los cuales el fisioterapeuta vea la necesidad de

implementarlo, por lo menos hasta conocer su funcionamiento, preferiblemente que él o la manipuladora de este equipo conozca los datos del paciente para luego hacer la comparación o la terapia con la funcionalidad del equipo.



Se debe asegurar al paciente alineándolo al equipo, contando que su extremidad inferior se adecue a la máquina; en especial alinear el eje de la rodilla al eje de las rotulas antes de iniciar la sesión o realizar cualquier tipo de terapia, además de asegurar con las correas al pie y la pierna en general.

Realizar a futuro la adaptación de instrumentos para ampliar el funcionamiento de la máquina; como por ejemplo corrientes eléctricas utilizadas para aplicar estimulación eléctrica a los nervios y músculos o como también, el ultrasonido, es una opción de tratamiento usada para tratar lesiones profundas del tejido blando o huesos

Una recomendación futurista, sería adoptar otros modelos de diseño para adaptarse a las necesidades de una mayor variedad de tipo empresarial.

Dentro de un proyecto tan amplio como este, se desea que siempre este mejorando continuamente; por lo tanto, se recomienda a futuros estudiantes que presenten interés en este proyecto, presenten de su disposición para la complementación y optimización de este equipo de rehabilitación.

## VIII. REFERENCIAS

[1]. CIFUENTES J. David. Desarrollo de una unidad de movimiento pasivo continuo (UPMC) de rodilla generando condiciones de confort en usuario principal. Tesis de pregrado. Universidad del valle. Ingeniería mecánica 2016.

[2]. J. Estrada, Parámetros antropométricos de la población laboral colombiana, Salud Pública, 1998.

[3]. Jaramillo, J. (2013). Desarrollo de una unidad de movimiento pasivo continuo de rodilla generando condiciones de 'confort' en usuario principal. Santiago de Cali: Universidad del Valle.