

## **Diseño conceptual de un dispositivo rehabilitador de rodilla**

### **Autores:**

Anderson Chagna (andersson\_217@hotmail.com)

José Segnini (jmsegnini@pucesi.edu.ec)

Mary Vergara (mjvergara@pucesi.edu.ec)

**Institución:** Pontificia Universidad Católica de Ecuador. Sede Ibarra

**Área de Conocimiento:** Diseño - Función social del diseño

## **Resumen**

Para el 2016 en Ecuador se encuentran registradas 193.520 personas con discapacidad física, de éstas 9.895 poseen daños patológicos en la rodilla, lo que representa un alto porcentaje de la población que necesita rehabilitación de rodilla y que, en su primera etapa, es posible que el paciente no pueda realizar esfuerzos sobre la misma. Así, para tratar este tipo de afecciones es común el uso de diversos dispositivos automatizados, que generalmente son importados, lo que implica un alto costo asociado al producto.

Con lo cual, surge la necesidad de realizar un diseño conceptual de un rehabilitador de rodilla integrado por una geometría sencilla, construido con materiales que se encuentren en el país y con el menor costo posible. Para esto, en el proceso de diseño, se presentan alternativas de mecanismos, formas y materiales para seleccionar las más adecuadas según los requerimientos planteados.

Además, se han utilizado formas exteriores con una cromática dispuesta con colores que despierten y estimulan a realizar la actividad de rehabilitación, rompiendo con lo regular de las propuestas clásicas que dejan atrás los colores blancos, grises y tonos oscuros.

**Palabras Claves:** Dispositivo; rodilla; rehabilitación, tratamiento terapéutico

## **Abstract**

For 2016 in Ecuador, 193,520 people with physical disabilities are registered. Of these, 9,895 have pathological damages to the knee, representing a high percentage of the population that needs rehabilitation of the knee and, in its first stage, it is possible that the patient can not make efforts on it. Thus, to treat these types of conditions it is common to use various automated devices, which are generally imported, which implies a high cost associated with the product. With this, the need arises to make a conceptual design of a knee rehabilitator integrated by a simple geometry, constructed with materials that are in the country and with the lowest possible cost. For this, in the design process, alternatives of mechanisms, forms and materials are presented to select the most appropriate according to the requirements.

In addition, external forms have been used with a chromatic color arranged with wake and stimulation to carry out the rehabilitation activity, breaking with the regular of the classic proposals that leave behind the colors white, gray and shades.

**Keywords:** Device; knee; rehabilitation, therapeutic treatment

## **Introducción**

La rodilla es una articulación importante del cuerpo humano, ya que, gracias a sus funciones, permite ejecutar múltiples actividades que incluyen movimientos de flexión y extensión, donde prácticamente no existe una actividad que implique desplazamiento en la cual no se utilice ésta.

Lo anterior, implica un decremento de la calidad de vida cuando el cuerpo humano sufre luxaciones, esguinces, torceduras de articulaciones, ligamentos de la rodilla, y otras enfermedades asociadas a la misma, acompañadas con accidentes viales, laborales o por deporte que pueden culminar o no con una intervención quirúrgica, y cuyo primer tratamiento requiere de una rehabilitación pasiva de rodilla, donde una persona o dispositivo moviliza las extremidades sin ningún esfuerzo del paciente, así que la articulación se somete a un rango de movimiento angular preestablecido y por un período de tiempo determinado.

## **Desarrollo**

### **Estado del Arte y la Práctica**

Para el 2016 en Ecuador se encuentran registradas 193.520 personas con discapacidad física (CONADIS, 2016), de éstas 9.895 poseen daños patológicos en la rodilla (INEC, 2016), lo que representa un alto porcentaje de la población que necesita rehabilitación de rodilla. Esta situación, es cada vez más preocupante, debido principalmente a que el costo de equipos especializados es muy alto.

En el mercado, existe una cantidad importante de dispositivos que realizan rehabilitación de rodilla de forma autónoma, de tal manera que la mayoría pueden agruparse en dispositivos con control de posición y dinámicos que pueden utilizar neumática, resortes lineales, hidráulica y barras torsionales para controlar la articulación de la rodilla como se muestra en (Wilkening et al., 2012; Tian, 2015; Umchid y Taraphongphan, 2016), donde, se especifica que existe una necesidad de realizar investigaciones direccionadas a que los dispositivos diseñados se asemejen más a realizar la función normal de la rodilla durante todo el ciclo de andar.

También (Swortec, 2017) presenta a MotionMaker™, que es un sistema de entrenamiento programable para los miembros inferiores desarrollado por (Schmitt et al., 2004) que tiene tres grados de libertad (Guzmán et al., 2014), y está compuesto por dos ortesis además de motores, sensores y una unidad de control que gestiona la simulación eléctrica con regulaciones en tiempo real.

En esta misma dirección, en los últimos años, se han presentado varias patentes que muestran la evolución de dichos dispositivos que consideran varias formas y configuraciones geométricas y que van desde sistemas solamente mecánicos actuados por el usuario, hasta los controlados automáticamente, ver por ejemplo (Xiaoning et al., 2010; Ding et al., 2016; Branch et al., 2016).

Por esto, se observa que los movimientos de rehabilitación pueden ser realizados de manera autónoma por el paciente, así Hall (2017) presenta un sistema con entrada motriz dada por el usuario, que posee un cierto grado de movilidad. Sin embargo, algunos pacientes pueden requerir diferentes extensiones y flexiones debido al grado de inmovilización que sufre la rodilla y por lo tanto es importante desarrollar mecanismos que sean capaces de cubrir esta necesidad, como el presentado en (Vergara et al, 2017).

El presente artículo, presenta un diseño que cumple con los requerimientos de movimientos previstos por especialistas del área y su conjugación con formas novedosas y materiales disponibles con de bajo costo. Está compuesto de cuatro secciones, la primera de ellas presenta el método de diseño, complementado con los requerimientos en la sección dos. En la sección tres, se detalla el análisis de alternativas de mecanismo, forma y materiales propuestos utilizando el programa Expert Choice® para proponer una geometría descrita en la sección cuatro.

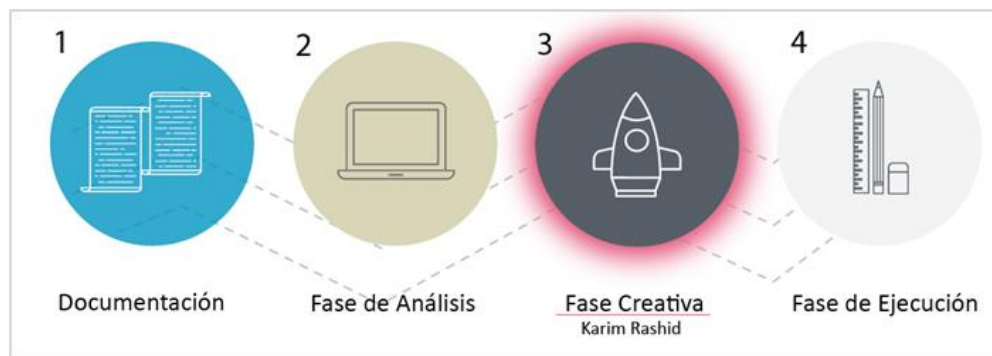
### **Metodología**

Una metodología de diseño es una guía, cuya meta se centra en orientar al diseñador durante el proceso proyectual, esta no es una fórmula para constituir rutinas, si no son pautas para lograr objetivos.

Así, Karim Rashid, 2017, plantea una metodología inusual y empírica, fundamentada en la concepción de objetos minimalistas diferentes a partir de experiencias, donde propone una metodología renovada de caja negra, con la particularidad que sus productos y proyectos presenten figuras orgánicas y coloridas, permitiendo el mejoramiento de objetos mediante el sentido, estético, funcional, sensorial y emocional. Sus orientaciones son consideradas en una de las fases de diseño propuesta por el diseñador británico Bruce Archer, 2015, que presenta una metodología de diseño que dispone y complementa la investigación desde el origen hasta la disposición del producto, contemplando etapas metódicas y determinando tres fases primordiales: fase analítica, fase creativa y fase de ejecución.

Para el desarrollo del diseño propuesto se fusionan las dos metodologías con el objetivo de crear guías que se adapten mejor a la resolución problemática del Rehabilitador de Rodilla obteniendo así un medio particular apropiado donde se añade en la fase de ejecución, el uso del programa Expert Choice® para selección de las diferentes propuestas.

El método de fusión mencionado, consta de cuatro fases fundamentales (Ver Figura 1). Cuyo propósito es el logro operacional y de fabricación de un Rehabilitador de rodilla que se describe a continuación.



**Figura 1.** Fusión de metodologías. Fuente: tomado de Archer (2015) y Rashid (2017)

### **Requerimientos de Diseño**

El proyecto se enfoca en la estructuración, creación y desarrollo de un dispositivo para rehabilitación de rodilla, en donde se plantea puntos concisos para establecer soluciones a los problemas y necesidades bajo una línea de exigencias técnicas y creativas cumpliendo temas de verificación, validez, operatividad y requerimientos específicos del producto con una solución conceptual obtenida mediante matrices las cuales se las presenta en la tabla 1 y 2.

### **Análisis de Requerimientos**

Tras haber hecho la recopilación de información que comprende los dispositivos desarrollados por empresas, universidades y algunos centros de investigación se proponen distintos tipos de mecanismos análogos, con formas novedosas y materiales disponibles. La información es sintetizada, y mediante el tratamiento de diseño surgen directrices para la creación del dispositivo, los cuales, mediante la asistencia de diversos especialistas en el tema de fisioterapia, contribuyen con asesoramiento para el desarrollo del dispositivo para delimitar determinantes necesarias para objetar en la investigación y que sean aplicables en el proyecto las cuales se justifican en la tabla 1 y 2.

## Determinantes de diseño

El proyecto integra conceptos diferentes para el diseño del mismo, sin embargo, se busca introducir una relación coparticipativa de los diferentes elementos para cumplir con la necesidad y aportar creativamente con la propuesta. En la tabla 2 se resumen los factores claves que sirven para completar los aspectos a considerar en el diseño y que son la guía para el análisis estructural.

**Tabla 1.** Requerimientos de diseño

<b>Requerimientos de diseño - Rehabilitador de rodilla</b>	
<b>Función y uso</b>	
- Rehabilitación autónoma motriz	- Dispositivo de entrada manual con flexión y extensión
- Flexible a las necesidades de rehabilitación	- Regule esfuerzos de acuerdo a la tolerancia del paciente
- Necesidad de constante mantenimiento	- Sistema mecánico simple
- Adaptable a estaturas y pesos del adulto en Ecuador.	- Utilización de elementos ajustables.
- El equipo brinde comodidad	- Áreas de contacto cubiertas y superficies lisas.
<b>Estructura</b>	
- La geometría proponga confianza	- Estructuración bien definida.
- Equipo portátil	- Estructura y soportes con apropiadas para la colocación de la pierna
- Formas sencillas	- Cromática dirigida al área de salud.
- Colores armónicos	
<b>Mercado</b>	
- Competencia de acuerdo a costos en el mercado	- Optimización de recursos para fabricación del prototipo.
- Equipo complementario	- Suministros útiles para el usuario

**Tabla 2.** Determinantes de diseño

<b>Determinantes de diseño</b>
<b>Antropometría</b>
Longitudes antropométricas deben vincular estatura masa y peso corporal. (ver tabla 2.2) Mantener la postura decúbito supino (ver tabla 2.1)
<b>Forma</b>
No provocar perjuicios a quienes la utilicen. Permita la percepción con función del dispositivo.
<b>Estructura</b>
Sencilla e idónea que no cause problemas en el uso o la fabricación del dispositivo.
<b>Materiales</b>
De fácil acceso en la zona, resistentes al trabajo y factores nocivos y fortuitos que se involucren en la rehabilitación

## Análisis jerárquico para selección de Alternativas

En el esquema de proceso de diseño propuesto establece alternativas para mecanismos, forma externa y materiales eficaces para el rehabilitador. Para la selección de éstos se sigue un análisis jerárquico necesario con el programa Expert Choice®, orientado a la toma de decisiones. El funcionamiento de esta herramienta, está basado en el Proceso Analítico Jerárquico, donde la función objetivo se refiere a la selección de mecanismo, forma y material para el rehabilitador y los criterios que serán utilizados para seleccionar las alternativas se detallan en la figura 2.

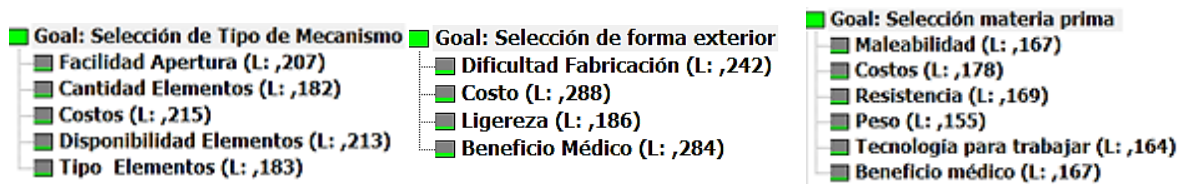


Figura 2. Función Jerárquica para Mecanismo, forma y material del rehabilitador

Para el planteamiento preliminar del diseño de la forma, se expone como base alternativa geométrica orgánica que concilian el concepto de diseño y se asocian al mobiliario ergonómico contemporáneo. Para ello, se consideran mecanismos que cumplen con las restricciones de movimiento asociadas a las fases de rehabilitación de la rodilla que se ajustan a la forma, función, y composición del mecanismo buscando perfeccionar la compatibilidad con el mecanismo.

## Propuestas de Mecanismos

En las figuras 3 y 4, se observa que los mecanismos 1 y 2, que están compuestos por engranajes que transmiten el movimiento giratorio desde uno de sus extremos para transformarlo en movimiento lineal desde un soporte central que agrega un sistema graduado de flexión y extensión sobre el soporte central.



Figura 3. Boceto del mecanismo 1

## MECANISMO 2 2 Engranes cónicos , Biela, Manivela

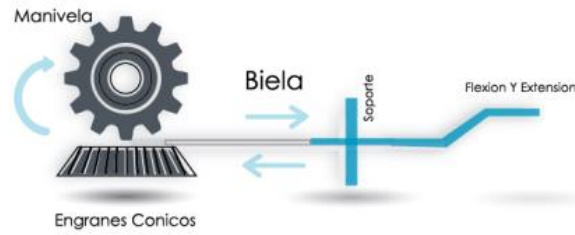


Figura 4. Boceto del mecanismo 2

El mecanismo 3 y 4 mostrado en las figuras 5 y 6, utilizan un pistón que se conecta directamente a un componente corredizo que convierte el movimiento lineal en movimiento angular que proporciona los movimientos de flexión y extensión.

## MECANISMO 3 Yugo escosès

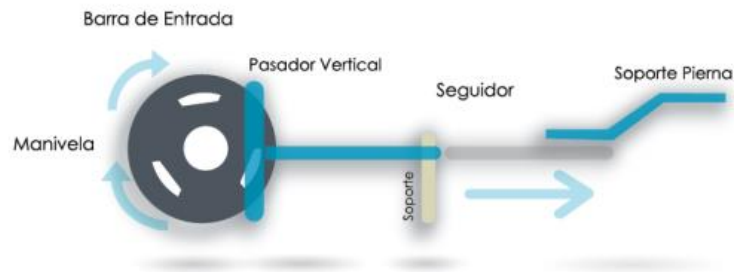


Figura 5. Boceto del mecanismo 3

## MECANISMO 4 Manivela , Biela , Pistòn

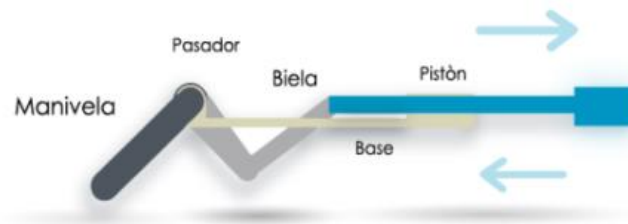


Figura 6. Boceto del mecanismo 4

El mecanismo 5 y 6, corresponden a mecanismos compuestos por barras que transforman un movimiento angular en uno lineal que cumple la misma función de los anteriores de generar la flexión y extensión necesaria para la rehabilitación (ver figuras 7 y 8).



Figura 7. Boceto del mecanismo 5

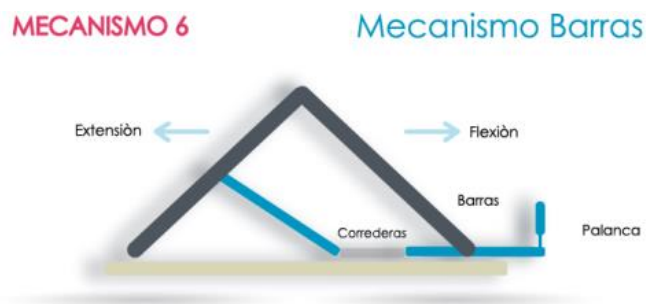


Figura 8. Boceto del mecanismo 6

La alternativa del mecanismo 6, resulta la opción más viable para el diseño, de acuerdo a la viabilidad de construcción, facilidad de obtención de material y el nivel general para el modo de trabajo. Así, el mecanismo 6 tiene el mayor puntaje, de acuerdo a cada uno de los criterios, como se presenta en la figura 9

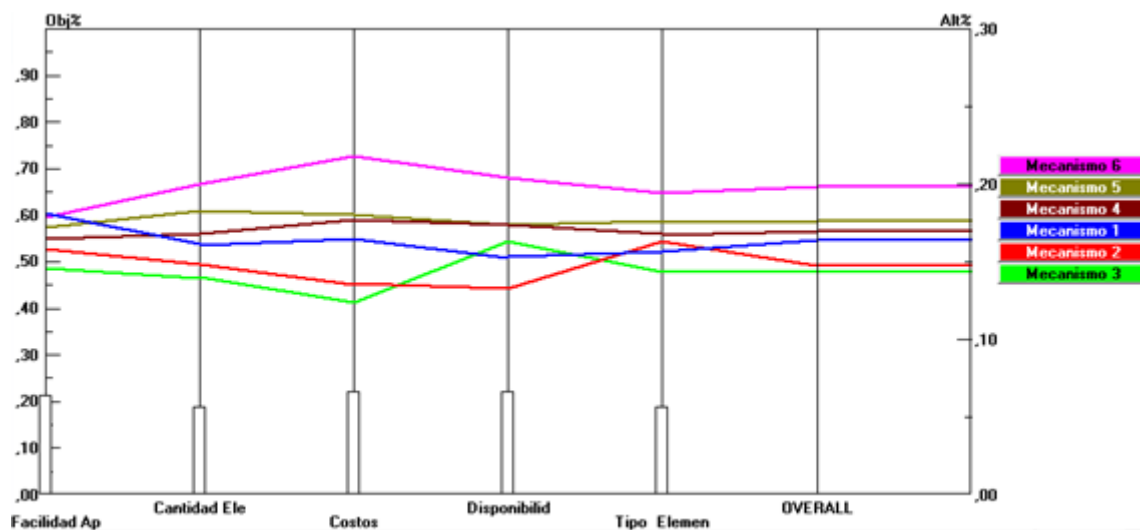


Figura 9. Evaluación de las alternativas de los mecanismos

## Propuestas de Formas

Tras el análisis de los dispositivos vistos, se presenta formas exteriores con una cromática dispuesta con colores que despierten y estimulen a realizar la actividad de rehabilitación, rompiendo con lo regular, lo tenso y aparatoso de las propuestas convencionales dejando atrás los colores blancos grises y tonos oscuros y planteando colores fuertes orientados a la línea de salud. De esta manera, se presentan cinco propuestas donde el proceso de creatividad se detalla en los bocetos presentados en las figuras desde la 10 hasta la 14.

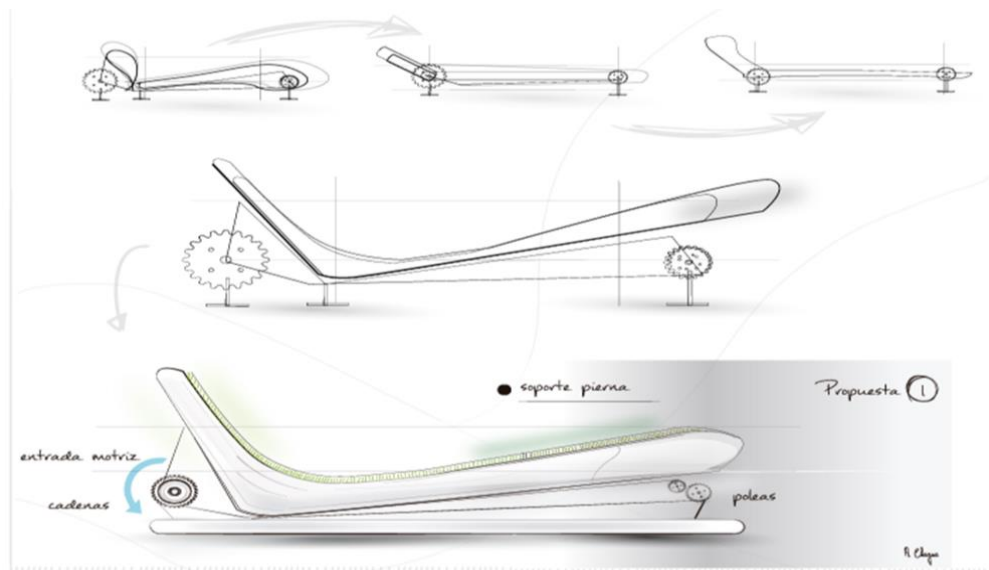


Figura 10. Proceso de diseño de la Forma 1. Estructura similar a la de una camilla.

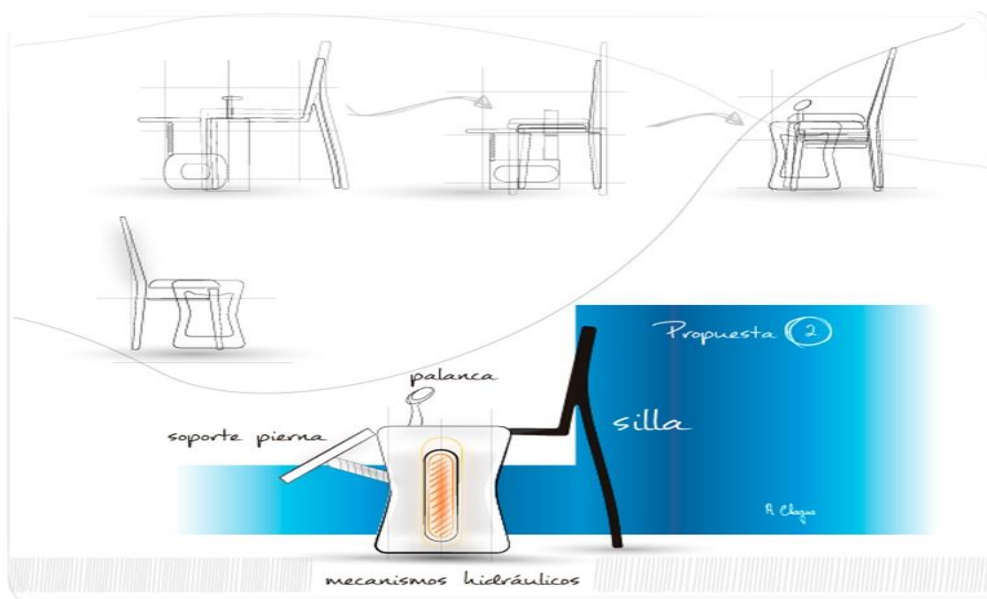


Figura 11. Proceso de diseño de la Forma 2. Semejante a un asiento reclinable

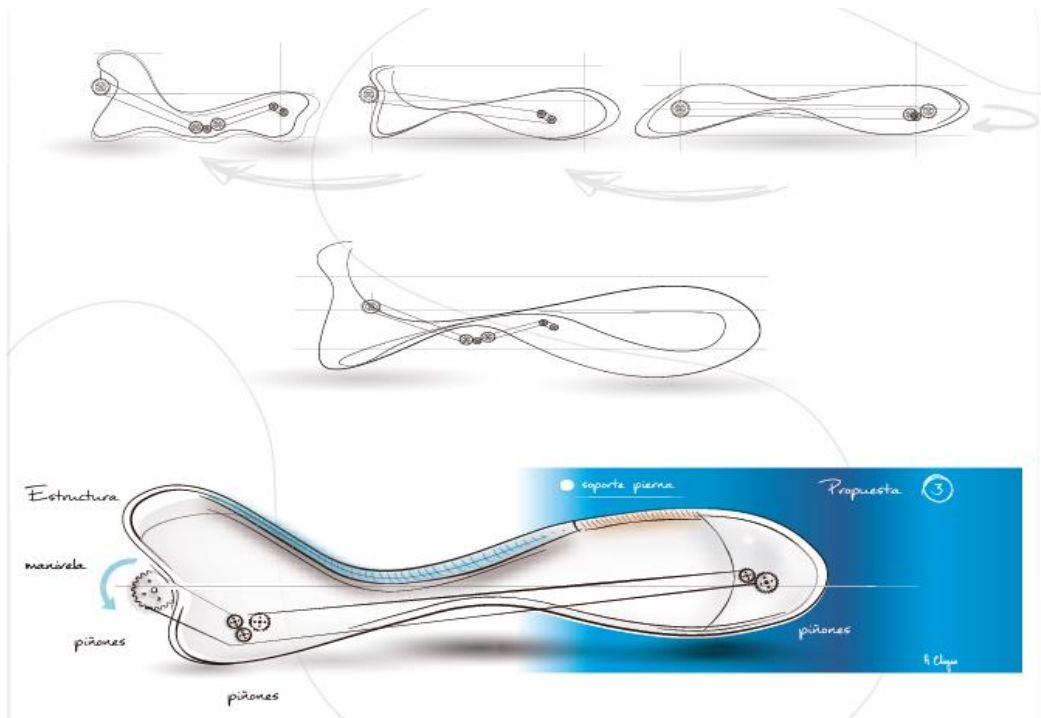


Figura 12. Proceso de diseño de la Forma 3. Estructura similar a una silla longue chaise.

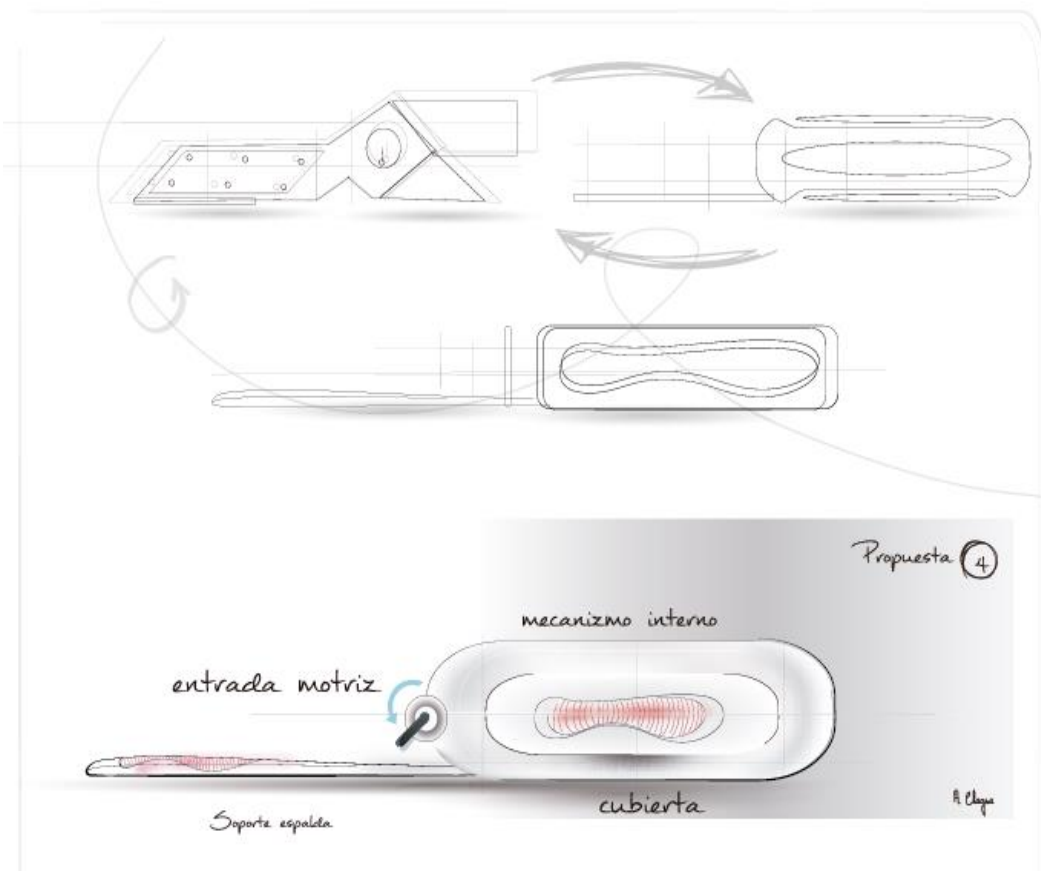


Figura 13. Proceso de diseño de la Forma 4. Sistema con soporte acolchado.

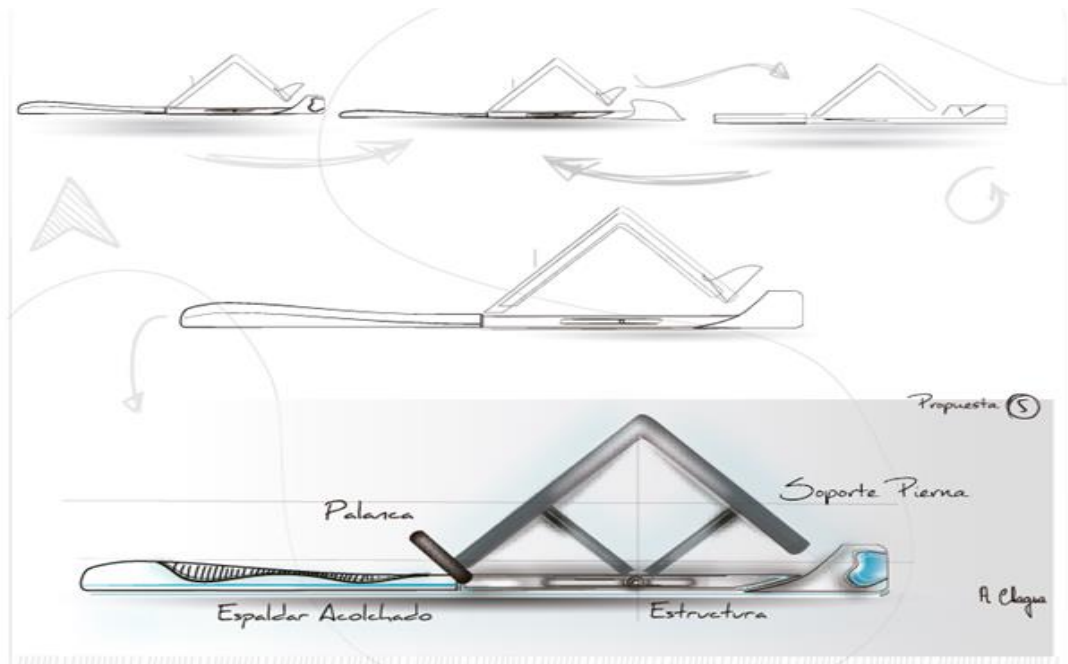


Figura 14. Proceso de diseño de la Forma 5. Sistema con soporte acolchado y mecanismo de 4 barras

En la figura 15, se observa que la Forma 5, considerando los criterios de selección en forma global resulta ser la más idónea y además cumple por encima de todas las alternativas con mayor puntaje en cada criterio; mientras que en la figura 16 se presenta el diseño final.

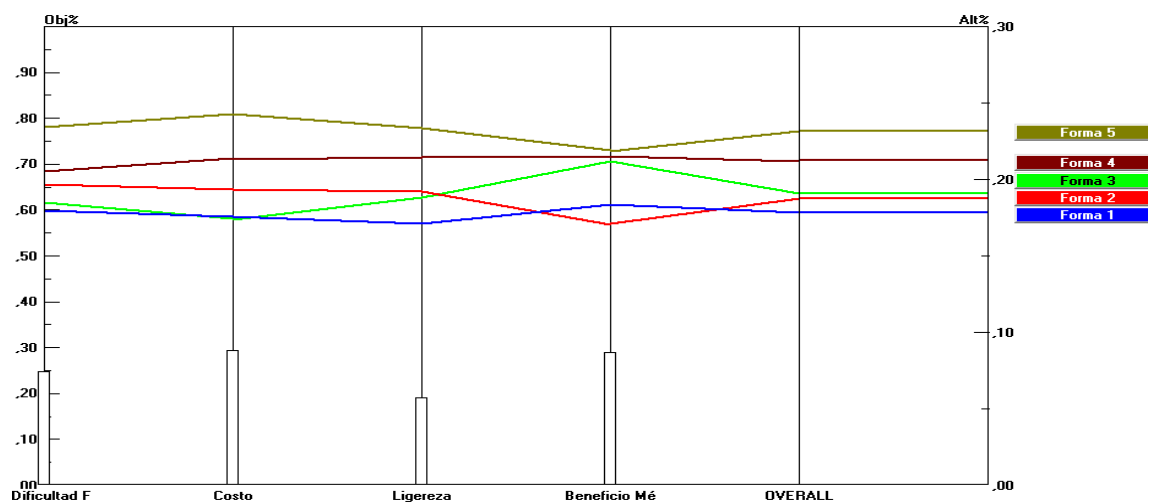
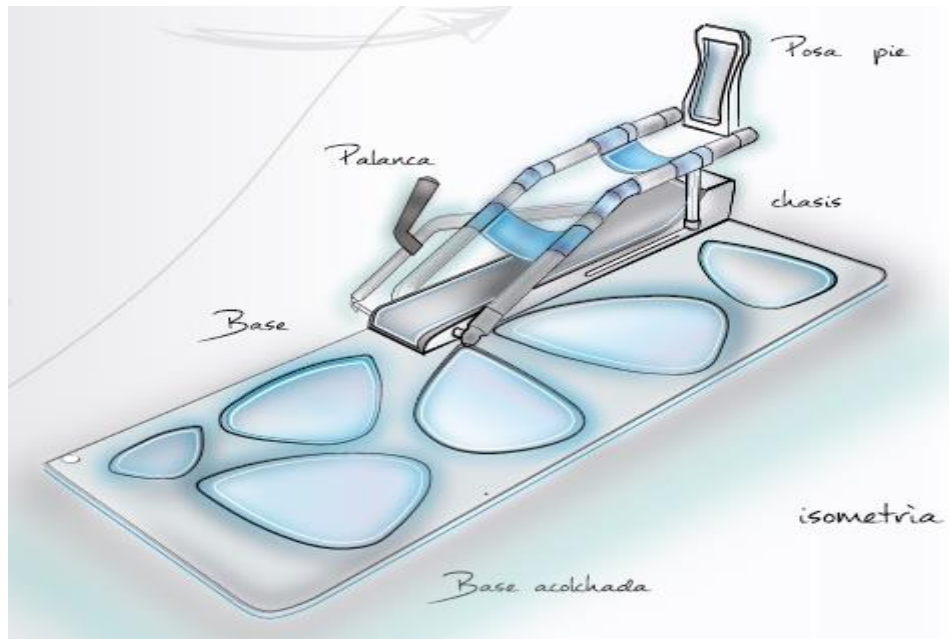


Figura 15. Evaluación de las alternativas de la forma







**Figura 16.** Boceto final de la propuesta seleccionada.

### Propuesta de Materiales

Tras la recolección de datos sobre materia prima, se obtiene la tabla 3.3 con las opciones disponibles de diferentes materiales para la producción del prototipo. Estos serán evaluados de forma análoga con el proceso de jerarquización planteado anteriormente, con el cual, se toma la opción más favorable considerando criterios claves.

**Tabla 3.** Propuesta de Materiales

Propuesta de materiales		
<b>Madera</b>	Materia prima de origen vegetal que se puede hallar dentro de la zona 1 perteneciente a Imbabura, de fácil acceso y posee amplia diversidad.	
<b>Guadua</b>	Recurso sostenible y renovable .Dentro de la zona es de fácil acceso , no tiene variedad pero es ideal para el trabajo por sus características físico motoras	
<b>Polietileno</b>	Es un material versátil fácil para trabajar, tiene un precio considerado, existe alta variedad de opciones para el trabajo con este material.	
<b>Acero</b>	El Acero es un material versátil y adaptable para trabajo Posee particularidades en sus características físico motoras y tiene un precio a considerar.	

Por último, se presenta la sensibilidad global para seleccionar la materia prima de los componentes del rehabilitador en la figura 17. En esta, se muestra que la opción del aluminio puede ser más liviana y se acopla a las necesidades planteadas y queda por debajo del ABS y, por lo tanto, ambos materiales se pueden trabajar conjuntamente y llegar a cumplir funciones complementarias en el desarrollo del prototipo, donde la impresión 3D de ABS corresponde a las uniones del rehabilitador.

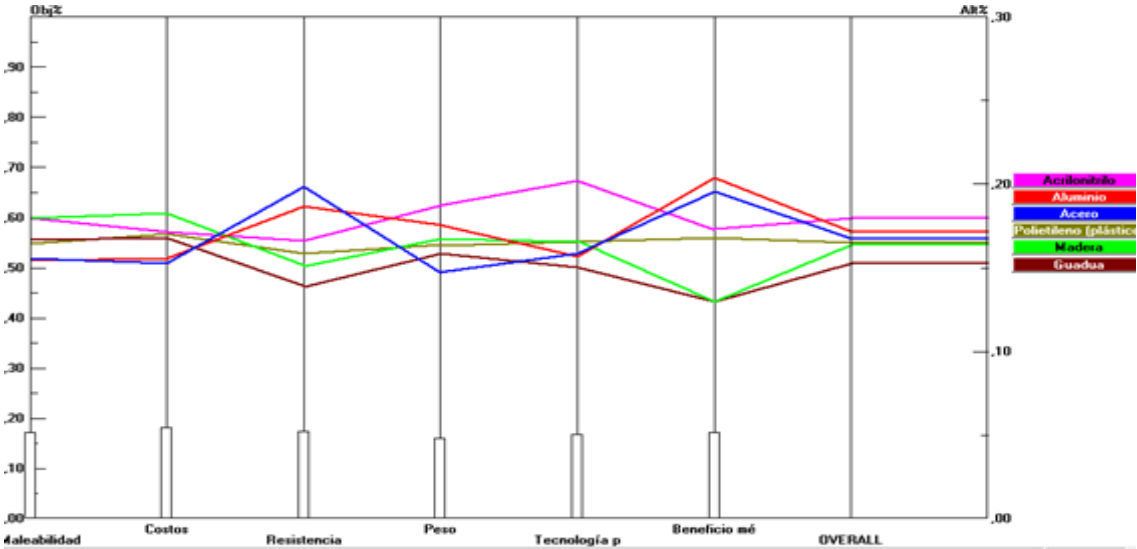


Figura 17. Evaluación de las alternativas para el material

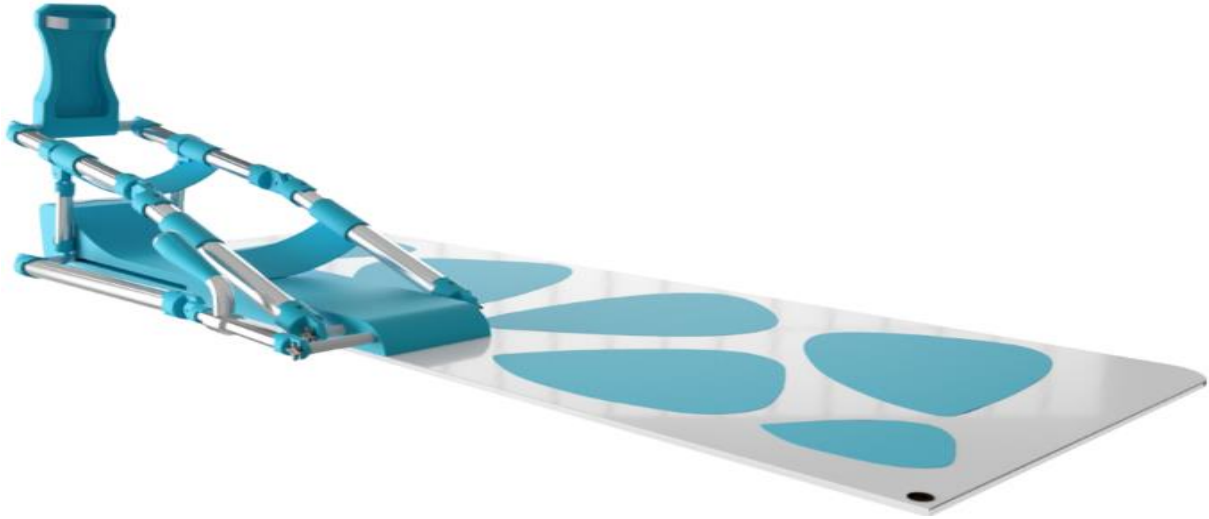
Se han presentado las alternativas para los mecanismos, formas y materiales que serán evaluadas según varios criterios asociados a los requerimientos de diseño y apuntan al sector salud como se observa en la figura 18. En esta, se detalla que los tres elementos fundamentales para el rehabilitador de rodilla apuntan a geometría sencilla para el mecanismo, formas curvas que suavizan la composición del ensamble del dispositivo y material que se encuentren en la región.



Figura 18. Pilares fundamentales de la metodología de diseño planteada

### **Generación de la geometría. Propuesta con Autodesk Inventor ®**

La forma cinco, corresponde a la que tiene mayor puntaje según los criterios para la selección jerárquica. En la figura 19, se detalla la propuesta final con su cromática. En esta, se puede ver que los colores dominantes están en armonía con el producto y su identidad ya que son tenues y cálidos.



**Figura 19.** Geometría propuesta para el rehabilitador de Rodilla y sus partes

### **Conclusiones**

El proceso de diseño conceptual para el dispositivo de rehabilitación de rodilla consideró la evaluación y selección de posibles alternativas de solución para el sistema de accionamiento, formas y material utilizando un proceso jerárquico con el programa expert choice ®, con el cual, se garantiza la mejor evaluación de los múltiples criterios.

Se desarrolló una propuesta de diseño que corresponde a un dispositivo de rehabilitación pasiva de rodilla, que cumple con movimientos de flexión y extensión, basado en un mecanismo de cuatro barras con un grado de libertad con materiales disponibles en el mercado nacional, donde el modelado y la documentación del rehabilitador se ha generado con el programa Autodesk Inventor ®

Se ha introducido dentro del proceso de diseño el uso de CAD, CAE proponiendo una metodología de diseño combinada que considerando factores estéticos y funcionales pueden llevar a corto plazo a la innovación de productos en el mercado nacional, ya que antes de construir el prototipo puede realizarse su representación y análisis en una geometría 3D.

## Referencias Bibliográficas

Archer, B. (2015) Metodología de diseño. Importancia de su aplicación en las disciplinas proyectuales. Argentina Publicaciones DC. Consultado el 15 de abril del 2017 de [http://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/publicacionesdc/vista/detalle\\_articulo.php?id\\_articulo=30&id\\_libro=7](http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/publicacionesdc/vista/detalle_articulo.php?id_articulo=30&id_libro=7)

Branch Thomas P; Cunningham Thomas; Dittmar Edward ; Jacobs Cale. (2016). Robotic Knee Testing Device, Subjective Patient Input Device and Method for using same. United States. US2016338649 (A1). Patente Internacional.

CONADIS. (2016). Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades. Informe Estadístico de Personas con Discapacidad. Quito, Ecuador: Ministerio de Salud Pública de Ecuador. Consultado el 25 de marzo del 2017 de <http://www.consejo discapacidades. gob.ec/>

Ding Xianglong; Yang Tao; Qian Feng; Ding Jitang; Zhao Zhen. (2016). Knee joint flexion function rehabilitation exercise device. China. CN20161 308652. Patente Internacional.

Guzmán Valdivia, C. H., Blanco Ortega, A., Oliver Salazar, M. A., y Azcaray Rivera, H. R. (2014). Modelado y Simulación de un Robot Terapéutico para la Rehabilitación

Hall J. (2017). Knee Rehabilitation Device. United States. US. 2017027799. Promotus Llc. Patente Internacional.

INEC. (2016). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Anuario de Estadísticas Hospitalarias: Egresos y Camas. Quito, Ecuador: Dirección de estadísticas sociodemográficas. Consultado el 25 de marzo del 2017 de: <http://www.ecuador en cifras. gob.ec/camas-y-egresos-hospitalarios/>

Rashid, K. (2017). Karimanifesto Consultado el 9 de abril del 2017, de <http://www.karimrashid.com/karimanifesto>

Schmitt, C., y Métrailler, P. (2004). The Motion Maker™: a rehabilitation system combining an orthosis with closed-loop electrical muscle stimulation. En 8th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation, Viena, Austria.

Swortec. (2017). MotionMaker™. Consultado el 25 de febrero del 2017. <http://www.swortec.ch/index.php/products/motionmaker>

Tian, F., Hefzy, M. S., & Elahinia, M. (2015). State of the Art Review of Knee–Ankle–Foot Orthoses. *Annals of biomedical engineering*, 43(2), 427-441.

Umchid, S., & Taraphongphan, P. (2016). Design and development of a smart continuous passive motion device for knee rehabilitation. In *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, 2016 9th (pp. 1-5). IEEE.

Vergara, M. Segnini, J., Provenzano, S., Chagna, A., Diez, J. (2017). Diseño de un Dispositivo para Autorehabilitación Pasiva de Rodilla no Supervisada. Vergara, M., Díaz, M., Rivas, F. y Restrepo, M. *Diseño de Equipos de Rehabilitación y Órtesis*. En prensa.

Wilkening, A., Baiden, D., y Ivlev, O. (2012). Assistive acting movement therapy devices with pneumatic rotary-type soft actuators. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*, 57(6), 445-456.

Xiaoning Li; Jianping Lu; Zhongsheng Sun; Yan Teng; Gang Yang. (2010). Flexible active and passive knee-joint rehabilitation training device. China. CN 201010146319. Univ. Nanjing Science & Tech. Patente Internacional.