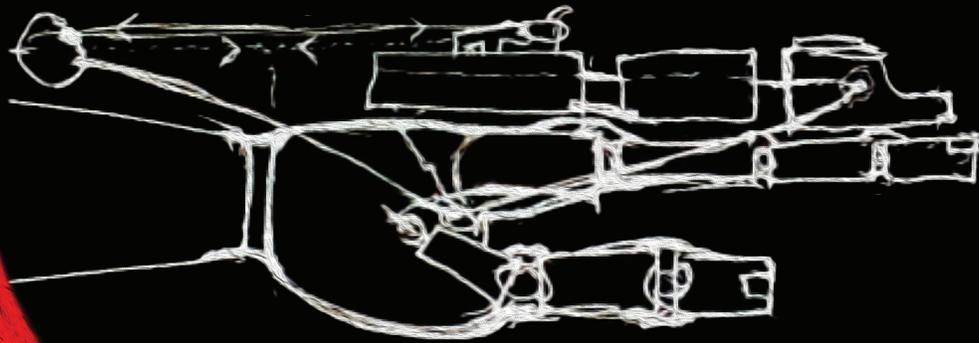


Tesis

Heurística

Diseño de una Ortoprótesis Flexible



Carlos Gilberto Gómez Monroy

2013

**Tesis de licenciatura
para obtener el título de Ingeniero Mecánico**

Heurística.
Diseño de una Ortoprótisis Flexible.

Autor

Carlos Gilberto Gómez Monroy.

Asesora de tesis

M. I. Rosa Itzel Flores Luna.

Institución

Facultad de Ingeniería, UNAM.

Lugar y fecha

México, Distrito Federal,
Noviembre de 2013.

“...mi propósito no es el de enseñar aquí el método que cada cual debe seguir para guiar acertadamente su razón, sino solamente el de mostrar de qué manera he tratado de guiar la mía.”

Descartes, Discurso del método.

Índice

Agradecimientos	7
Motivación	9
Introducción	11
Parte 1	
Estudio de Caso	15
1.1 Problemática	17
1.2 Objetivo	18
1.3 Investigación de antecedentes	18
1.4 Solución preliminar.....	22
Alcance original del proyecto y cambios propuestos.	23
Ventajas que justifican un nuevo diseño	25
Nuevos alcances.....	27
1.5 Diseño	27
Lógica –criterio- de diseño.....	28
1.6 Evolución del concepto de solución.....	31
Articulaciones pasivas	31
Articulaciones activas.....	36
1.7 Idea final	43
Eslabones planos unidos por un solo elemento	43
flexible con rotación en varios puntos.....	43
Primer prototipo	48
Manufactura del nuevo guante.....	51
Manufactura del segundo prototipo con articulaciones flexibles.....	53
Pruebas de funcionamiento	54
Resultados	59
Descripción del diseño final.....	61
Trabajo a futuro.....	62

Parte 2

Parte Filosófica 65

2.1 ¿Diseño?.....66

2.2 El recurso del método68

2.3 DesInformación.....69

2.4 Visualizar, imaginar y pensar.70

2.5 Consciente e inconsciente71

2.6 Switching71

2.7 Evolución de una idea o concepto.....72

2.8 Tiempo para pensar.74

2.9 Tiempo para descansar.....75

2.10 La imaginación como herramienta.....76

2.11 Momentos eureka y la serendipia77

2.12 Heurística78

2.13 Conclusiones y comentarios finales.....80

Bibliografía 83

Apéndice 85

Agradecimientos

Agradezco en breve y con profunda sinceridad a:

Mi familia, por hacerme creer en la magia de la vida y el tremendo sacrificio realizado.

La M. I. Rosa Itzel Flores Luna, por haberme otorgado total libertad creativa y la confianza que este gesto conlleva. Por su exagerada paciencia y, principalmente, por tener el valor de respaldarme en esta tesis de peligrosa índole.

El Dr. Enrique Chicurel Uziel, a quien considero mi mentor en las oscuras artes de la ingeniería, por regresarme la ilusión de crear y siempre tener tiempo para compartir su sabiduría y experiencia.

El M. I. Filiberto Gutiérrez Martínez, por ser un ejemplo a seguir de serenidad, de que el conocimiento se puede portar con humildad. Además, por dedicar incontables horas a mi formación como ingeniero.

Mis compañeros y amigos del grupo Mk, por compartir a lo largo de 10 años, sus conocimientos y demostrar que pueden convivir y enriquecerse mutuamente las distintas disciplinas profesionales.

Los integrantes del equipo RAC, por recordarme la importancia de vivir con alegría y sencillez.

Como mención especial, destaco que este trabajo se desarrolló en el marco de los proyectos PAPIIT IT102512 “Diseño de sistemas mecatrónicos aplicados al ser humano” y PAPIIME PE100911 “Diseño de productos mecatrónicos”.

Motivación

A lo largo de mis estudios de ingeniería fui conformando un criterio de diseño que contrasta con el enfoque contemporáneo convencional. No estoy plenamente convencido de aplicar, indiscriminadamente, herramientas, tales como: programas para dibujo y simulación 3D, metodologías, métodos, tablas y gráficas, para prácticamente todo lo que se necesite; que da la sensación de que la individualidad ya no es una ventaja sino una desventaja. Se busca estandarizar los procesos, los caminos por los cuales se llega a nuevos diseños, con la idea de mantener un nivel de alta calidad e imponer protocolos sobre todo y todos los involucrados a lo largo del proyecto de diseño.

Es por esto que decidí realizar para mi tesis de licenciatura un diseño propio con la filosofía de minimizar el uso del cálculo y dibujos 3D. Para pensar sobre diseño hay que diseñar.

“You can’t think about thinking without thinking about thinking about something.”

-Seymour Papert-

Introducción

“El inhibidor más común para el cambio, no son las limitaciones físicas sino las ideas, valores, opiniones y creencias de las personas.”

-Jones Charles Jones.

El formato de esta tesis es en parte crónica, en parte comentarios y observaciones personales; pues, sólo puede ver el camino recorrido hasta haberlo completado. Identificar las secciones más relevantes terminó por ser un acto de aparente irreverencia y arbitrariedad. Resulta difícil plasmar las ideas y conceptos, así como identificar los procesos invisibles por los cuales pasa quien diseña al resolver un problema desde una perspectiva personal. La finalidad de este trabajo es documentar la experiencia sin ataduras teóricas ni estandarizadas, es el relato de un viaje de introspección y revaloración de los fundamentos físico-matemáticos a la hora de confrontar problemas reales de diseño.

Este documento está dividido en dos secciones, la parte práctica y la parte filosófica o teórica, teniendo en cuenta que la teoría de diseño: explica qué es el diseño y qué se ha hecho durante su proceso, diferenciándose de la metodología de diseño, la cual es una colección de herramientas y técnicas para ser utilizadas por los diseñadores (Evbuomwan, 1996 , pág. 302).

Para poder llevar a cabo la tesis opté por un proyecto de diseño que me otorgara libertad creativa, fuera innovador y se pudiera realizar en un plazo de seis meses; obteniendo así, información sobre la manera en la cual mi cerebro afronta una situación de diseño. Cabe mencionar que el proceso de diseño y la identificación de los pasos dados por mi cerebro se hicieron de manera paralela. Al estar pensando en el problema, de repente identifiqué ciertos patrones o tuve ideas de cómo se llevaba a cabo la parte creativa, la que es llamada “pensamientos de caja negra”, en otras palabras, ideas que tenemos de manera inconsciente y surgen de manera repentina. Durante este periodo de creación y especulación perdí la línea que dividía lo que realmente había pasado en mi mente, de la teoría: es decir, se volvió confuso distinguir si era una idea propia o la había leído en algún lugar. Mi propia mente se convirtió en un ente iterativo y auto sugestionable. Como bien dice el dicho “el que busca encuentra”, después de unos días de estar pensando sobre algo en específico comencé a encontrar similitudes con gran cantidad de conceptos y disciplinas. El tiempo que utilicé para el desarrollo completo del proyecto fue, durante largos periodos, de gran

frustración, divagaba días enteros sobre el cómo y el porqué, sin tener un avance sustancial en el proyecto. Rápidamente el reto se convirtió en mantener, más o menos, el camino hacia la meta, la de entregar un producto final y funcional. Este divagar lo atribuyo en gran parte al objetivo de mi proyecto personal: pensar, y registrar, cómo sucede el proceso de diseño. El equivalente a trabajar y monitorear el trabajo, lo cual es trabajo doble.

Parte 1

Estudio de Caso

“Past a certain level of detail, the more one sees, the less one can tell what one is seeing.”

-Minsky, p. 88-

1.1 Problemática

La orto-prótesis con mecanismo de barras, (Torres, 2012), utilizada para realizar la flexo-extensión de los dedos índice y medio en una persona con parálisis braquial deja marcas considerables de lesión sobre la piel de la usuaria; aunado a esto se tiene la existencia, no deseada, de deslizamiento entre un eslabón del mecanismo y los dedos índice y medio a que dicho eslabón se sujeta, lo cual provoca el cese del funcionamiento del mecanismo.



Imagen 1. Lesiones, extracto (Torres, 2012, p. 156).

1.2 Objetivo

Eliminar o reducir considerablemente las marcas de presión en los dedos índice y medio, dejadas por la ortoprótesis con mecanismo de barras, (Torres, 2012), así como erradicar el deslizamiento entre la pieza y los dedos, colocando un mecanismo flexible que reemplace al par de eslabones y articulación.

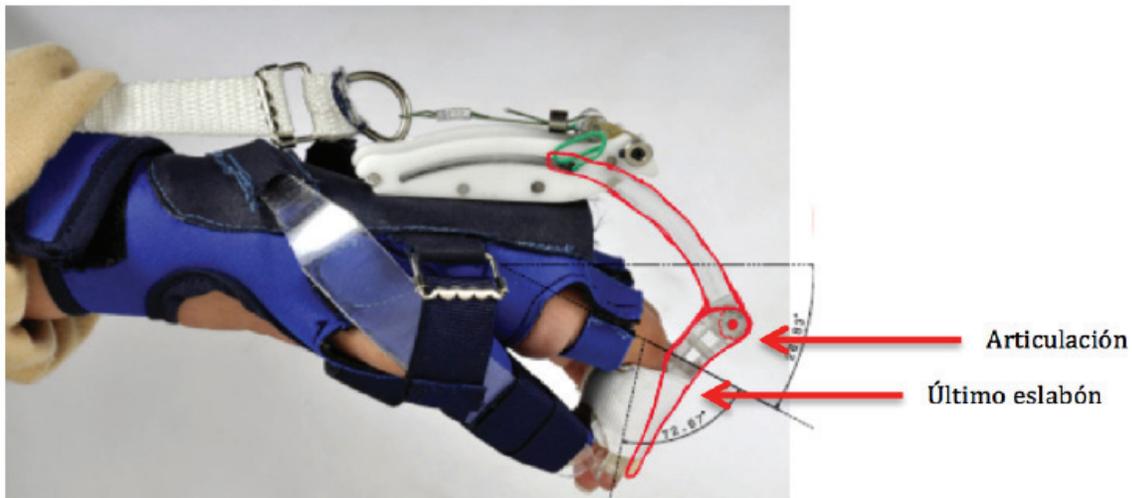


Imagen 2. Eslabón y articulación a reemplazar, (Torres, 2012, p. 157).

1.3 Investigación de antecedentes

Esta actividad comprende dos partes: la parte clínica (Cuadro clínico, consideraciones médicas y requerimientos para una orto prótesis) tiene como base la tesis “Diseño de orto prótesis para mano” de Torres, y la parte mecánica se fundamenta en literatura sobre mecanismos flexibles, patentes sobre dedos mecánicos y mecanismos flexibles.

Debido a los complejos movimientos descritos por la anatomía humana y a la dificultad para prever la reacción del cuerpo humano ante la interacción prolongada con los materiales, decidí respetar los puntos de sujeción utilizados por Torres quien realizó un estudio extensivo para la selección de estos puntos.

El mecanismo de Torres¹ está constituido por una guía de corredera circular, dos barras articuladas (una biela y la barra que sujeta la última falange de los dedos índice y medio) y un soporte semi-rígido, que sujeta al dedo pulgar, ver imagen 2. El mecanismo obtiene su fuerza de acción de un par de ligas restiradas y sujetas a la guía de la corredera y a la biela. La biela, impulsada por las ligas a través de la guía de corredera, transmite fuerza y movimiento a la barra sujeta a los dedos índice y medio, forzándolos a cerrarse.

¿Por qué utilizar elementos flexibles?

*“Imitar el movimiento humano es esencial
para el diseño de ortoprótesis y prótesis”
(Moon, 2006).*

La rotación en las articulaciones humanas se da de manera excéntrica, por lo que cualquier ortoprótesis con puntos de rotación monocéntricos fallará en reproducir la trayectoria natural. En cambio, la trayectoria de rotación en un mecanismo flexible puede variarse con mayor facilidad. Si incorporamos esta ventaja en el diseño de ortoprótesis se logrará la reducción de esfuerzos parásitos en los huesos y articulaciones del usuario.

Elementos flexibles como articulación

En la literatura sobre mecanismos flexibles resalta una característica geométrica que confiere flexibilidad a un elemento utilizado como articulación: en un caso se manifiesta como un adelgazamiento considerable en la sección transversal que permite un doblez en la parte delgada del elemento (Howell L. L., 2001, p. 6), y en otro caso se refiere al poco espesor de cintas delgadas sujetas a los extremos de dos piezas, formando una unión y restringiendo el movimiento entre ellas (Halverson, Howell, & Magleby, 2008) y (Howell L. L., 2001, p. 9).

1 Fabriqué una réplica exacta del mecanismo de Torres para analizarla a detalle.



Imagen 3. Articulación flexible; adelgazamiento transversal.

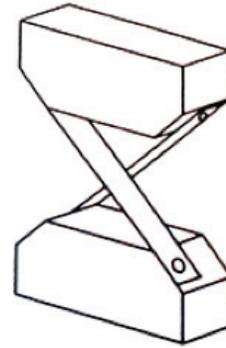


Imagen 4. Articulación con cintas, extracto (Howell L. L., 2001, p. 9).

Ventajas de los mecanismos flexibles (Howell L. L., 2001, p. 2).

Reducción de costos

- Reducción del número de piezas.
- Reducción del tiempo de ensamble.
- Proceso de manufactura simple.

Aumento de desempeño

- Aumento de confiabilidad al no requerir tornillos² entre eslabones.
- Reducción de mantenimiento.
- Reducción de peso.
- Aumento de vida útil.

² En el mecanismo de Torres, se utilizan varillas delgadas y roscadas como pernos en las articulaciones del mecanismo.

Tabla comparativa entre metales y plásticos para su uso como elemento flexible.

	Ventajas	Desventajas
Metales	<ul style="list-style-type: none"> • Baja susceptibilidad a la deformación por envejecimiento. • Vida útil calculable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta densidad. • Alta relación esfuerzo deformación.
Plásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Baja relación esfuerzo deformación. • Baja densidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variación en las propiedades mecánicas. • Susceptibilidad a la deformación por envejecimiento. • Gran elongación por fatiga.

Tabla 1. Creada a partir de información de (Howell L. L., 2001, pp. 30 y 31).**Sobre el diseño y cálculo de un mecanismo flexible**

Para el cálculo y diseño de mecanismos flexibles se destacan dos métodos: mediante métodos topológicos (Kerr-Jia & Sridhar, 2003) y por medio de síntesis de mecanismos flexibles con el concepto de cuerpo pseudo-rígido (Howell, Norton, & Midha, 1999). Cabe subrayar, que el primer método requiere software específico y cálculos avanzados, y el segundo implica conocer tanto la trayectoria como las fuerzas involucradas para poder determinar un modelo matemático.

1.4 Solución preliminar

Las ideas de solución presentadas en esta sección se crearon bajo las recomendaciones hechas por (Torres, 2012, pp. 10-16) para el desarrollo de una ortoprésis liviana, económica y de uso cotidiano.

Datos considerados para el diseño; el mecanismo debe:

- Ser ligero.
- Ser biocompatible (los materiales en contacto con la piel deben de ser amigables). Hipoalergénico.
- No tener picos o ángulos que se atoren en la ropa.
- No sobresalir más de 3 cm del dorso de la mano. Altura máxima del mecanismo.
- Tener lugares dónde sujetar la ortoprésis a la mano.
- Tener una forma de accionarse, cable a tensión.
- Implementar elementos flexibles¹.
- Tener un volumen menor o igual a la ortoprésis presentada por Torres.

Características del dispositivo deseadas por el usuario, (Torres, 2012, p. 64). A continuación, una selección de las más relevantes:

- Fácil manejo
- Fácil mantenimiento
- Que no sea pesado ni tan feo*
- Que esté lo más adherido a la mano **
- Fácil de instalar (con una sola mano)

¹ Este requerimiento proviene de los proyectos PAPIIT IT102512 “Diseño de sistemas mecatrónicos aplicados al ser humano” y PAPIME PE100911 “Diseño de productos mecatrónicos”.

- Que no se atore con la ropa
- Que corrija la postura de la mano*
- Que se integre de manera natural a la mano **

* Lo considero importante.

** Lo considero muy importante²

Alcance original del proyecto y cambios propuestos.

Como se verá a lo largo de este capítulo, los alcances del proyecto cambiaron durante las varias etapas e ideas que se tuvieron, pero siempre manteniendo el mismo objetivo. El propósito original se desglosa a continuación:

- Rediseño del eslabón que se encuentra en contacto con las falanges distal y medial de los dedos índice y medio, utilizando elementos flexibles.
- Fabricación del prototipo
- Evaluación del prototipo

Después de pensar y evaluar las diferentes formas de solucionar el problema, dadas las restricciones, características y alcances anteriormente expuestos, y no encontrar una opción satisfactoria, tomé la decisión de diseñar un mecanismo completamente nuevo.

Lista de contrariedades de la primera propuesta de solución que me llevaron a tomar esta decisión:

- La trayectoria del eslabón en contacto con el dedo no está definida totalmente por el mecanismo en sí, depende también de las articulaciones del propio dedo para su determinación.
- La dependencia que presenta la trayectoria del eslabón resulta en fuerzas con direcciones contrarias a la trayectoria deseada, lo que se traduce en deslizamiento entre eslabón y dedos.

² Esta valoración la hice de manera “prepotente”, pues considero que la estética de la ortoprótesis es de suma importancia para su integración efectiva en la vida del usuario.

- Sustituir la junta móvil y el último eslabón por un elemento flexible impactaría directamente en la eficiencia de transmisión de energía, ya que parte de la energía destinada a mover el dedo sería absorbida por el elemento flexible³.
- Diseñar un elemento flexible con pre carga para mitigar el problema anterior, resulta en otro problema: la reducción del espacio entre dedos y pulgar, necesario para tomar objetos.
- Para calcular el comportamiento de un elemento flexible en un mecanismo se debe tener un estado inicial y un estado final completamente definidos. Como es evidente, este no es el caso. Ante la necesidad de sujetar objetos de diferente tamaño la condición final no queda definida; por lo que es necesario, al menos, confinarla dentro de un rango de trabajo aceptable

Hacer que el movimiento del último eslabón fuese independiente resolvería las dos primeras contrariedades anteriores. Es decir, la trayectoria deja de ser dependiente de la unión entre eslabón y dedos. La fuerza de entrada se transmite directamente hasta el último eslabón.

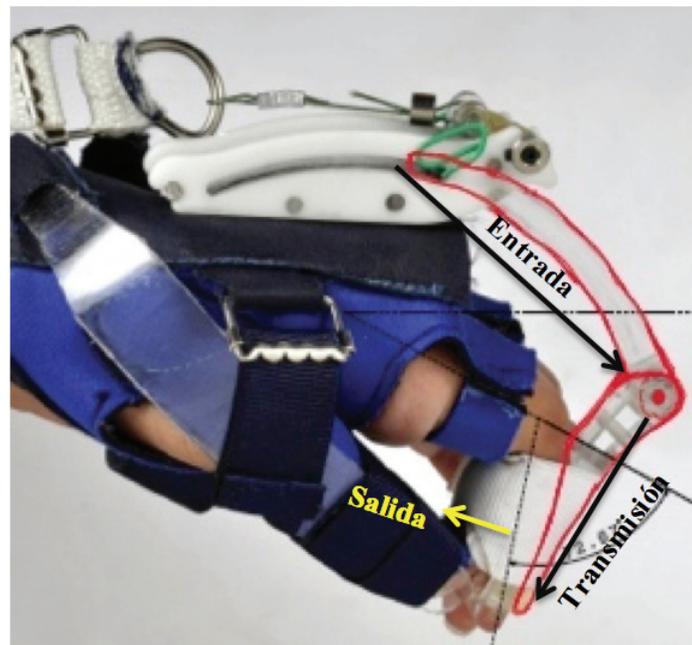


Imagen 5. Dirección de las fuerzas consideradas en el mecanismo de Torres.

³ En un mecanismo flexible, inherentemente, cierta cantidad de energía se guarda en forma de deformación elástica. Si la función de un mecanismo es la de transmitir energía de un punto a otro, no toda la energía será transmitida, (Howell L. L., 2001, p. 7).

Ventajas que justifican un nuevo diseño

- Desaparecer, o al menos disminuir, la lesión en los dedos índice y medio provocada por el mecanismo de barras.
- Disminuir el volumen de uso.
- Disminuir el número de piezas
- Aumentar la vida útil del producto
- Disminuir las fallas asociadas a los pernos: se salen de posición y en los bujes fallan las piezas.
- Dar un perfil bajo al dispositivo, que no llame la atención por su disposición geométrica.
- Aumentar el espacio disponible para la prensión.
- Otorgar soporte a los dedos índice, anular y meñique.

Volumen de uso

Defino el volumen de uso como el volumen ocupado durante el accionar del mecanismo, y aunque el mecanismo de barras es esbelto, su disposición lo hace aparentar mayor tamaño y la trayectoria de sus piezas crea un volumen muerto; es el volumen que ocupa alguna vez durante su desplazamiento. Como el volumen de uso depende de la trayectoria de las partes mecánicas, y no únicamente de la geometría de éstas, me delimité en obtener un promedio de tres volúmenes: al principio de la carrera, a la mitad y al final. La aproximación es por medio de prismas rectangulares, tomando en cuenta únicamente la parte del mecanismo que descansa sobre el dorso de la mano y dejando fuera las demás partes para compensar el volumen de sobra que enmarca el prisma.

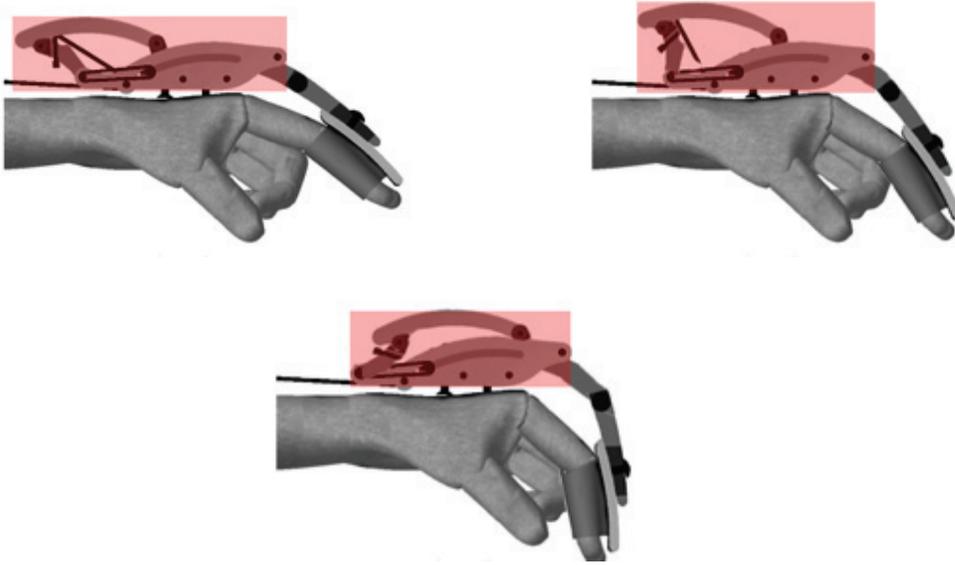


Imagen 6. Representación de los prismas considerados para obtener un aproximado del volumen de uso del mecanismo Torres. Completamente extendido, punto más alto del mecanismo y completamente cerrado.

Tabla de datos para la obtención del volumen de uso promedio del mecanismo de barras.

Ancho	Largo	Alto	Volumen
2	12	2.5	60
2	10	3.5	70
2	9.5	2.5	47.5
Promedio de volumen:			<u>59.2 cm³.</u>

Tabla 2. Datos en cm y cm³, respectivamente.

Nuevos alcances

Como ya se mencionó, y se ilustrará de mejor manera en la siguiente sección, integrar un elemento flexible al mecanismo de barras, (Torres, 2012), no soluciona la problemática planteada, por lo que diseñar un mecanismo nuevo en su totalidad acarrea la necesidad de establecer nuevos alcances para el proyecto.

- Diseño de un mecanismo completamente nuevo, utilizando la información recolectada y generada a lo largo del proyecto para el mecanismo de barras, (Torres, 2012, p. 97 y 102).
- Fabricación del prototipo.
- Evaluación del mismo.
- Comparación con el mecanismo de barras.

1.5 Diseño

Utilicé la imaginación de manera extensiva durante todo el proceso de diseño, visualizando el problema y el comportamiento de los posibles mecanismos, antes de hacer cálculos, dibujos 3D o la elaboración de un prototipo. Hay que observar que en esta tesis no se mencionan técnicas de selección de prioridades, ni técnicas creativas, tablas de ponderación de necesidades contra desventajas, ni el uso de ningún método establecido de diseño mecánico. Es decir, la toma de decisiones fue en base a la intuición mecánica y experiencia personal.

Lógica –criterio- de diseño

Teniendo como requerimiento que el mecanismo fuese controlado por un cable a tensión se tienen dos posibilidades: tener un mecanismo normalmente abierto o normalmente cerrado. En el primer caso, el cable al ser tensado otorga la fuerza requerida al mecanismo para la prensión. En el segundo caso, el cable sirve para abrir el mecanismo, el cuál se mantiene cerrado con la fuerza de un elemento elástico, ligas o resorte. En ambos casos es necesario introducir un elemento elástico que proporcione la fuerza para obtener el recorrido contrario al que proporciona el cable a tensión.

Determinar qué opción es la más conveniente no depende únicamente de consideraciones mecánicas, sino también de los requerimientos específicos del usuario final.

Cable a tensión fungiendo como:	Ventajas	Desventajas
Elemento de Potencia Mecanismo normalmente abierto	<ul style="list-style-type: none"> • Se aplica únicamente la fuerza necesaria. Se pueden tomar objetos frágiles sin romperlos. • Control de la fuerza aplicada. Fuerza variable. • La fuerza de prensión puede ser mayor que la de retorno del mecanismo. 	<ul style="list-style-type: none"> • La fuerza aplicada por el usuario se debe mantener todo el tiempo que se desee asir un objeto. • Alta fatiga muscular.
Elemento de Retorno Mecanismo normalmente cerrado	<ul style="list-style-type: none"> • Se aplica la fuerza únicamente una vez a lo largo de toda la prensión (sólo para abrir el mecanismo). • El usuario no necesita recordar aplicar fuerza. • Fatiga muscular reducida. • La mano se encuentra en una posición de descanso natural. 	<ul style="list-style-type: none"> • La fuerza de prensión en un punto de la trayectoria de cierre siempre es la misma. • Los objetos elásticos, que proveen la fuerza de prensión, sufren de envejecimiento. • Para abrir el mecanismo totalmente siempre es necesario proporcionar el equivalente a la fuerza máxima desarrollada por la liga.

Tabla 3. Ventajas y desventajas en la forma de utilizar la fuerza de entrada.

Para comenzar a pensar en soluciones es importante tener en cuenta cinco fuerzas: 1) la fuerza del cable, 2) la fuerza de la liga o resorte, 3) la fricción, 4) la energía almacenada por el elemento flexible del mecanismo y 5) la fuerza de reacción del mecanismo a la hora de sujetar los objetos. Y que la suma de cuatro de las fuerzas debe de ser igual a la quinta; como algunas de las combinaciones posibles no tienen sentido práctico, quedan dos viables: o la fuerza del cable es igual a la suma de las otras cuatro, o la fuerza de la liga o resorte lo es.

Tenemos lo ideal, posibles e imposibles de las fuerzas:

Mínimo de fricción en las partes móviles.	Mantener la fricción en su mínimo es un trabajo de optimización que se debe mantener en lo más alto de las prioridades de diseño.
Utilizar la menor fuerza posible en el cable (para no fatigar los músculos del usuario).	Para que el cable esté sujeto a la menor fuerza posible es necesario mantener la fricción al mínimo.
La fuerza de prensión debe de ser la suficiente para asir objetos livianos de uso cotidiano.	Determinar la fuerza <i>suficiente</i> , tomándola como la fuerza mínima requerida para asir exitosamente objetos cotidianos, es un proyecto por sí mismo. Por lo que utilizar objetos con forma y peso similares a los levantados por el mecanismo de Torres, será tomado como el referente de la fuerza suficiente.
La fuerza de la liga o resorte es proporcional a su deformación y no cambia con el uso ni el tiempo.	Es sencillamente imposible pero se hace la consideración de que ocurre. Posteriormente se puede determinar la vida útil de la liga o resorte.
Energía almacenada en el elemento flexible (Fuerza necesaria para deformar el elemento flexible).	Cualquier cantidad de energía que sea almacenada en el elemento es energía que no llega a la salida. Por lo que tiene un impacto negativo. Hay que mantener la energía almacenada en el elemento flexible baja.

Tabla 4. Desgloce de consideraciones.

La manera en la que interactúan estas fuerzas varía en cada posible diseño. Sin embargo, mantener la fricción baja es una restricción constante, teniendo en cuenta que la fricción impacta directamente en el desempeño de cualquier mecanismo, y que es fácil de visualizar y de mal interpretar.

Los puntos que mantuve en mente a lo largo del proceso de diseño son:

- Evitar grandes fuerzas normales entre superficies deslizantes.
- Tener superficies lo más lisas posibles.
- Tener las superficies más duras posibles.
- Evitar cargas puntuales deslizantes.
- Evitar grandes velocidades entre superficies deslizantes (esto aumenta su degradación, como lo es la caída en la calidad del acabado superficial, por lo que incrementa el coeficiente de fricción entre las superficies).

Para decidir si una idea es buena o mala (viable o no), decidí que las prioridades eran la manufactura y la precisión necesaria para obtener un mecanismo funcional. Ya que la precisión en un mecanismo eleva el costo de producción y aumenta la probabilidad de errores en el funcionamiento (tener mal una medida exige fabricar nuevamente una o varias piezas lo que significa dinero y tiempo desperdiciado). Así mismo, desarrollar un mecanismo que requiera de alta precisión significa hacer cálculos exhaustivos y planos de fabricación lo cual se trató de minimizar, como se menciona en la Motivación al inicio de este documento.

En la siguiente sección enlisto las varias ideas de solución y el porqué fueron “desechadas”, así como las partes que se aprovecharon de estas ideas .

1.6 Evolución del concepto de solución

Ideas propias, analizadas y consideradas como solución, que terminaron por formar parte del concepto final de solución.

Articulaciones pasivas

Variación geométrica simple

La manera más sencilla de reemplazar la articulación que contiene el último eslabón es sustituirlo por un elemento flexible con un adelgazamiento de área transversal (ver imagen 2) donde se requiere el giro. Con una variación en el patrón del adelgazamiento se determinan diferentes curvas de flexión.

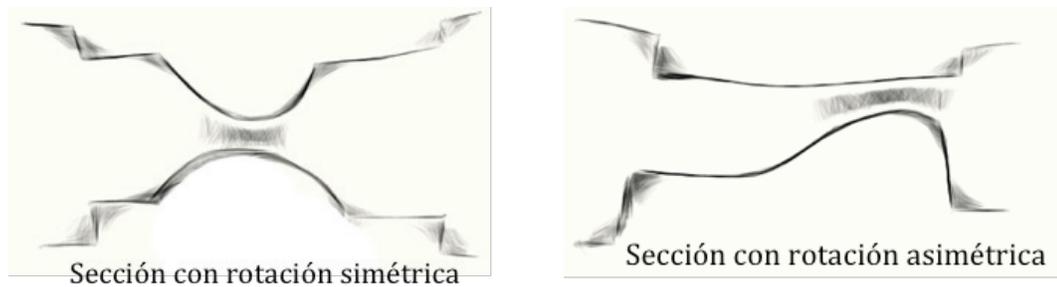


Imagen 7. Ejemplo de articulaciones flexibles: a) Sección con perfil simétrico y b) sección con perfil asimétrica.

El problema con esta solución es no tener estabilidad durante la aplicación de la carga, a lo largo de la trayectoria; es decir, la trayectoria no está delimitada únicamente por la fuerza de entrada al mecanismo y por la longitud de los eslabones, sino también por la fuerza de reacción presentada por el objeto a tomar, lo cual modifica el comportamiento de la pseudo-junta.

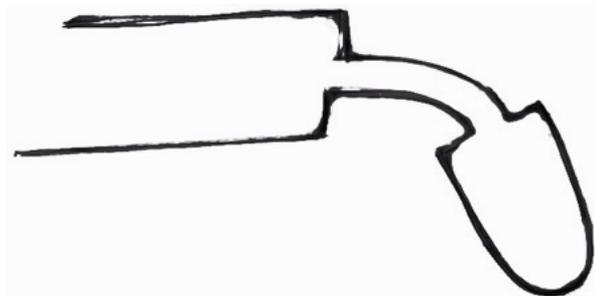


Imagen 8. Articulación flexible sin carga.

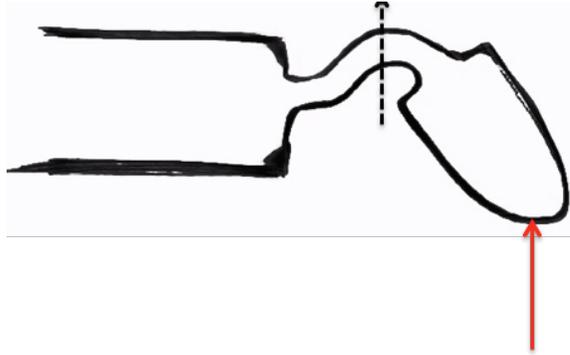


Imagen 9. Articulación flexible deformada por carga puntual.

Entre más amplio sea el radio de rotación requerido, será necesario aumentar la longitud de la parte delgada del elemento flexible, lo que agudiza el efecto adverso previamente comentado.

Variación geométrica con trinquetes.

Para evitar el desplazamiento vertical (véase imagen 9), se consideró utilizar trinquetes mecánicos (imagen 10).

El eslabón tiene la libertad de rotar, y cuando hay carga (ocurre el desplazamiento vertical) es detenido después de haberse deformado unos cuantos milímetros al embonar los dientes del trinquete mecánico (imagen 12). Al retirar la carga el trinquete se separa permitiendo la libre rotación del eslabón.

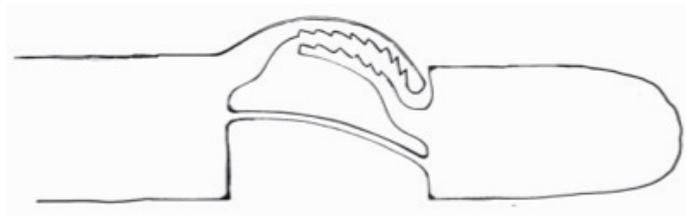


Imagen 10. Mecanismo en posición recta.

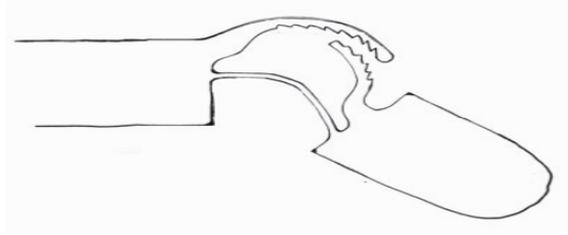


Imagen 11. Mecanismo después de rotar, sin carga.

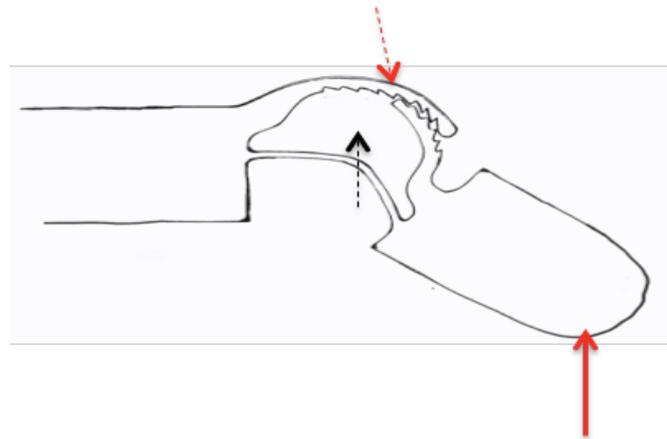


Imagen 12. Mecanismo rotado y con carga, ya bloqueado.

Problemas que persisten tras esta mejora.

- La curva de rotación debe de estar claramente definida, para que la distancia entre los dientes superiores e inferiores sea pequeña a lo largo de la trayectoria y así garantizar el correcto funcionamiento de la ortoprótesis.
- La longitud y disposición del trinquete es considerable, lo que aumentaría el volumen del mecanismo.
- Aún cuando se reduce el problema del desplazamiento vertical, el trinquete no es continuo, por lo que únicamente es funcional cuando los dientes de los brazos coinciden entre sí; lo cuál representa un impedimento para sujetar objetos cuya geometría corresponda al punto muerto del trinquete.

Guía interna (restricción geométrica)

Colocar una guía pasiva para restringir el movimiento vertical es una buena idea, sin embargo mantener un perfil bajo también es deseable. Esto se logra colocando la guía debajo del adelgazamiento (puente). De esta manera se logra tener continuidad de bloqueo en el sentido horizontal durante toda la trayectoria (imagen 13).

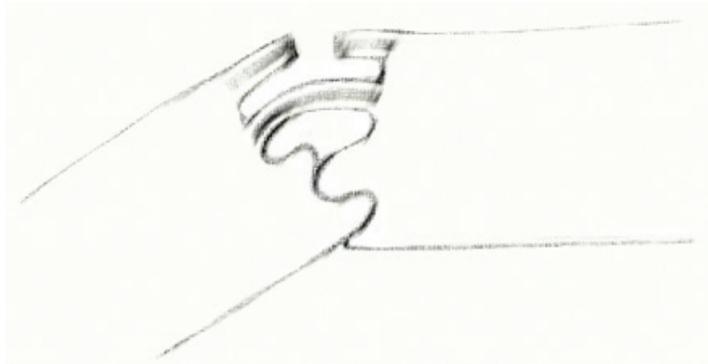


Imagen 13. Articulación flexible con guía, rotada a su posición final.

Ahora bien, persiste la necesidad de definir la curva de rotación, cuya trayectoria es única, y aparece un nuevo problema: la fricción. Tener dos superficies deslizantes es un motivo de preocupación, debido a que la guía se deforma con la carga; entre mayor sea la superficie de contacto de la guía mayor será la fuerza necesaria para continuar el movimiento. Siendo que el material debe de ser lo suficientemente elástico para permitir la flexión necesaria, y suficientemente rígido para que la guía logre su objetivo; la diferencia de grosor entre el puente y la guía debe de ser bastante grande al tratarse del mismo material, esto lleva a problemas de manufactura ya que el tener un puente muy delgado exige alta precisión en el corte.

Guía interna y puente subdivididos.

Subdividir el puente y la guía en varios segmentos así como utilizar dos materiales diferentes (uno flexible para el puente, material A, y otro rígido para el cuerpo de los eslabones, material B) (imagen 14). Aunque esto es contrario a las ventajas de diseñar mecanismos flexibles, el aumento de piezas y problemas de ensamble se justifica al tener como ventaja el equivalente de un trinquete mecánico continuo, tal como la guía única e interna, además de no aumentar el volumen de uso (a diferencia del trinquete dentado).

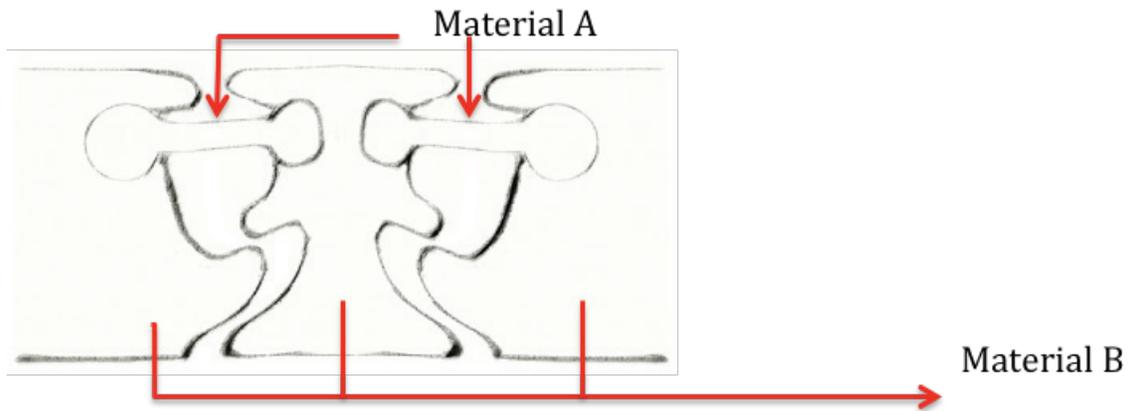


Imagen 14. Articulación flexible subdividida, posición recta.

Problemas

- Se requiere una curva exacta y específica, de igual manera que sucede en la Variación geométrica con trinquetes.
- Es necesario hacer cálculo preciso de la segmentación.
- Manufactura de precisión elevada.

De esta manera se logra implementar elementos flexibles en lugar de una junta rotacional convencional. Sería cuestión de proceder a hacer dibujos en CAD y realizar los cálculos pertinentes.

Sin embargo el problema principal de eliminar la marca de uso en los dedos del usuario no se erradica. Pues el mecanismo sigue siendo dependiente de la restricción rotacional impuesta por la unión entre el último eslabón y los dedos. Y como ya se mencionó, una componente de la fuerza que está siendo restringida por esta unión es la fuerza que provoca la lesión en el usuario.

Reconsiderando la raíz del problema inicial: la transmisión de la fuerza que hace rotar al último eslabón se puede hacer mediante otro principio de restricción geométrica, que no dependa de la unión entre dedo y eslabón, y además incorpore un elemento pre-cargado que posibilite ejercer el momento de rotación directamente en la articulación misma del mecanismo.

Articulaciones activas

A continuación se analizan las ideas de solución con transmisión de fuerza en la articulación (Pseudo-articulaciones Activas).

Efecto Tortilla

Para tratar de resolver el problema, se hizo un cambio fundamental en la operación del mecanismo, pasando de articulación pasiva a activa; dicho cambio ocurrió al madurar esta idea. El nombre del concepto y el cómo surgió se describe en la sección Momento eureka y serendipia (Pág. 77).

Si se tiene una hoja cuadrada de hule y se sujetan dos de sus esquinas (1 y 2), las otras dos esquinas (3 y 4) serán capaces de sostener una carga (en símil de una viga en cantiléver), dependiendo de la rigidez, espesor del material y de la longitud del cuadrado.

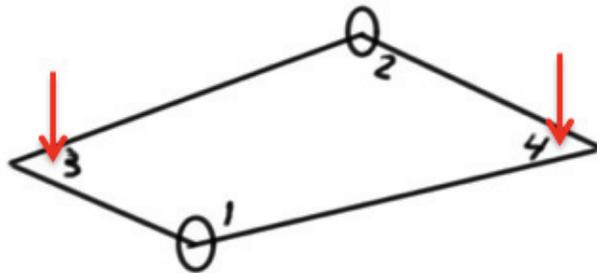


Imagen 15. Esquema, hoja de hule plano con dos apoyos, soportando cargas pequeñas.

Ahora, si se deformase el cuadrado de tal manera que 1 y 2 estén más cerca, tomando una forma de “U”, los puntos 3 y 4 podrán soportar una mayor fuerza.

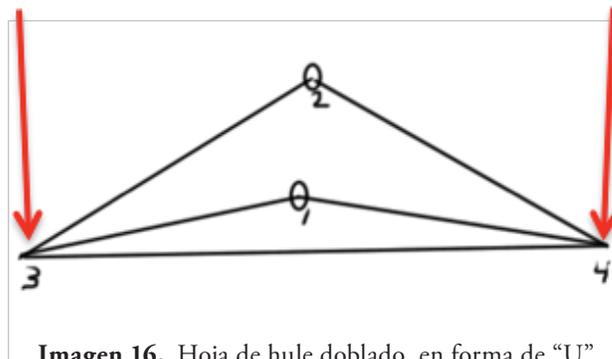


Imagen 16. Hoja de hule doblado en forma de “U” soportando cargas mayores que en estado plano.

Entonces, existe una relación entre la curvatura del hule y la fuerza soportada en los puntos 3 y 4. Esta relación es continua, desde el punto inicial donde 1 y 2 se encuentran en el mismo plano que 3 y 4, donde es el mínimo de fuerza que este hule es capaz de resistir, hasta el límite donde 1 y 2 se tocan, para tal caso sería el máximo. La diferencia de magnitud entre el mínimo y el máximo es considerable.

Ahora bien, si se utiliza el mismo principio y se añade un doblez en las puntas 3 y 4, y teniendo en mente que es un hule, estos dobleces tienden a regresar a la posición colineal, entonces, la manera en que se comporta la fuerza que intenta regresar los puntos 3 y 4 a su posición original depende, igual que en el caso anterior, de la curvatura del doblez y de la cercanía de los puntos 1 y 2.

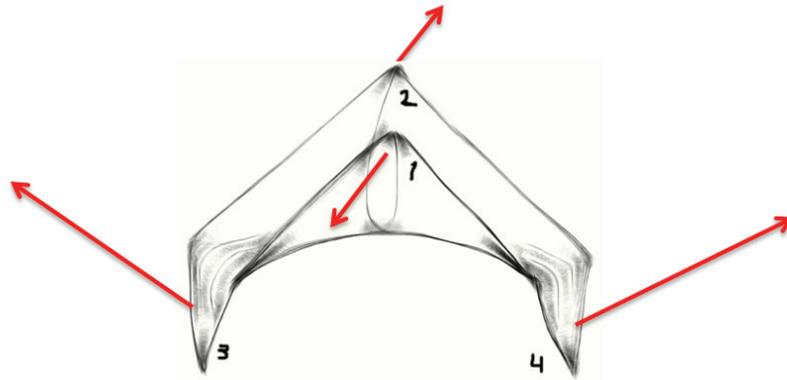


Imagen 17. Representación de las fuerzas de reacción que actúan sobre la hoja de hule deformada.

Al colocar una liga entre 3 y 4 se tendría un juego de componentes elásticos deformados que aportan, por un lado la fuerza variable dada por la geometría del hule y por otro lado la fuerza de la liga. De este modo, cuando la fuerza variable es mayor que la de la liga, los puntos 3 y 4 subirán, y cuando dicha fuerza es menor bajarán. Utilizar este arreglo, (imagen 18), en lugar del puente sencillo, posibilita desarrollar el momento necesario para la rotación del último eslabón.

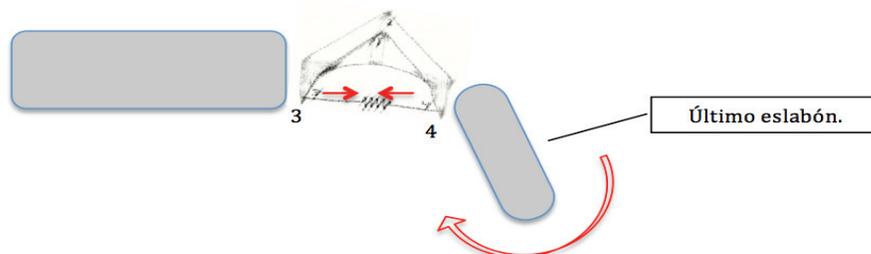


Imagen 18. Cuando la fuerza de la liga es mayor que la ejercida por el elemento de hule, los puntos 3 y 4 tienden a acercarse.

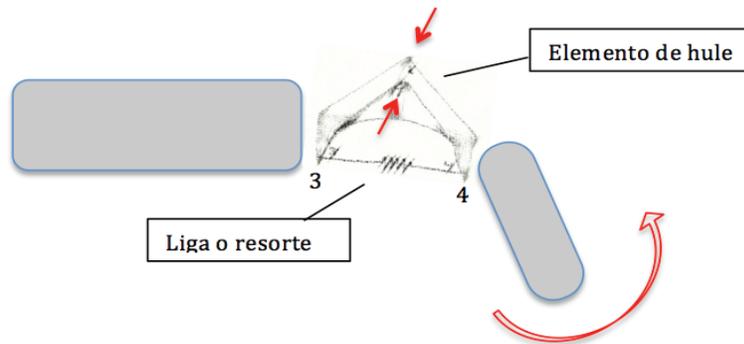


Imagen 19. La fuerza de la liga es menor que la ejercida por el elemento de hule. Los puntos 3 y 4 tienden a alejarse.

Ventajas de este sistema

- Es un mecanismo policéntrico, pues el centro de rotación instantáneo varía conforme la flexión de la hoja de hule lo hace.
- No es necesario definir una curva exacta, el eje de rotación puede cambiar de ubicación; se eliminan las restricciones que impone una trayectoria de rotación única.
- Se independiza la rotación del último eslabón y por consiguiente se reduce el esfuerzo que crea la lesión en el usuario.

Desventajas

- Hay que re-direccionar la fuerza de acción 90 grados; la dirección de la fuerza necesaria para activar el mecanismo debe de ser perpendicular a la orientación de los dedos índice y medio, mientras que la orientación de la fuerza proporcionada por el cable a tensión es paralela a la orientación de dichos dedos.

Fijar los eslabones al elemento flexible es un gran problema. Dado que la deformación previa es necesaria para obtener los efectos deseados, la unión es una paradoja: si se rigidiza la unión, disminuye la deformación del elemento de hule y por consiguiente la fuerza proporcionada por el mismo, y en caso contrario, el eslabón tendrá la libertad de moverse de manera perpendicular a la trayectoria deseada volviendo inútil el mecanismo.¹

¹ Se realizó una maqueta para demostrar el principio de funcionalidad, donde se evidenció esta situación. La maqueta sí funcionó, aunque la escala fue 10 veces mayor a lo funcional dentro del mecanismo.

Palanca con soporte y nuevo punto de rotación

Tratando de preservar la mayor parte del mecanismo original de Torres como fuese posible, y a su vez incorporar la fuerza que produce el momento de giro cerca de la articulación, se consideró colocar un segmento adicional, A, que uniera la guía de la corredera con el último eslabón, además de reemplazar la articulación de perno por la de una disminución geométrica (unión flexible, B). De esta forma, al desplazarse la corredera y empujar al último eslabón, el movimiento de éste queda restringido por el nuevo elemento, A, provocando un momento de giro en el último eslabón.

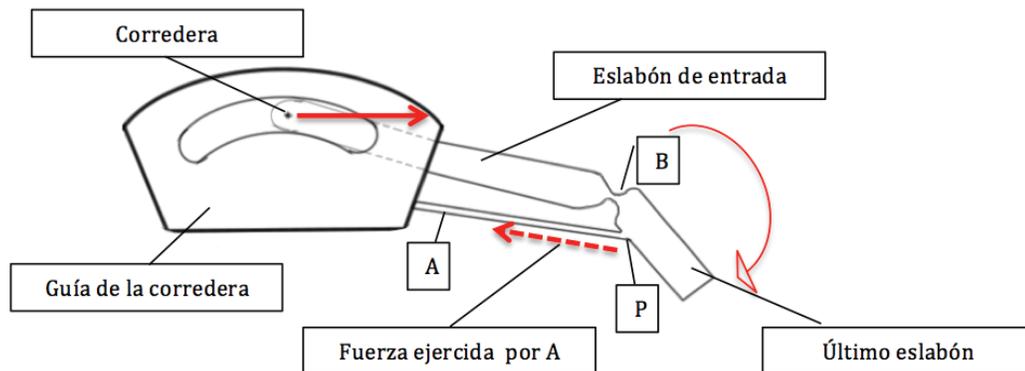


Imagen 20. Arreglo de mecanismo, reemplazando la articulación convencional por dos flexibles, una como punto de rotación, B, y la otra como punto de apoyo, P, para un brazo palanca.

La ventaja mecánica está dada por una relación entre distancias, que comprende la distancia entre la articulación flexible, P, el punto de contacto de la fuerza resistida y el punto sobre el cual se aplica la fuerza de entrada. Ésta última varía dependiendo del punto de la trayectoria sobre el que se encuentre el mecanismo. Siendo mayor al encontrarse el eslabón de entrada más cercano a la perpendicularidad de la línea que define el brazo palanca con respecto al punto de giro P.

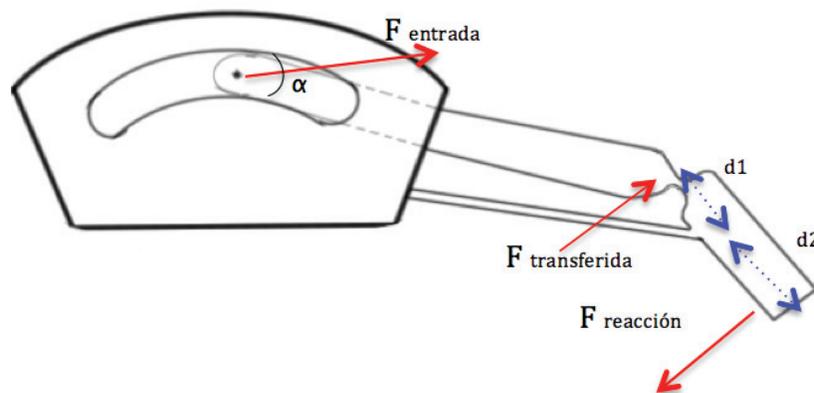


Imagen 21. Diagrama mostrando las fuerzas, distancias y el punto de rotación, considerados en el último eslabón.

La fuerza de entrada, proporcionada por una liga, disminuye conforme la corredera avanza y por lo tanto también lo hace la fuerza de reacción. La posición en la que se transmite la fuerza al brazo de palanca de salida, a través de la junta flexible, B, define parte de la eficiencia total del arreglo.

Ventajas

- Se conserva el perfil del mecanismo de barras.
- Se implementan elementos flexibles.
- Se implementa fácilmente, sólo hay que intercambiar una pieza en el mecanismo original de barras.
- Se conserva la ventaja mecánica descrita por (Torres, 2012), de tener una corredera circular.
- Se mitiga la dependencia de sujeción entre eslabón y dedo.

Desventajas

- El perfil del mecanismo sigue siendo prominente respecto a la geometría de la mano.
- Al colocar el nuevo brazo A en el último eslabón, y ponerlo sobre el punto de rotación, aumenta el volumen.
- Así mismo, se incrementa tanto la altura del mecanismo como el volumen de uso (volumen ocupado, alguna vez durante la trayectoria, por alguna de las partes del mecanismo).
- La corredera circular, en su función original, tiene un solo grado de libertad, por lo que unirla a un punto de rotación determinado por un elemento flexible causa esfuerzos internos ya que la trayectoria natural de cada uno no coincide. Así que sería necesario desarrollar la geometría del elemento flexible capaz de reproducir la misma curva que la dada por la corredera circular.

Arreglo topológico

El comportamiento de un mecanismo flexible también está dado por el lugar donde se posicionan sus partes dentro de un marco. Es decir, los mismos elementos, fijos entre sí y distribuidos dentro del mismo volumen, en diferente orden, tienen diferente salida de movimiento. A esto se le llama topología y se explica claramente en (Kerr-Jia & Sridhar, 2003).

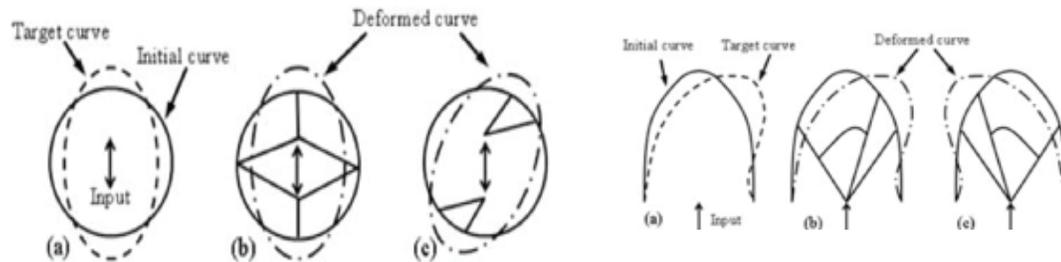


Imagen 22. Ejemplos del fenómeno topológico en la deformación de mecanismos flexibles (Kerr-Jia & Sridhar, 2003, p. 385)

Utilizando este concepto, se puede diseñar un mecanismo, de una sola pieza, que reproduzca la trayectoria deseada al deformarse bajo las restricciones impuestas por la topología interna. Por ejemplo, aplicando la fuerza en la parte superior para que esta se desplace en relación con la parte inferior, véase la imagen 23.

Este arreglo, imagen 23, es la primera idea de solución que no conserva nada del mecanismo original de Torres. Es interesante comparar la morfología de esta idea con el prototipo final. Se respeta la distancia y la disposición de algo parecido a los eslabones o segmentos rígidos que se unen entre sí mediante articulaciones.

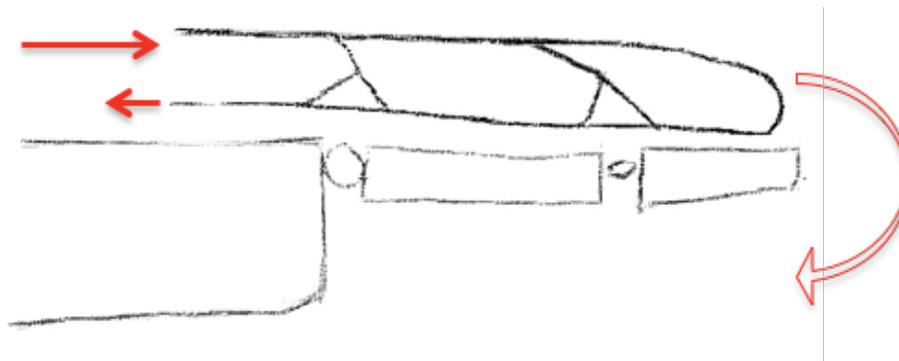


Imagen 23. Esquema de idea de solución utilizando el fenómeno topológico en la deformación de un mecanismo flexible.

Ventajas

- Una sola pieza
- Esbelto
- Liviano
- Económico
- Imita la morfología de la mano.
- Reproduce la trayectoria natural de la mano.
- La geometría del mecanismo no sobresale en demasía del contorno de la mano.
- Se disminuye considerablemente el volumen de uso del mecanismo.

Desventajas

- La obtención de la disposición correcta de la topología necesaria para reproducir la trayectoria curva, requiere de software específico.
- La manufactura requiere una alta precisión.
- La capacidad de carga está relacionada con el grosor del material, y a su vez con la energía necesaria para flexionar el mecanismo, es decir, entre más grueso sea, más podrá cargar, pero mayor será la energía empleada en doblar el material.
- Aunque tenga una trayectoria definida, el mecanismo se comporta de diferente manera dependiendo de la fuerza de resistencia que encuentre. De igual manera que se presentó en la “*Reducción Geométrica Simple*”.

1.7 Idea final

Eslabones planos unidos por un solo elemento flexible con rotación en varios puntos

En las diferentes ideas, la variación longitudinal en la superficie de los dedos causada por la flexión de los mismos, es un inconveniente siempre presente, sin importar la geometría ni el número de elementos. **En una nueva idea, la variación longitudinal se utiliza como principio de funcionamiento.**

Como la longitud de arco recorrida por un punto que se mueve con trayectoria circular depende de la distancia angular recorrida y del radio de giro, es posible determinar la posición del punto en función de la longitud de arco recorrida, si se conoce el radio de giro.

Tener una cinta que sea parcialmente rígida y que además tenga la capacidad de deslizarse sobre los dedos a flexionar, da la movilidad requerida y resuelve los problemas descritos en la sección “Problemática” al inicio de este capítulo. Esta cinta especial seguiría de manera natural la trayectoria delimitada por las restricciones dimensionales impuestas por los dedos, adaptándose automáticamente al ángulo de rotación de las falanges de los dedos. La cinta especial operaría de manera inversa a como lo hacen los tendones en un dedo, estos funcionan a tensión mientras que la cinta lo haría a compresión, al transmitir la fuerza que activaría el último eslabón.

Puesto que una de las principales contrariedades del mecanismo de Torres es la dependencia absoluta de la sujeción entre mecanismo y dedos, suena ilógico desarrollar un nuevo sistema con el mismo problema. Dicha dependencia se evita al utilizar otro concepto que apareció en varias ideas anteriores: agregar un elemento que sobrelleve las solicitudes a que originalmente se encontraba sometido el último eslabón, y que consiste en un elemento flexible paralelo al dedo y por consiguiente a la cinta transmisora de fuerza.

La cinta semi-rígida impulsora tiene que ser flexible para permitir el doblez que requiere la rotación del último eslabón, y al mismo tiempo no admitir deformación por compresión ya que en vez de transmitir movimiento, únicamente se comprimiría. La energía que se utilice para curvar la cinta no será transmitida, por lo que, entre menor sea la resistencia que se oponga a esta flexión, más efectiva será la transmisión de energía.

Por otra parte, se requiere que el elemento paralelo a la cinta impulsora, que debe resistir la fuerza que provocaría el desplazamiento del eslabón sobre el dedo, no oponga resistencia al doblar y no ceda a la tensión. Una cinta textil es ideal ; y es esta, la que se apoya directamente sobre los dedos.

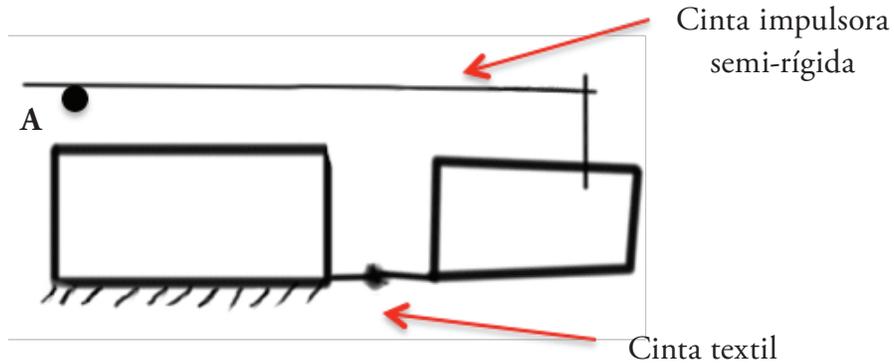


Imagen 24. Posición recta; No se ejerce fuerza y no hay flexión.

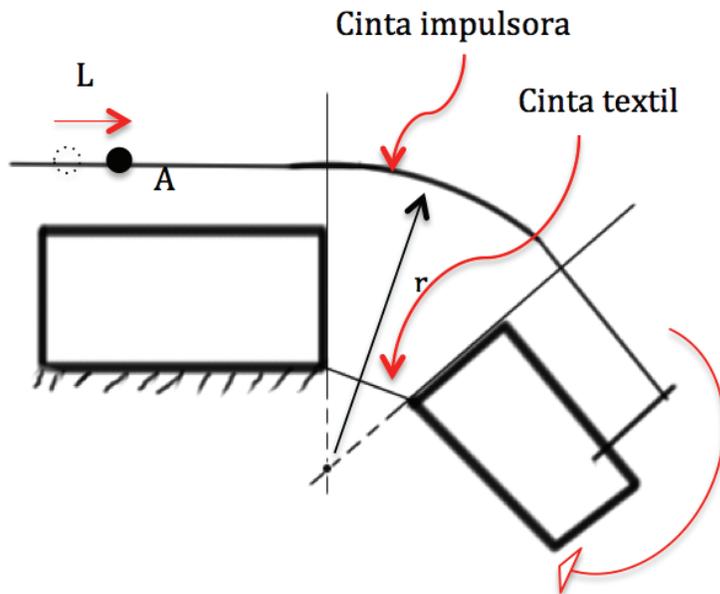


Imagen 25. Se aplica fuerza a la cinta semi-rígida y causa la rotación del último eslabón; la cinta se flexiona durante la rotación.

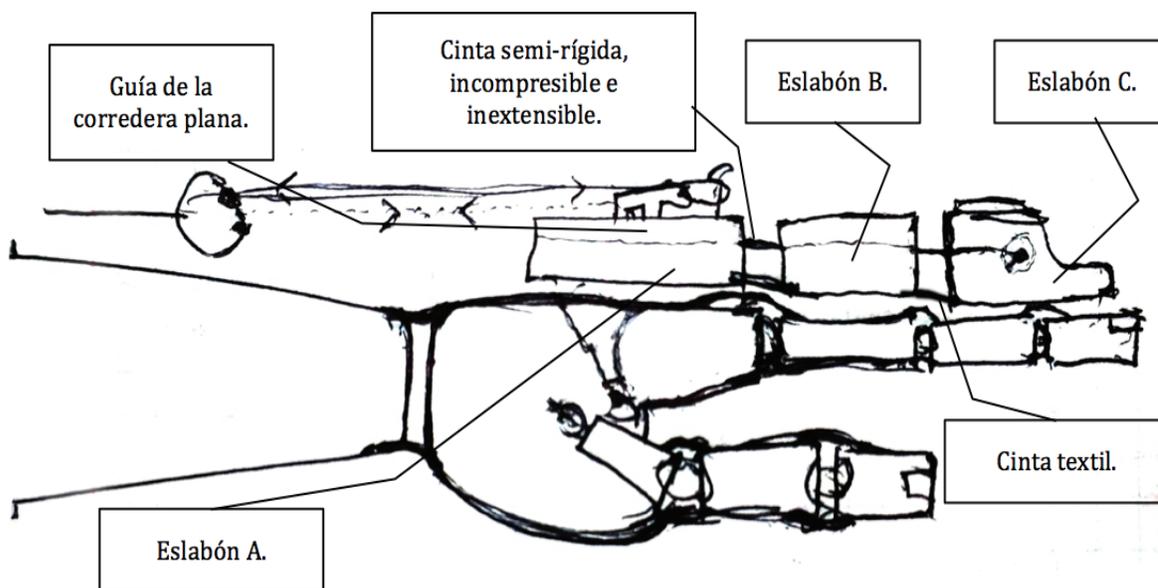


Imagen 26. Esquema del nuevo mecanismo con dos articulaciones sobre la mano.

Colocando una segunda articulación en serie se tiene un mecanismo capaz de realizar el movimiento de prensión y, además, resuelve el problema de la presión excesiva en un área reducida de los dedos accionados.

La cinta semi-rígida se desliza libremente por dentro de los elementos rígidos que se encuentran sobre el dorso de la mano, y está unida al último elemento por el cual no desliza. Dentro de la guía de la corredera plana, la cinta semi-rígida está unida a la corredera, y sobre esta última actúan las ligas, las cuales proporcionan la fuerza de acción al mecanismo. El eslabón “A” está sujeto al dorso de la mano, ver imagen 26, y el eslabón “C” lo está a la última articulación de los dedos medio e índice, mientras que el eslabón “B” se encuentra cautivo entre “A” y “C” restringido por las cintas textiles cuyas longitudes permanecen constantes. Al comenzar el recorrido de la corredera en “A”, y al ser incompresible la cinta superior, se desarrolla la rotación de los eslabones “B” y “C”. En resumen, las ligas impulsan la cinta semi-rígida a través de la corredera lo que provoca que los dedos índice y medio se cierren hasta tocar el dedo pulgar. Para abrir la mano, el usuario debe jalar la cinta semi-rígida en dirección contraria, ver imágenes 37 y 38.

De esta manera, el mecanismo desarrolla la trayectoria deseada sin depender de la sujeción entre el último eslabón y los dedos, ahora depende de la combinación de cintas semi-rígida y textil. Al estar fijado a la mano desarrollará la trayectoria de manera más uniforme. Es decir, aunque el movimiento del mecanismo es independiente de los dedos, el funcionamiento se beneficia al trabajar, en conjunto con las restricciones geométricas de la mano, como un mecanismo paralelo.

Ventajas

- Esbelto.
- Perfil bajo.
- Fácil fabricación.
- Rango completo de movilidad en los dedos.
- Liviano.
- No hay zonas con esfuerzos concentrados, al ser áreas grandes sobre las cuales se desarrollan las solicitudes.
- El volumen de uso es prácticamente el volumen del mecanismo, es decir, la trayectoria de las partes está contenida en el volumen del mecanismo.
- No hay cargas puntuales deslizantes como en el mecanismo de Torres, lo que disminuye el desgaste por fricción.
- Las superficies que se encuentran en contacto deslizante son planas, por lo cual se pueden manufacturar con un alto grado de calidad superficial en una fresadora con bancada móvil.

Desventajas

- La fricción elevada es mortal para el funcionamiento.
- Baja relación mecánica.

Validación del concepto

La idea parecía buena, restaba por confirmar si era viable, si la longitud de arco creada era compatible con una altura de eslabón aceptable (máximo 20 mm, consideración/restricción personal).

La longitud de un arco circular está definida por:

$$L=2\pi r\alpha/(360)$$

donde alfa es el ángulo de arco, en grados, y “r” es el radio circular.

Los ángulos de flexión dados por (Torres, 2012) son: 29 grados entre los eslabones “A” y “B”, y 73 grados entre “B” y “C”. Para determinar estos ángulos se consideró que el punto de rotación se localiza en la parte media del grosor de la articulación del dedo; a partir de ese punto se definió el radio de giro, véase imagen 27.

La carrera total de la cinta semi-rígida queda definida como la suma de las longitudes de arco de la primer y segunda articulación, más la deformación extra que sufra la cinta debido a la flexión. Calculando la carrera de la cinta semi-rígida para un espesor de eslabón de 6 mm (medida estándar de acrílico), tenemos que:

$$L_1 = \frac{2\pi(6mm + 10mm)(29^\circ)}{360^\circ} = 8.1mm$$

$$L_2 = \frac{2\pi(6mm + 6mm)(73^\circ)}{360^\circ} = 15.3mm$$

$$L_{carrera} = L_1 + L_2 = 8.1mm + 15.3mm = 23.4mm$$

La longitud de carrera, sin tomar en cuenta deformaciones extras, es 23.4 mm. Considerando un 50% más de carrera por las deformaciones no calculadas y teniendo en mente que esta cifra es únicamente una aproximación, se estima en 35 mm la carrera total necesaria para una maqueta funcional

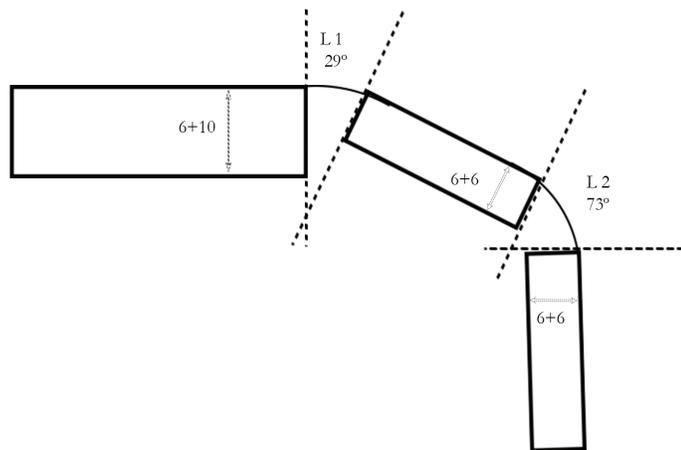


Imagen 27. El centro de rotación promedio se ubica a la mitad del grosor de la articulación del dedo.

Primer prototipo

Al considerar viable este concepto hice un prototipo para conocer su funcionalidad en la práctica. Utilicé acrílico por la facilidad de su manufactura (material utilizado también en el mecanismo de Torres), además de que el peso es una preocupación al diseñar orto prótesis. Utilizar el mismo material es una ruta lógica para tener idea del peso del mecanismo nuevo y compararlo con el de Torres. De igual forma, se utilizó el mismo tipo de ligas que en el mecanismo de Torres.

Para desempeñar la función de la cinta inextensible e incompresible, se utilizó un trozo de cinta métrica convencional, metálica, de media pulgada de ancho. La cinta textil que se escogió es un listón de media pulgada de ancho. Ambas cintas son, aproximadamente, del mismo grosor, como se pensó el concepto.

Manufactura del prototipo

Para fabricar 3 eslabones, corté 6 trozos de acrílico con las siguientes dimensiones en milímetros:

A • 6x30x75
• 3x30x75

B • 6x30x35
• 3x30x35

C • 6x30x25
• 3x30x25

Nótese que las dimensiones están en parejas, en grosores de 6 y 3 mm, correspondientes a la base y a la tapa del eslabón; se utilizaron estas medidas por ser grosores estándar del acrílico.

Luego procedí a realizar las siguientes operaciones: hacer un canal, a lo largo de la parte meda de las piezas de 6 mm, con una profundidad aproximada de 1.5 mm, con un cortador vertical de media pulgada de diámetro, en una fresadora con bancada móvil; en este canal se alojará la cinta. Taladrar orificios coincidentes en la base y en la tapa de cada eslabón, y sujetar ambas piezas con tornillos de un octavo de pulgada. Hacer una ranura para guiar la corredera, en el centro de la tapa de “A”, con un cortador vertical de un octavo, de una longitud aproximada de 35 mm (longitud calculada de la carrera total). Cortar 20 cm de cinta métrica y sujetar uno de sus extremos al eslabón “C”, y colocar un tornillo en el otro extremo y dentro de la guía para corredera hecha en “A”; el tornillo hace la función de una corredera. Sujetar el listón en la parte inferior de la base de cada eslabón, dejando una separación de 10 mm entre ellos. Sujetar la corredera, mediante un par de ligas, a la base de “A”. Hacer un pequeño orificio en la cinta para colocar un retén entre el eslabón “A” y el “B”.

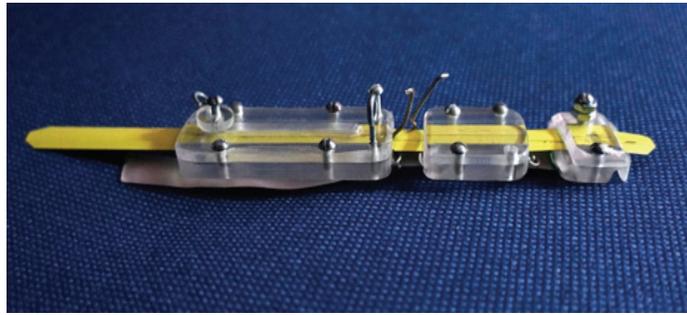


Imagen 28. Primer prototipo de 3 eslabones y con articulación flexible, extendido, sin ligas.



Imagen 29. Prototipo flexionado, con ligas.



Imagen 30. Prototipo presentado sobre la mano de la usuario final.

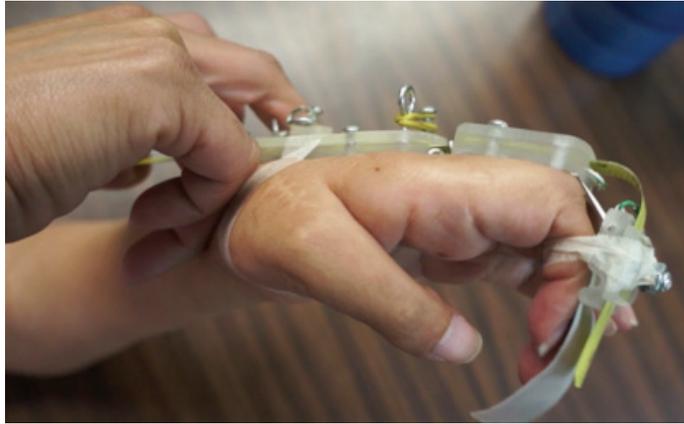


Imagen 31. Prototipo en flexión colocado en la usuario final.



Imagen 32. Prototipo sin retén, mostrando sobre-extensión en la cinta métrica.

Después de haber probado el prototipo mecánico, y de encontrar que su funcionalidad es satisfactoria, le pedí a la usuario final que me hiciera cualquier observación o comentario referente al nuevo diseño. Dentro de lo comentado resaltó la dificultad para sujetar el dedo pulgar al soporte del guante (originalmente se le entregó manufacturado en aluminio, y al fallar fue reemplazado por uno de plástico). Además expresó sus deseos por tener soporte en los dedos anular y meñique.

Teniendo esto en mente decidí rediseñar el guante en su totalidad, para mejorar la situación del dedo pulgar e integrar soporte a los dedos anular y meñique, y al mismo tiempo mejorar la estética general de la orto-prótesis, con líneas sencillas y apegadas a la geometría de la mano.



Imagen 33. Cordón y soporte de plástico para sujeción del dedo pulgar, utilizados en el guante de sujeción del mecanismo de Torres.

Manufactura del nuevo guante

Debido a la morfología particular de la mano de la usuaria, utilizar un guante disponible en el mercado no fue una opción viable, por lo que manufacturarlo a la medida fue la forma de actuar. Comencé por colocar Micropore® en el antebrazo, y en la mano hasta los nudillos, y sobre la totalidad del dedo pulgar. Después maqué líneas de corte para fragmentar en varias partes planas la superficie tridimensional creada por el Micropore® adherido a la piel.

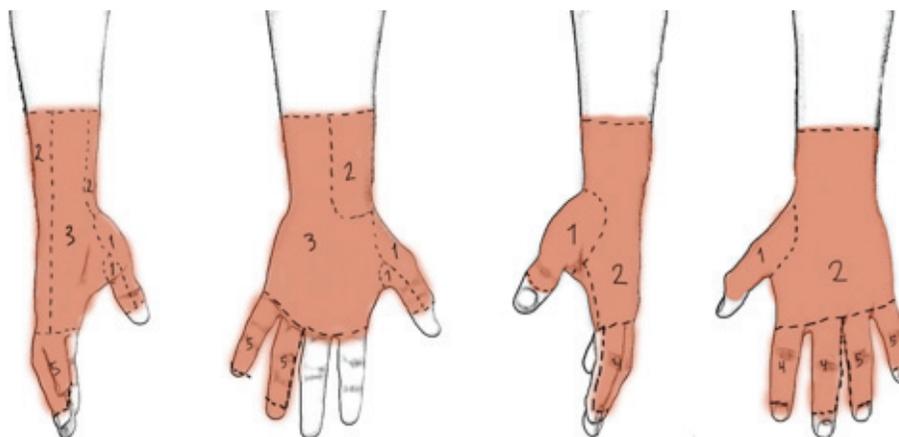


Imagen 34. Las áreas sombreadas representan la superficie cubierta con Micropore® y las líneas punteadas son las líneas de corte.

Las partes planas de Micropore® se utilizaron como plantillas para cortar réplicas en Neopreno® negro y posteriormente se unieron con costuras hechas a mano. Se cosieron dos costillas metálicas, una para ofrecer soporte a los dedos anular y meñique, y la otra para soportar el dedo pulgar. Así mismo, se cosieron los Velcros® y las cintas encargadas de mantener el guante afianzado a la mano del usuario. Por último, se cosió el mecanismo flexo-extensor en posición de uso.

Debido a los complicados dobleces, necesarios para respetar la forma de la mano, fue conveniente desarrollar costillas de un estilo propio, pues doblar una varilla convencional para que adopte la forma orgánica requerida, presenta un gran reto de manufactura, pues los dobleces no se encuentran únicamente en los ejes principales de la varilla. Se utilizó alambre de acero porque es posible doblarlo con facilidad en cualquier dirección. Para otorgarle rigidez a la costilla se me ocurrió doblar el alambre en forma de acordeón y después envolverlo en cinta adhesiva. De esta forma se aprovecha la practicidad de doblar un alambre de sección circular y de conformarlo en una costilla o soporte de sección rectangular.

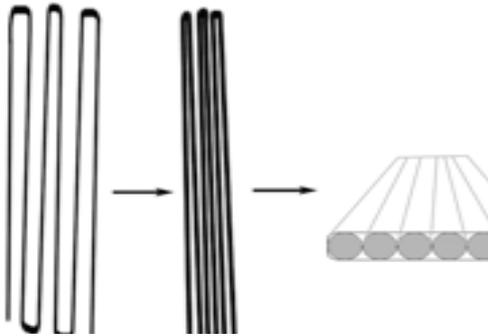


Imagen 35. Esquema de fabricación de las costillas-soporte.

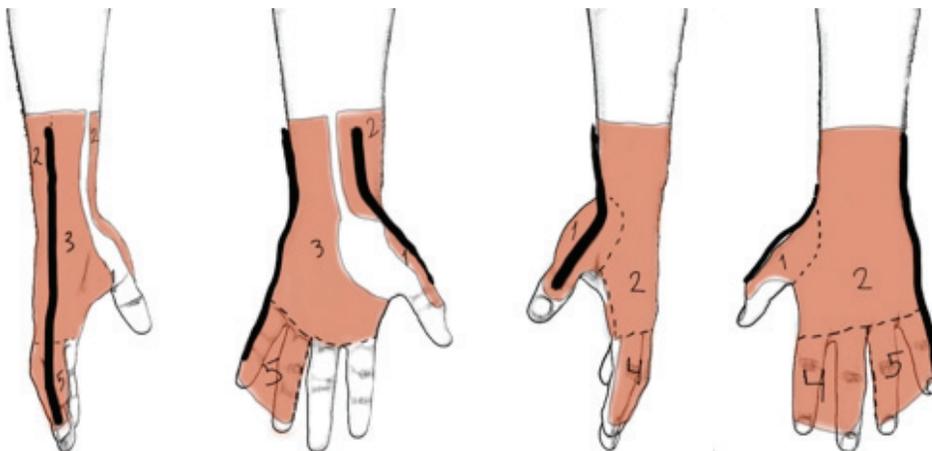


Imagen 36. Las áreas sombreadas representan la superficie final del Neopreno®, las líneas punteadas son las líneas de costura y los trazos gruesos representan los soportes de metal.

Manufactura del segundo prototipo con articulaciones flexibles

La manufactura del prototipo final es un símil de la construcción del primero, con tres cambios fundamentales:

Las tapas de los eslabones se hicieron de lámina de metal, lo que reduce considerablemente el volumen del mecanismo, al tener un grosor 10 veces menor (0.3 mm contra 3 mm). Además de proporcionar una superficie dura y con excelente acabado superficial; ambas cualidades son deseadas para mantener la fricción baja.

La posición de las ligas es lateral y paralela a la cinta métrica. De esta manera se reduce la altura máxima del mecanismo y no se introducen componentes de fuerzas innecesarias; en otras palabras, la dirección de la fuerza de accionamiento que se aplica a la corredera, proporcionada por las ligas, es paralela a la dirección en que se desplaza la corredera.

Se cambió la restricción de retén en la cinta métrica, en su lugar se colocó una restricción móvil entre los eslabones “C” y “B”. Algo parecido a una rótula de rodilla.



Imagen 37. Segundo prototipo, colocado en la mano y en posición extendida.



Imagen 38. Segundo prototipo, en posición de prensión.

Pruebas de funcionamiento

Una vez terminada la ortoprótisis se procedió a realizar pruebas de uso. La primera fue que la usuaria se colocara la ortoprótisis, sin recibir ayuda, para comprobar si el nuevo diseño de guante ofrecía la facilidad necesaria para ser asegurado en posición adecuada, utilizando una sola mano. Posteriormente se cuantificó la presión del mecanismo mediante un sensor de fuerza y dos sensores de flexión. Los sensores de flexión, de marca Spectra Symbol, mostraron no ser los adecuados para obtener mediciones útiles pues la vibración creada por el movimiento del mecanismo, o de la misma mano, introdujo demasiado ruido a la señal, por lo que los datos obtenidos no son representativos. Por otro lado, el sensor de fuerza funcionó correctamente.

El sensor utilizado para medir la fuerza de presión fue un FSR (Force Sensing Resistor) de la marca Interlink Electronics, con un rango de funcionamiento de 10 gramos a 10 kilogramos. El cual presenta la curva característica fuerza-resistencia mostrada en la imagen 39.

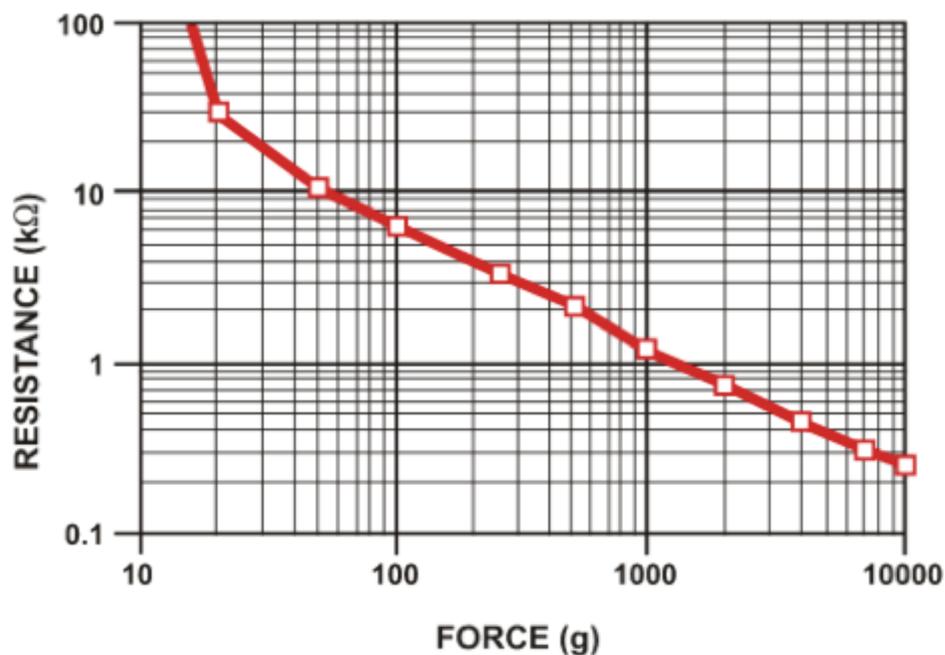


Imagen 39. Curva característica del sensor de fuerza, obtenida de la hoja de datos <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>.



Imagen 40. Sensor de fuerza marca Interlink Electronics.

Para la obtención de datos ensamblé un circuito eléctrico, en el cual coloqué los tres sensores, y mediante una tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments modelo NI-USB-6008, vinculada al programa LabVIEW Signal Express versión 2.5, obtuve gráficas de voltaje contra tiempo, con la intención de determinar la fuerza y posición de los dedos durante la presión. Como ya se mencionó, no fue posible determinar la posición, pues los sensores mostraron no ser los indicados.

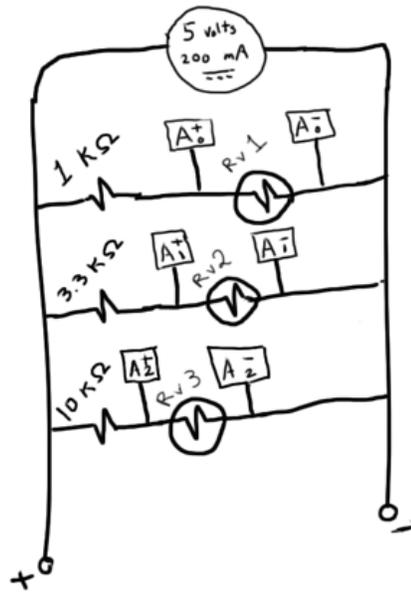


Imagen 41. Esquema del circuito eléctrico con valores nominales. Rv1 es el sensor de fuerza, Rv2 y Rv3 son los sensores de flexión (Rv abreviación de Resistencia Variable).

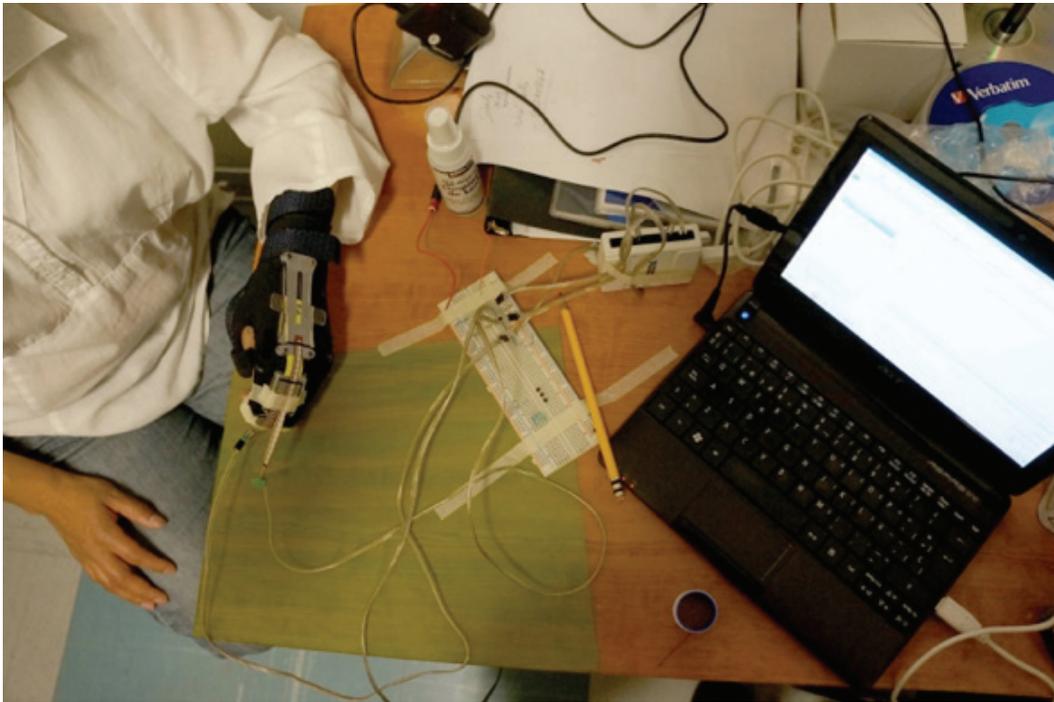


Imagen 42. Configuración general del sistema de adquisición de datos.



Imagen 43. Sujeción de objeto con 5.5 cm de diámetro.



Imagen 44. Sujeción de objeto con 4.2 cm de diámetro.

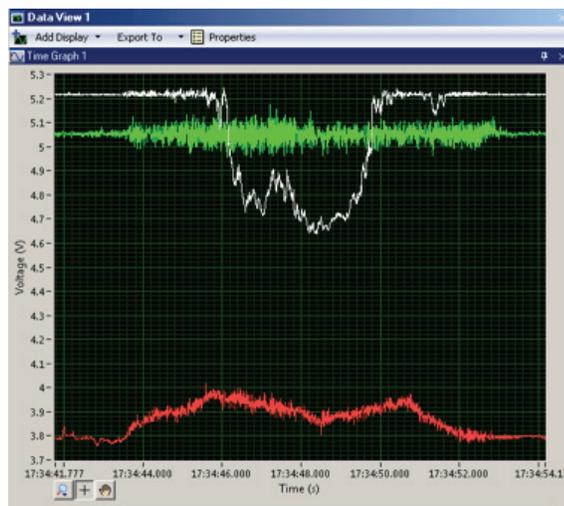


Imagen 45. La línea blanca representa la variación de voltaje dependiente del sensor de fuerza. Hay una caída de 0.5 Volts en esta muestra.

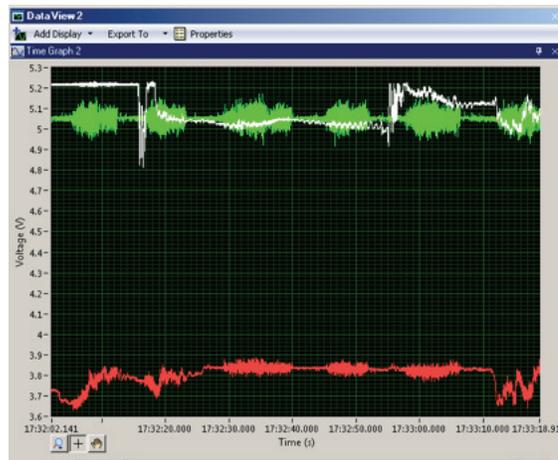


Imagen 46. La línea blanca representa la variación de voltaje dependiente del sensor de fuerza. Hay una caída de 0.2 Volts en esta muestra.

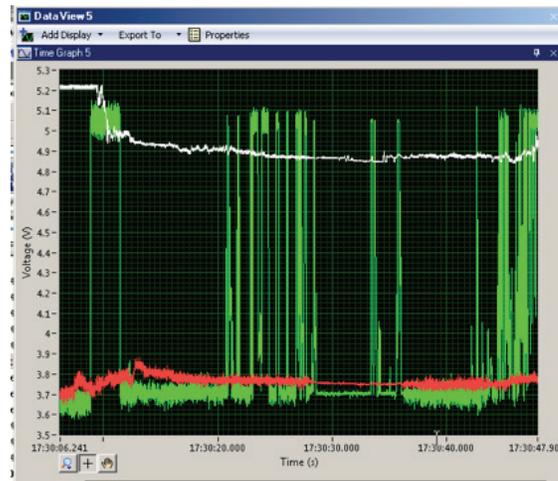


Imagen 47. La línea blanca representa la variación de voltaje dependiente del sensor de fuerza. Hay una caída de 0.3 Volts en esta muestra.

Con los valores obtenidos de las gráficas se puede obtener un aproximado de la fuerza de presión en la mano; esto se logra calculando el valor de la resistencia, a partir de una variación de voltaje, mediante la siguiente ecuación, y después cotejando con la curva característica del sensor.

$$R_1 = R_2 \frac{V_1}{\Delta V}$$

En el caso de una variación de 0.5 Volts tenemos:

- R1 es la resistencia incógnita.
- R2 = 990 Ohms (Valor real, a diferencia de 1000 Ohms que se asignan como nominal).
- V1 = 4.7 Volts, valor característico de la muestra.
- ΔV = 0.5 Volts.

$$R_1 = 990[\text{Ohms}] \frac{4.7[\text{Volts}]}{0.5[\text{Volts}]} = 9306[\text{Ohms}] \approx 9[\text{K}\Omega]$$

Resultados

Diferencia de Volts	Resistencia en el sensor	Apertura durante la sujeción ¹	Fuerza de presión neta
0.2	24,000 Ohms	3.5 cm	25 gramos
0.3	16,000 Ohms	4.2 cm	40 gramos
0.5	9,000 Ohms	5.5 cm	60 gramos

Tabla 5. Tabla de resultados, mostrando la relación entre la apertura de sujeción (¹entre el dedo índice y el dedo pulgar), la resistencia en el sensor y la fuerza neta de presión correspondiente.

A grosso modo, se nota una linealidad en la relación entre la apertura de sujeción y la fuerza neta entregada. Lo que torna sencillo la calibración para una mayor o menor fuerza, sin miedo a tener esfuerzos picos. Dicha linealidad garantiza que el usuario no recibirá trauma por un esfuerzo brusco.

	Mecanismo de Torres	Mecanismo flexible (Nuevo prototipo)
Distancia máxima del mecanismo al dorso de la mano	35 mm.	9 mm.
Peso	Mecanismo 32 g.	Mecanismo 26 g , orto completa 96.
Número de piezas	19	16 (reducible al menos a 11).
Proceso de manufactura	Corte laser y detalles a mano.	Fresado y detalles a mano.
Falanges embrazadas	1	1
Carrera del mecanismo	35 mm.	28 mm.
Volumen de uso	Promedio 59.2 cm ³ . Máximo 70 cm ³ .	15 x 2.6 x 0.6 = 23.4 cm³ .

Tabla 6. Tabla de comparación: Mecanismo de Torres vs Mecanismo flexible (Propuesta de esta tesis).

En conclusión, **se lograron y rebasaron los objetivos propuestos**. A continuación se presentan características del nuevo mecanismo y resultados generales de su implementación:

- **No produce marcas de uso** en los dedos índice y medio.
- **Se redujo casi por completo el deslizamiento** entre el último eslabón y los dedos índice y medio.
- **Tiene trayectoria variable y policéntrica**, se amolda al objeto a sujetar (como lo hace una mano humana).
- **Disminuyó el volumen de uso**, espacio que utiliza el mecanismo alguna vez durante su trayectoria de funcionamiento, **en un máximo de 66.6 % y en promedio 60.5 %**.
- **Disminuyó la altura máxima** entre el mecanismo y el dorso de la mano **en un 75 por ciento, de 35 mm a 9 mm**.
- **Es 18.8 % más ligero** que el mecanismo de Torres, pesa 6 gramos menos.
- Aporta soporte a los dedos anular y meñique, lo cual ayuda a la corrección de la postura de la mano.
- Simplifica la forma de sujeción del dedo pulgar y así se mejora la estética de la ortoprótisis.
- Aumenta el volumen de agarre al no tener tensores atravesados por entre la palma de la mano.
- Permite el uso de ropa de manga larga.
- Disminuyó el número de piezas.
- Mejora la sujeción del guante a la mano.
- Los soportes metálicos se encuentran ocultos, de manera interna en el guante, creando un diseño más elegante.

- La trayectoria de la corredera actuadora es una línea recta (a diferencia del mecanismo de Torres la cual describe una curva), facilitando su futura automatización.
- El volumen de uso es prácticamente constante durante toda la trayectoria.
- Recrea el movimiento de la prensión humana, aún sin estar sujeto a la mano, por lo que se puede trasladar el diseño a una mano robótica.

Descripción del diseño final

La nueva ortoprótesis muestra líneas más suaves, al haberse eliminado las cintas de sujeción del pulgar, y como se ha reducido el perfil del mecanismo hay una mejor simbiosis entre el artefacto y la mano, lo que a su vez permite que la usuaria utilice ropa de manga larga sin mermar la funcionalidad del dispositivo.

En resumen, la ortoprótesis tiene un impacto visual menor que su predecesor (el mecanismo de barras, Torres, 2012), además de presentar el confort psicológico reportado por la usuaria, al no atraer tantas miradas hacia su aparato ortopédico.

Mecánicamente, se cuenta con un rango de movimiento amplio en los dedos índice y medio, desde completamente extendidos hasta la sujeción de precisión o pinza; además la trayectoria de prensión se amolda de acuerdo al objeto que se sujete. Se incluye un soporte rígido para la corrección en la posición de los dedos anular y meñique, lo que a su vez aporta auxilio durante la prensión de objetos (como ocurre en una mano sana).

Trabajo a futuro

- Desarrollar una bancada de pruebas, para experimentar con los prototipos posteriores sin tener que molestar a la usuaria.
- Obtener información estadística relacionada a la parálisis braquial y padecimientos similares, para diseñar y fabricar un modelo universal.
- Obtener gráficos de posición de los dedos contra fuerza de presión para determinar un listado de objetos recomendados para su segura sujeción.
- Explorar materiales más ligeros y resistentes al desgaste.
- Optimizar la manera de fabricación.
- Implementar actuadores automáticos activados por sensores sinápticos.
- Transportar el diseño a una mano robótica.

Parte 2

Parte Filosófica

“Una gran cantidad de personas tendrán que perder la fe en la estabilidad del presente, antes de que sea socialmente factible planear sobre las bases de lo que será posible en el futuro en vez de las bases de lo que era posible en el pasado.”

-Jones, p.33-

2.1 ¿Diseño?

Diseño, es una de esas cosas que queda a interpretación y consideración individual, variando conforme a la formación y experiencia personal: por lo que me limito a comentar algunas frases con las cuales concuerdo, para así tratar de *definir* lo que es el diseño para mí.

-El economista Herbert Simon dijo sobre el diseñador, “El que toma las decisiones; elige entre una decisión óptima para un mundo simplificado e imaginario o una decisión que es suficientemente buena, que satisface, en un mundo más complejo y aproximado al real”, citado en (Petroski, 2003, p. 8).-

En estas líneas Herbert Simon captura de manera sencilla la esencia de mi proyecto, pues en ingeniería estamos acostumbrados por formación y por utilidad a idealizar situaciones, aproximar resultados y omitir variables con el fin de obtener un modelo matemático manejable. Obtener una ecuación de estado con 18563 variables no tiene sentido práctico. Sin embargo durante este proceso de eliminación y selección de variables, inherentemente, se trunca parte de la realidad del fenómeno modelado, es por esto que la experiencia e intuición son de gran valor.

-“El diseño de objetos cotidianos, al contrario del diseño en la naturaleza y de la interpretación del artista, procede necesariamente entre los confines de las leyes científicas y la economía” (Petroski, 2003, p. 10).-

A la cita anterior le agregaría como limitante el tiempo disponible, pues los diseños ingenieriles tienen un par de variantes ligadas: tiempo y dinero. Un proyecto demasiado largo puede ser tan costoso como uno cuyo tiempo de entrega sea sumamente corto. Sin embargo damos por sentada la tercer imposición natural de un proyecto: los conocimientos requeridos para el desarrollo exitoso, y dentro de estos conocimientos se incluye la plasticidad cerebral para la solución de problemas, la creatividad, pues cada proyecto presenta retos nuevos donde es necesaria una solución completamente nueva.

- *“Sobre la filosofía de diseño. Existen 3 corrientes: la primera cree que el proceso de diseño debe de ser caótico y creativo, la segunda que debe de ser organizado y disciplinado y la tercera que ningún proceso de diseño debe de ser impuesto sobre el diseñador.” (Egbuomwan, 1996, p. 306).*-

Coincido con la tercer corriente, ningún proceso de diseño debe de imponerse a los diseñadores, sin embargo estos tienen la libertad de optar por el *estilo* de trabajo de su preferencia, siendo que cada quien piensa y funciona de diferente manera.

- *“Imaginar lo imposible..., no lo hace posible. Pero, al contrario, lo posible no se puede realizar si no se imagina primero” (Petroski, 2003, p. 22).*-

Una reflexión tan básica contiene una de las verdades más importantes para diseñar y es el prefacio a la elaboración de cualquier trabajo, al ser fundamental la visualización, primero del problema y después de sus posibles soluciones. Sin esta habilidad intrínsecamente humana, todos los objetos materiales e intelectuales no existirían. A su vez denota la enorme importancia de incentivar esta actividad durante cada etapa de la educación y de su implementación formal en el mundo real, llámese industria e investigación y desarrollo. La palabra “imaginar” se utiliza poco en las aulas de la facultad de ingeniería, cuando debe ser un principio utilizado hasta el cansancio, para denotar la libertad creativa del individuo.

- *Sobre la definición de diseño... “La elaboración de un acto de fe muy complicado” (Jones, 1972, p. 3).*-

¿Será una exageración? No, para diseñar hay que tener fe. Fe en uno mismo, en los conocimientos y experiencias personales, no tener miedo a imaginar, a dar soluciones aparentemente estúpidas o inviables, pues tal vez, resulten revolucionarias.

2.2 El recurso del método

“El objetivo del diseñador debe ser evitar, lo más posible, imponer patrones sobre lo que se innova de manera prematura.”

-Jones, p.65-

Dentro de los requerimientos para con el diseñador, en el campo empresarial como en el de investigación y desarrollo, la estabilidad y continuidad en la producción de nuevos productos o de mejoras a lo ya existente son prioridad. Es por esto que tener una metodología que ofrezca ambas cualidades es altamente valorado; mediante patrones de diseño y criterios estandarizados se amortigua la variación de calidad y se asegura un resultado (producto) final. Estas mismas cualidades han convertido a la “metodología” en el apoderado del proceso de diseño, pues ofrece una sensación de seguridad, tanto a los inversionistas como a los mismos diseñadores.

Una función muy importante de los métodos es la de proveer respaldo al diseñador frente a las demás personas involucradas en el proceso de diseño, pues permite mostrar los pasos y razones por las cuales se decidió seguir tal o cual camino. ¿Hasta dónde se ha seguido este modelo de desarrollo con tal confianza y fe que se ha dejado de lado la inventiva individual? ¿El miedo a equivocarse y la necesidad de entregar forzosamente un producto final justifican la continuación de esta doctrina?

El método y de manera subsecuente la metodología deben ser utilizadas como herramientas, guías en el camino de la innovación, de tal forma que proporcionen cierto marco de referencia pero sin volverse un molde estricto sobre el cual haya que vaciar únicamente datos y esperar la siguiente generación de un producto con ventajas marginales con respecto a su predecesor.

El mismo método que sirve de guía para el diseñador, puede convertirse rápidamente en su peor enemigo, si no sabe cuándo alterarlo, utilizar una parte o deshacerse de él, pues el método debe de utilizarse con cuidado, y con miedo vehemente a convertirse en esclavo del mismo. En otras palabras, hay que atesorar el método como una herramienta más pero no tomarlo como el único y verdadero camino.

“La metodología no debe ocurrir sobre un camino y un destino previamente fijados, sino como una conversación entre todo lo que pudiese hacerse.”

-Jones, p.73-

2.3 DesInformación.

“We tend to think of knowledge as good in itself, but knowledge is useful only when we can exploit it to help us reach our goals.”

-Minsky, p.57-

Determinar la cantidad de información necesaria para comprender la verdadera naturaleza del problema no es cosa sencilla; poca información resulta por no desentrañar las necesidades reales que requieren solución, demasiada información distrae y crea nuevos problemas como lo son el manejo y ponderación de gran cantidad de variables, haciendo difícil distinguir la naturaleza misma del problema.

El porqué de la reincidencia en una falta de tipo exageración en la cantidad de información recolectada, se da por la necesidad del diseñador a sentir seguridad en la toma de decisiones. Aparentemente tener más información sobre una situación aumenta la posibilidad de tomar una mejor decisión al respecto, sin embargo esto no es verdad. Tener los datos claves resulta en un manejo eficaz de las ideas y disminuye el posible error de darle prioridad a una variable equivocada, (Gladwell, p. 13).

Otro gran problema es la necesidad de explicar y justificar el proceso de diseño, entiéndase las decisiones tomadas durante el mismo, bajo la creencia de que si podemos plasmar de manera lógica cada paso del camino obtendremos un mejor resultado que deviene en un aumento de trabajo y requerimientos para el diseñador, y esto se traduce en una disminución de la eficiencia del diseñador, (Gladwell, p. 121). Ahora, en vez de estar enfocado en diseñar, el diseñador tiene que dividir su potencial pensando en la forma de procesar y editar la información para cumplir las normas de cierto grupo social.

2.4 Visualizar, imaginar y pensar.

*“A mind cannot really grow very much merely by accumulating knowledge.
It must also develop better ways to use what it already knows.”*

-Minsky, p.102-

Recogemos experiencia y conocimiento a la par que vivimos, de tal suerte que nos volvemos un conjunto de todas las experiencias previas; aquellas que nos hayan resultado satisfactorias las tomaremos como verdades y serán almacenadas en un reservorio especial del conocimiento personal, que aparenta brotar de ningún lugar, un ente intrínseco a cada individualidad, la intuición. Esta intuición nos ayuda a resolver nuevas adversidades mediante la visualización de variantes y posibles respuestas. La visualización se basa en la imaginación la cual nos da la posibilidad de crear un mundo intangible y sin ataduras a las reglas de la naturaleza, entiéndase ni físicas ni químicas; es mediante el pensamiento racional que logramos integrar dichas leyes naturales al mundo intangible.

Resumiendo, Visualizar es una forma específica de imaginar situaciones o fenómenos reales o supuestos mediante la implementación del raciocinio consciente y lógico de las reglas que rigen toda actividad humana. Es decir, la visualización requiere de dos partes de conocimientos adquiridos de maneras diferentes, por un lado se tiene la intuición y por el otro, durante el “pensar”, los conocimientos científicos y técnicos. Convirtiendo esta actividad en la espina dorsal del proceso de innovación y desarrollo.

*“La forma de pensar y concebir un problema está completamente
relacionada a cualquier experiencia previa.”*

-Jones, p. 47-

2.5 Consciente e inconsciente

Dentro de mi concepción de diseño comprendo dos tipos de procesamientos mentales involucrados: el consciente y el inconsciente, los cuales prosigo a definir para utilizarlos posteriormente en la definición de otros conceptos.

El consciente es toda aquella información de la cual nos damos “cuenta” de su existencia directamente. Los procesos conscientes parecen avanzar en una progresión lógica, guiada por el deseo propio y se dan por medio de un diálogo interno, ya sea mediante palabras y/o imágenes.

El inconsciente son todas las operaciones realizadas por el cerebro de las cuales no tenemos idea de su estado, ni seguimiento del progreso de éstas. La mecánica o lógica detrás de los procesos inconscientes es desconocida, así que los llamaré procesos internos, de los cuales no tenemos más información de su existencia mas que sus resultados.

2.6 *Switching*

Dado que el diseño es un proceso complejo y no se tiene una comprensión extensiva del mismo, se puede aseverar que en dicho proceso se ven involucrados los procesamientos mentales tanto conscientes como inconscientes, y así introduzco el término de *switching* con el cual hago referencia a la acción del intercambio de información entre la parte lógica y los procesos internos del cerebro, es decir entre el consciente y el inconsciente. Si bien la internalización de un problema se hace de manera consciente, gran parte del trabajo mental se hace de manera inconsciente por medio de herramientas previamente adquiridas como lo son la lectura y los conocimientos técnicos necesarios para comprender el problema.

Abordar este fenómeno de intercambio de información es un punto base de esta tesis pues en él se fundamenta la importancia de ser laxos respecto a la percepción del trabajo realizado por un diseñador, pues la mayor parte de esa actividad sucede dentro del cerebro.

De lo anterior, es insensato esperar o exigir ver un progreso gradual y estructurado del proyecto en labor.

En mi experiencia, el proceso creativo no tiene un progreso gradual, ni siquiera tangible durante largos periodos de tiempo hasta que de repente obtenemos una solución “viable” y todo parece resolverse, es hasta el análisis posterior donde podremos validar tal solución. Si después de dicha valoración nos encontramos con que la solución o no funciona o no es viable, regresamos al principio del problema, aparentemente. Y digo aparentemente pues hago constar en la parte práctica de esta tesis, que cada idea de solución fallida tiene una aportación para una solución funcional y viable, ya sea porque se rescate una fracción o concepto de la solución o que se hagan notar aspectos relevantes del problema a solucionar que no se tenían previamente considerados.

“La información en el cerebro se re-ordena cada que hacemos memoria, por eso después de haber tenido unas cuantas ideas, dejan de emerger nuevas, hasta volver a pensar conscientemente en el problema.”

-Jones, p. 47-

2.7 Evolución de una idea o concepto

“No hay diseño correcto, solo suficientemente satisfactorio.”

La importancia del *switching* es tangible únicamente cuando la información ha llegado a la parte consciente donde se le realiza un análisis concienzudo. A manera de ejemplo relato brevemente un análisis posterior a una idea obtenida en un *momento eureka*, pues un proceso similar ocurrió con cada idea que ha sido documentada en la parte práctica de este documento. Para después presentar un par de comentarios explicando el proceso de post-análisis y profundizar en el fenómeno *switching*.

-Con la idea del Efecto Tortilla basada en la variación de la fuerza desarrollada por un elemento elástico mediante el cambio geométrico del mismo, comienzo a imaginar las partes del mecanismo deformándose y moviéndose a lo largo

del Mecanismo Tortilla, visualizo las partes y fuerzas así como sus reacciones e implicaciones físicas y dinámicas; cambiando indiscriminadamente entre la selección de cuerpos tomados en cuenta, a veces me enfoco únicamente en una sola pieza, y otras en un par de partes interactuando entre sí. Los efectos de las fuerzas se muestran exageradas, haciendo alusión a casos extremos y variando las propiedades del material, desde mostrar ductilidad infinita hasta fragilidad severa. Se puede resumir la sección de restricciones o supuestos como una forma de determinar los valores límites del problema, tratando de imaginar todas las posibles causas de falla. Utilizo como herramienta el autocuestionamiento, por ejemplo: ¿qué pasa si sigue aumentando la fuerza sobre el mecanismo pero ya no se permite mover tal eslabón? A la par que pienso en las solicitudes a las cuales estará sometida cada pieza; también en la familia de materiales adecuados, así como en el posible proceso de manufactura.-

Se comienza con un concepto o principio de funcionamiento que trae consigo un cambio en la percepción del problema, de difícil a fácil, yuxtapuesto a un paquete de ideas concatenadas, momentos de lucidez y abundancia de sub-ideas. Vemos la posible solución y se hilan mejoras a lo recién imaginado, una tras otra, pequeñas alteraciones que otorgan detalle a la solución, como si se bosquejara un rostro: primero trazos toscos forman la silueta y después se agregan detalles hasta lograr un delineado reconocible. Conforme aumenta el detalle de la solución, en este caso del mecanismo, se definen las proporciones, las trayectorias ideales de las piezas y se determinan los materiales plausibles y su forma de unión. De manera paralela se visualiza la posible forma de manufactura, incurriendo en un proceso iterativo, se imagina una primera solución y se piensa en como manufacturarla, dependiendo de la viabilidad (dificultad y costo) se reestructuran las piezas o se cambia el material. Se repite este proceso hasta obtener una solución que satisfaga ambas cualidades: funcionalidad y viabilidad de manufactura; pues un buen diseñador debe darle igual importancia al proceso de manufactura como a los principios físicos que rigen la solución concebida. No sirve tener el concepto de un dispositivo si no se puede implementar (desde el punto de vista ingenieril).

Después de este periodo fructífero se llega a un estado de vacío, dejan de fluir las ideas. Los procesos mentales involucrados en la resolución del problema se han descargado y dan por terminada su asignación. Hasta no volver a volcarse de manera consciente en la reabsorción del problema original, con la ayuda de un nuevo punto de evaluación, no habrá nuevas ideas.

“Imaginar un proceso físico se vuelve más cercano a la realidad si se tiene una buena comprensión de los principios científicos, la teoría ingenieril y la experiencia.”

2.8 Tiempo para pensar.

-Seguido hay largos periodos de tiempo durante los cuales la persona que está por hacer trabajo original (de innovación) aparenta no estar haciendo nada más que tomando información, trabajando sin frutos en puntos, aparentemente, triviales del problema y desvía su atención a cosas irreales. Este periodo se le conoce como “incubación”.-

-Jones, p. 23-

--Argumento lógico--

¿De dónde proviene la necesidad y la importancia de dedicarle un buen tiempo a pensar las cosas (meditar el problema)?

El cerebro es un objeto finito con la capacidad de realizar millones de operaciones pero, por más gigantesco que parezca su poder de computo, tiene un límite finito.

Haciendo un símil del cerebro con una computadora en la cual se tiene un número determinado de operaciones que puede realizar simultáneamente, cualquier proceso que realice requiere un número de operaciones, es decir ocupa un cierto porcentaje de la capacidad operacional sin importar que sean del tipo “*front desk*” (visibles para el usuario, como lo sería un proceso consciente) o de *sistema* (invisibles para el usuario, como lo sería un proceso inconsciente). En el caso donde se requiere resolver un problema por medio de un método iterativo, el tiempo que tardará la computadora en resolver el problema depende directamente del porcentaje del poder de computo que tenga disponible, entre mayor sea el porcentaje menor será el tiempo y entre menor sea el porcentaje mayor será el tiempo requerido, pudiendo llegar al extremo de tardarse tanto como 100, años volviendo inviable este método de resolución del problema. De igual manera el potencial del cerebro se divide entre la cantidad de operaciones asignadas, en otras palabras, entre más actividades a realizar haya durante el proceso de concepción de ideas menor será el poder de computo asignado a la creación misma y, como en el ejemplo de la computadora, se corre el riesgo de no obtener una resolución al problema.

-Una buena idea puede tomar tiempo pero se justifica con creces al evitar correcciones o lo que es peor, la elaboración de un proyecto complejo que pudo resolverse de manera sencilla, con lo que se le llama un diseño elegante (cuando las cosas parecen sencillas y obvias).-

-Jones, p. 54-

2.9 Tiempo para descansar

-Vivimos en un mundo que asume que la calidad de una decisión está directamente relacionada con el tiempo y esfuerzo que tomó hacerla.-

-Gladwell, p.13-

--Argumentación lógica--

La sensación de saber la respuesta a un problema y no poder expresarla, ponerla en palabras, es conocida por todos y se puede explicar si tenemos en cuenta que en el cerebro ocurren múltiples procesos mentales simultáneamente y que no están sincronizados, (Minsky, 1985, p. 63). Esto es que la parte del cerebro encargada de resolver problemas ha terminado exitosamente su trabajo, pero la parte que traduce las ideas en palabras sigue ocupada.

Otra sensación común es la de obtener la respuesta sin tener claro el camino o proceso mental que se llevó a cabo, es un acto místico. Aquí es cuando pensamos sin pensar, en otras palabras, el problema se resuelve de manera inconsciente, detrás del telón de nuestra comprensión y lógica, por lo que no podemos describir conscientemente lo que no se registró en el consciente. Es como si lo hubiera procesado otra persona, (Gladwell, 2005).

Combinando estas dos aseveraciones se denota la importancia de mantener la mente despejada cuando se desea resolver un problema complejo para no distraer las áreas mentales, inconscientes, responsables del reconocimiento de patrones que conllevan a un entendimiento del fenómeno y por ende a una respuesta. Así como darle tiempo para que la información sea procesada por todas las áreas necesarias.

2.10 La imaginación como herramienta

-Los enemigos de la originalidad son la rigidez mental y el pensamiento impetuoso, haciéndose resaltar cuando una persona actúa, ya sea, de una manera mucho más ordenada de lo que la situación lo requiere o es incapaz de percibir la realidad externa.-

-Jones, p. 23-

Sin duda, la capacidad de ver objetos y eventos dentro de nuestra mente es una de las más grandes cualidades humanas, una que nos describe como especie, el poder imaginar y soñar. Contamos con el poder de recrear eventos que han sucedido en el pasado, pero aún más maravillosa es la capacidad de predecir el futuro, obviamente esto ocurre a un cierto nivel de veracidad ya que no se hace con un 100% de fidelidad. Para realizar esta increíble hazaña el cerebro emplea la memoria y la lógica que en conjunto crean una herramienta poderosísima, la imaginación, un ente capaz de transmutarse en la más diversas herramientas; un banco de pruebas para experimentos sencillos, como lo es dejar caer un objeto; un microscopio tridimensional con la capacidad de introducirnos en el interior de una célula y permitir la manipulación de sus partes; una ventana al pasado lejano como el *Big Bang* o a un futuro inminente. En cualquiera de sus representaciones poéticas la imaginación ha sido y es el motor del progreso e innovación en todas las áreas del conocimiento humano.

Hay que tener en cuenta que esta cualidad no es perfecta ni infalible, sin embargo es más acertada conforme se archiven más recuerdos y se incremente la cantidad de conocimiento científico y técnico que conforma el aparato lógico, es decir el par de motores de la imaginación se torna más robusto.

Estas “reglas científicas” que rigen el funcionamiento del mundo real se aprenden de manera consciente y se pueden aplicar de forma consciente o inconsciente durante el proceso de imaginar, he ahí la importancia de tener bien claros los conceptos físicos que rigen el mundo más allá de las ecuaciones que los describen.

2.11 Momentos eureka y la serendipia

-La solución a un problema difícil vendrá como una idea original, que aparece "de la nada" y tendrá el impacto de cambiar dramáticamente la visión del problema. Cambia la visión de un problema difícil a uno fácil.-

-Jones, p. 23-

La serendipia se define como el acto de encontrar lo que no se buscaba, y un momento *eureka* es aquel instante donde sobreviene una revelación del conocimiento, un cambio de percepción, de pronto se vislumbra de manera clara y evidente la respuesta a un problema que anduvo rondando por la mente. Incontables son los casos de descubrimientos, avances e invenciones que se han hecho de esta manera, pero me gustaría resaltar dos puntos (similitudes) con lo que he venido hablando:

Primero, para encontrar lo que no se busca es necesario IDENTIFICAR que se ha encontrado algo valioso; de igual manera, con las ideas que surgen del inconsciente hay que tener la habilidad para identificarlas y apreciarlas.

Segundo, las ideas y el proceso de crear ideas está en constante estimulación a consecuencia del entorno, cualquier experiencia alimenta al cerebro que a su vez produce cambios en la información residente en el cerebro lo que puede desembocar en una epifanía creativa, un momento *eureka*.

Ahora narraré la historia sobre el mecanismo de Efecto Tortilla, que si bien, no fue el mecanismo definitivo, es un buen ejemplo para describir la extraña naturaleza de las ideas.

-Llevaba días convencido de que la respuesta al problema, de transmisión de fuerza del dorso de la mano a la segunda falange de los dedos índice y medio, residía en la variación geométrica de al menos una de las piezas del mecanismo, pero no se me ocurría una forma satisfactoria de lograrlo.

Un mañana, desayunando, tomé una tortilla sobre la palma de la mano y comencé a echarle huevo y frijoles, cuando, para mi desgracia, noto que mi delicioso alimento comienza a resbalar por las orillas de la tortilla que no se encontraban apoyadas sobre la mano, un fallo evidente en la técnica taquera, rápidamente

doblé la mano para obligar a la tortilla a tomar la forma de “U”, estrictamente necesaria para la realización de un taco en toda la extensión de la palabra. En ese preciso instante lo supe, tenía la respuesta en mis manos, literalmente. Lleno de emoción olvidé el hambre y la prisa por terminar el desayuno, y repetí la maniobra unas cuantas veces: aplanando la mano y volviéndola a doblar para ver cómo se desbordaban los grumos amarillos y frijoles conforme más plana se encontraba la tortilla. Está de más mencionar que terminé con la mano totalmente enjuagada en caldillo.

Abí, de la forma menos esperada, se hizo presente un concepto aparentemente funcional. El cual proporcionaba la rotación y transmisión de fuerza necesaria en un solo elemento, además de ser un elemento flexible, cumpliendo un requerimiento más. Así fue que durante mi rutina diaria algo en mi cerebro se disparó, vinculé un evento cotidiano a una necesidad específica, trasladando un concepto utilizado por millones de personas diariamente a un mecanismo de innovación tecnológica, tuve un momento eureka.-

2.12 Heurística

“Cuando el proceso interno de algo nuevo es demasiado extenso o complicado para manejarlo directamente, lo representamos en partes o en términos de señas más familiares. De esta manera, hacemos que cada novedad sea un símil de algo más ordinario”

-Minsky, p. 57-

Entonces, ¿cómo se resolvió el problema? El proyecto comenzó de manera convencional, con la recolección de información referente a la problemática, si bien decidí que la información dentro de la tesis de Torres era más que suficiente para comprender cabalmente el problema a solucionar, busqué dispositivos que realizaran funciones similares para tener una idea del contexto tecnológico bajo el cual haría el desarrollo de mi diseño. De aquí en adelante me

dediqué únicamente a pensar, teniendo ideas y apuntándolas para tener material de análisis sobre el proceso que iba atravesando. Al llegar a la solución final, materializarla y observar los resultados positivos, comprendí que no hubo tiempo desperdiciado en el proceso, sino que cada etapa juega un papel importante en el desarrollo de nuevas ideas.

Debido a la necesidad de exponer mi punto de vista he tenido que desglosar el proceso de diseño a lo largo de este documento, pero en la realidad no se dio de esta manera, fue un revoltijo, pasando de pensar en el problema a pensar sobre cómo estaba pensando. En retrospectiva puedo decir que el proceso realizado comparte puntos en común con el estilo de diseño divergente: los requerimientos se trataron como un punto de inicio para la investigación y se fueron modificando, evolucionando, durante el avance del proyecto, es decir, hay inestabilidad en las barreras del problema. También hay similitud con un punto perteneciente al estilo convergente, pues determinar el orden en el cual se redujeron las variables fue un procedimiento estándar en cada idea de solución, (Jones, p. 64). Es decir, el proceso de diseño fue cíclico, cambiando sus matices, comenzando por ser completamente divergente y tornándose más convergente conforme la idea se volvía más específica, y si ésta se desechaba se volvía a un estado de divergencia total.

He reincidido en mencionar la importancia de permanecer con la mente abierta a nuevas ideas. La idea final, deviene como un cambio de paradigma en el planteamiento del problema: lo que era un problema se torna una ventaja. Pues a lo largo de las diferentes soluciones presentadas en el estudio de caso, la variación longitudinal causada por la rotación representaba un inconveniente, sin importar la geometría o número de elementos. Es hasta que se utiliza este *problema* como principio de funcionamiento del mecanismo que se obtiene una solución satisfactoria, y ésta a su vez se debe en gran medida a la libertad personal y social sobre las ideas y conceptos que pudiesen ser implementados en la ortoprótesis, (Jones, p. 30). Gozando de este ambiente fui capaz de superar las adversidades y resolver conflictos de manera rápida, en su mayoría, sin tener que escribir ecuaciones o hacer dibujos, todo se deliberó en mi imaginario.

2.13 Conclusiones y comentarios finales

El mecanismo final cumple los objetivos establecidos en el Estudio de Caso y de esta manera se prueba la factibilidad de obtener una solución funcional y viable mediante el uso de la imaginación de manera concienzuda, tomando como base los principios que rigen el mundo real sin la exigencia del uso del computador.

Cuando decidí hacer toda la ortoprésis, en vez de cambiar sólo el tipo de junta en los eslabones, y rediseñar el guante de sujeción, ejemplifiqué la necesidad de reconocer cuándo un cambio mayor es necesario para obtener un resultado convincente y expedito; aunque eso signifique comenzar de nuevo, pues aferrarse en conservar un diseño previo puede resultar en una pérdida de dinero y tiempo.

Como ya he hecho mención, un segundo propósito de este trabajo fue el poner a prueba el dogma que establece el requisito de poseer un alto grado de conocimientos referentes al área sobre la cual se hará la innovación, y por esto me contuve de estudiar teoría de mecanismos flexibles, de tal suerte que de tener éxito tendría una prueba veraz de la sobrevaloración de los conocimientos técnicos específicos y demostraría que la intuición es lo bastante eficiente como para sobrellevar este tipo de retos. En este caso encuentro parcialmente equivocada la pseudo-hipótesis, pues, es cierto que no estudié directamente teoría sobre mecanismos flexibles pero ya contaba con una amplia gama de conocimientos teóricos y técnicos sobre mecanismos y materiales. Así me di cuenta de que el problema a resolver debe estar dentro del nivel de conocimientos de la persona, o bien, el nivel de profundidad y viabilidad de una solución será conforme a la cantidad de conocimientos (teóricos y empíricos) que posea sobre el tema, es decir, existe una gama de soluciones posibles para un mismo problema, desde la altamente sofisticada hasta la pragmáticamente rudimentaria.

El progreso en el diseño es lento y secuencial porque se empieza con un número infinito de posibilidades, y se hace más pequeño cada que identificamos un avance en la solución, aún sin tener toda la solución. Es esta capacidad la que nos diferencia de las computadoras y la que describe a un diseñador, la habilidad de reconocer parte de la solución y no esperar encontrar todo el pastel ya horneado.

La sensación de que se ha encontrado la idea o concepto que de solución satisfactoria al problema de diseño, tiene que ver con la proyección y adivinación del tiempo y costo estimado para llevar acabo tal idea o concepto, es decir, tener un concepto increíblemente bueno no sirve si no se puede concluir en su totalidad en tiempo y forma. Es necesario tener bien claras las capacidades técnicas personales, o procesos de manufactura disponibles, así como el costo y tiempo requeridos por tales procesos.

Hay que darse el tiempo de pensar las cosas, no ponerse a trabajar como loco con la primer o segunda idea que tengamos, pues nos dedicaremos a resolver los miles de problemas que se presentan a lo largo del desarrollo y que son naturales del proceso de desarrollo de nuevas ideas. El trabajo prematuro bloquea nuevas ideas, si no cierra completamente la puerta de la creatividad sí la disminuye, pues la prioridad interna del cerebro cambia y se adapta para limar las asperezas que surjan durante el trabajo. Así nos auto-negamos la oportunidad de tener una mejor idea, una idea más eficaz, más sencilla de realizar y fabricar. Si pasamos más tiempo dibujando cosas complicadas, menos tiempo utilizaremos la cabeza para pensar simple y efectivamente en los problemas, bloqueando los momentos Eureka.

Bibliografía

- Evbuomwan. (1996). *A survey of design philosophies, models, methods and systems*. Journal of Engineering Manufacture , 210, 300-340.
- Didrick, D. D. (2005). *Articulated Artificial Finger Assembly*. Patent No. US 6908489 B2. E.U.A.
- Gladwell, M. (2005). *Blink: The power of thinking without thinking*. New York, USA. Little, Brown and Company.
- Gregor Puchhammer, M. H. (2012). *Prosthetics Finger*. Patent No. US 8100986 B2. E.U.A.
- Halverson, P., Howell, L., & Magleby, S. (2008). *Tension-based multi-stable compliant rolling-contact elements*. Mechanism and Machine Theory, Elsevier , 147-156.
- Howell, L. L. (2001). *Compliant Mechanisms*. New York, USA. John Wiley & Sons.
- Howell, L., Norton, T., & Midha, A. (1999). *Limit positions of compliant mechanisms using the pseudo-rigid-body model concept*. Mechanism and Machine Theory , 99-115.
- Jaworski, E. (2012). *Humanlike mechanical finger for prosthetic hands and massaging device with humanlike mechanical fingers*. Patent No. US 8177856 B2. E.U.A.
- Jones, J. C. (1972). *Design Methods: Seeds of human future*. New York, USA. John Wiley & Sons.
- Kerr-Jia, L., & Sridhar, K. (2003). *Design of compliant Mechanism for Morphing Structural Shapes*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures , 14, 379-391.
- Minsky, M. (1985). *The Society of Mind*. New York, USA. Simon & Schuster.
- Moon, Y.-M. (2006). *Bio-mimetic design of finger mechanism with contact aided compliant mechanism*. Mechanism and Machine Theory , 600-611.
- Petroski, H. (2003). *Small Things Considered: Why there is no perfect design*. New York, USA. Alfred A. Knopf.
- Torres, P. M. (2012). *Diseño de Ortoprótosis para Mano*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D. F.

Apéndice

Imágenes correspondientes a las tres plantillas realizadas con Micropore para la fabricación del guante con Neopreno.

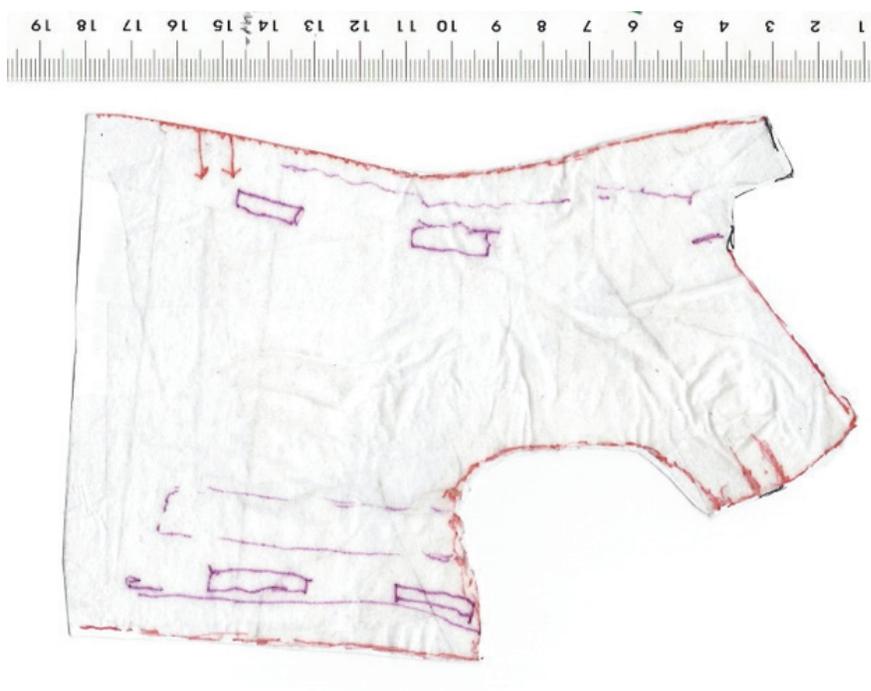


Imagen 48. Parte correspondiente al dorso de la mano.



Imagen 49. Parte correspondiente al pulgar.

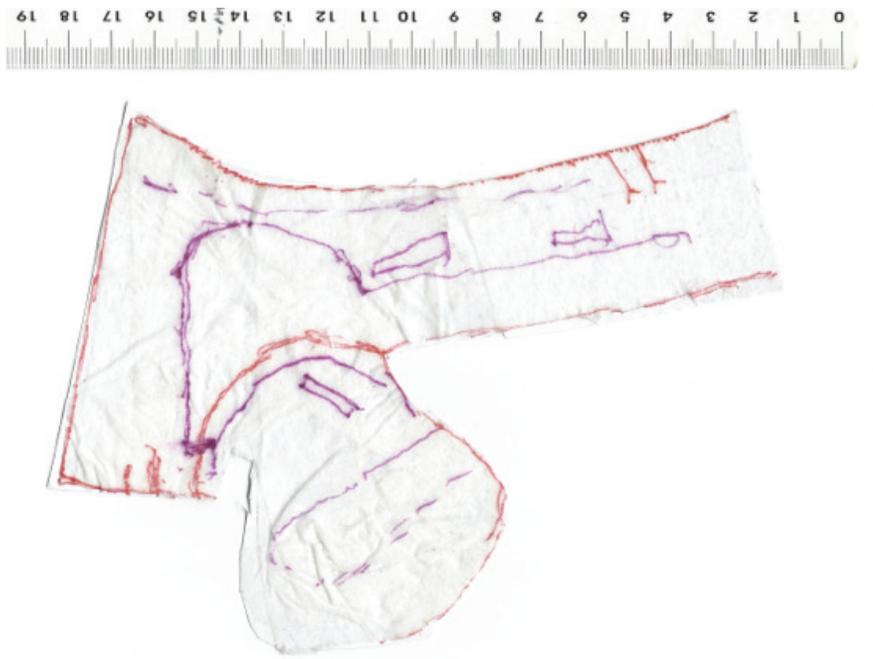


Imagen 50. Parte correspondiente a la palma de la mano.