



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería



Incremento de inmersividad en usuarios de entornos de realidad virtual  
utilizando una interfaz háptica para limitación de  
movimiento en dedos

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Diseño e Innovación  
(Diseño de Producto)

**Presenta**

Juan Pedro Cruz Sánchez

**Dirigido por:**

M. en C. César Oswaldo Mendoza Herbert

Querétaro, Qro. Diciembre 2017



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Diseño e Innovación Diseño de Producto

Incremento de inmersividad en usuarios de entornos de realidad virtual utilizando una interfaz háptica para limitación de movimiento en dedos

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Diseño e Innovación

**Presenta:**

Juan Pedro Cruz Sánchez

Dirigido por:

M. en C. César Oswaldo Mendoza Herbert

M. en C. César Oswaldo Mendoza Herbert  
Presidente

Firma

Dr. Saúl Tovar Arriaga  
Secretario

Firma

MDI. Margarita Josefina Hernández Alvarado  
Vocal

Firma

Dra. Norma Maricela Ramos Salinas  
Suplente

Firma

MDI. Diana Reséndiz López  
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad de Ingeniería

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

## **Resumen**

En esta tesis se presenta el desarrollo de una interfaz háptica tipo exoesqueleto para entornos de realidad virtual con movimiento independiente en cada uno de los dedos con once grados de libertad que se enfoca en la retroalimentación de fuerza. La revisión de la literatura compara las ventajas y desventajas de los dispositivos existentes en la actualidad y se plantea una alternativa de solución mediante el uso de servomotores de CD y un sistema de localización basado en sensores IMU. Además, se presenta el diseño mecánico y la interacción de señales requeridas para su control bajo la metodología de Design Thinking propuesta por Tim Brown de diseño de producto centrado en el usuario con la finalidad de generar un concepto que emule el movimiento natural en los dedos cumpliendo a su vez con los requerimientos de forma, estética, uso y función capaz de integrar de manera sencilla actuadores electromecánicos para su posterior control y manipulación electrónica. Finalmente, se plantea un experimento para validar si la inclusión de un tercer sentido aumenta el desempeño del usuario al momento de interactuar con un ambiente virtual utilizando como herramienta la interfaz háptica propuesta y se compara con los resultados obtenidos al utilizar los sistemas virtuales tradicionales compuestos solo por tecnología audiovisual sin incluir el canal háptico.

**(Palabras clave:** Design thinking, exoesqueleto háptico, realidad virtual, retroalimentación de fuerza)

## **Summary**

In this thesis is presented the development of a haptic exoskeleton interface for virtual reality environments with independent movement in each finger and a total of 11 degrees of freedom focusing on force feedback. The review of literature compares the advantages and disadvantages of the current devices and an alternative solution is proposed with the use of CD servomotors and a localization system based on IMU sensors. A mechanical design and interaction of the signals required for control are presented under the design thinking methodology, an user-centered product design methodology proposed by Tim Brown, as well the application of it to generate a concept that emulates the natural movement in the fingers accomplish with the requirements of form, aesthetics, use and function, capable of a simple integration of electromechanical actuators for their subsequent control and electronic manipulation. An experiment is proposed in order to validate if the inclusion of a third sense improve the user's performance at the moment of interact with a virtual environment using the developed interface as tool for the active use of the hands. Finally this results are compared with the results obtained with the use of the current virtual systems compounds only by audiovisual technology without including the haptic channel.

**(Key words:** design thinking, force feedback, haptic exoskeleton, virtual reality)

## **Dedicatoria**

*A mis padres, por su apoyo y guía a cada paso del camino  
y por enseñarme que nada es imposible  
si se lucha por ello.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Maestro Oswaldo Mendoza Herbert por su guía y amistad en esta etapa de mi carrera profesional y por tenderme la mano aunque no estuviera en sus posibilidades una solución.

A mis compañeros Estela, Mónica, Oliver y Arturo por apoyarme en todo momento, por hacer de este trayecto una experiencia mejor y más llevadera, por sus enseñanzas y risas, por considerarme un amigo y tener siempre momento para un consejo o regaño.

A mis padres y mis hermanos, por el apoyo y la confianza incondicional para cumplir mis metas aun cuando nos encontremos lejos.

Al CONACYT y a la UAQ por sus programas de apoyo al desarrollo de profesionales, sin ustedes no hubiera sido posible.

Evelin, gracias por soportarme aun en los momentos más difíciles y estar a mi lado a pesar de todo.

¡¡GRACIAS!!

# Índice

Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatoria.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
Índice.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Gráficas.....	xi
Capítulo 1.....	12
Introducción.....	12
1.1 Motivación (justificación y descripción del problema).....	13
1.2 Objetivo general.....	15
1.3 Objetivos específicos.....	15
1.4 Hipótesis.....	15
Capítulo 2.....	16
Realidad Virtual.....	16
2.1 Definición de Realidad Virtual.....	16
2.1.1 Entorno Virtual.....	16
2.1.2 Estado de Presencia.....	17
2.1.3 Retroalimentación sensorial.....	18
2.1.4 Interacción.....	19
2.1.5 Perspectiva.....	19
2.2 Historia de la Realidad Virtual.....	20
2.3 Sistemas de Realidad Virtual.....	22

2.3.1 Representación del mundo virtual.....	24
2.3.2 Renderizado del mundo virtual.....	24
2.4 Percepción humana.....	24
2.5 Sistema motor humano.....	25
2.6 Sistema cognitivo humano.....	25
Capítulo 3.....	26
Háptica.....	26
3.1 Definición de háptica.....	26
3.2 Clasificación de háptica.....	26
3.3 Anatomía de la mano humana.....	28
3.4 Panorama general de los dispositivos hápticos.....	31
Capítulo 4.....	37
Metodología.....	37
4.1 Design Thinking.....	37
4.2 Enfoque del Design Thinking para la innovación.....	38
4.3 Funcionamiento del Design Thinking.....	39
4.4 Técnicas y herramientas del Design Thinking.....	40
4.4.1 Observación encubierta.....	40
4.4.2 Mapa de Empatía.....	41
4.4.3 Los 5 Porqué.....	42
4.4.4 Brainstorming.....	43
4.4.5 Prototipado rápido.....	44
4.5 Descripción del sujeto de Estudio.....	44
4.6 Diseño de experimento.....	44
4.7 Variables a evaluar.....	46
4.8 Análisis de la información.....	47



Capítulo 5.....	49
Resultados y conclusiones.....	49
5.1 Aplicación del Design Thinking.....	49
5.2 Empatizar.....	51
5.2.1 Cuestionarios ITQ y PQ .....	52
5.3 Definir .....	54
5.3.1 Lista de requerimientos.....	55
5.3.2 Estructura funcional.....	56
5.4 Idear.....	56
5.5 Prototipar .....	60
5.5.1 Retroalimentación del usuario.....	62
5.6 Proceso de diseño de exoesqueleto.....	63
5.6.1 Configuración de dos dedos de exoesqueleto .....	67
5.7 Prototipo funcional .....	71
5.8 Funcionamiento .....	74
5.9 Conclusiones .....	75
5.10 Limitaciones y trabajos futuros .....	76
Referencias .....	77
ANEXO I.....	82
CONSENTIMIENTO INFORMADO .....	82
ANEXO II.....	83
CUESTIONARIO DE PRESENCIA .....	83
(PRESENCE QUESTIONNAIRE) .....	83
ANEXO III.....	87
CUESTIONARIO DE TENDENCIAS INMERSIVAS.....	87
(IMMERSIVE TENDENCIES QUESTIONNAIRE) .....	87
ANEXO IV .....	90

Norma DIN 33 402 ..... 90

## Índice de Figuras

Fig. 1: Evolución de la realidad Virtual. ....	21
Fig. 2: Ciclo de retroalimentación de un sistema virtual. ....	22
Fig. 3: Factores que influyen el grado de inmersión en un sistema de VR.....	23
Fig. 4 Clasificación de interfaces hápticas por portabilidad.....	28
Fig. 5 Estructura ósea de la mano.....	29
Fig. 6 Flexión de las articulaciones de los dedos de la mano. ....	30
Fig. 7 Clasificación de los patrones funcionales. a) Agarres de fuerza. b) Agarre de precisión.....	31
Fig. 8: Diferentes enfoques para la inclusión de las manos en entornos virtuales en la literatura. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Fig. 9: Metodología Design Thinking de cinco pasos de (Brown, 2009) .....	37
Fig. 10: Descripción grafica de funcionamiento del Design Thinking, de lo divergente a lo convergente.....	40
Fig. 11 Plantilla de Mapa de Empatía.....	42
Fig. 12 Relación de variables causa - efecto.....	46
Fig. 13: Design Thinking aplicado al desarrollo de una interfaz háptica.....	50
Fig. 14: Etapa de empatizar con el usuario. ....	51
Fig. 15: Estructura funcional para dispositivo háptico. ....	56
Fig. 16: Concepto 1, uso de tensores para limitación del movimiento.....	57
Fig. 17: Concepto 2, uso de servomotores y eslabones rígidos para limitación del movimiento.....	58
Fig. 18: Concepto 3, uso de tensores flexibles y servomotores para limitación de movimiento.....	59
Fig. 19 Prototipado rápido de concepto 1, para evaluar su funcionamiento.....	60

Fig. 20: Prototipado rápido de conceptos de interfaz háptica.....	61
Fig. 21: Trayectoria de movimiento de los dedos en posición de agarre.....	64
Fig. 22: Modelo 3D de dedo de mecanismo propuesto y estudio de movimiento en Solidworks. ....	65
Fig. 23: Modelo de montaje de exoesqueleto mecánico en mano.....	65
Fig. 24: Modelo 3D de concepto futurista para la parte estética.....	66
Fig. 25: Render de concepto de diseño basado en ciencia ficción.....	67
Fig. 26: Conformación de versión de dos dedos. ....	69
Fig. 27: Movimiento de dedo índice accionado por servomotor y mecanismo de barras. ....	70
Fig. 28: Movimiento de dedo pulgar accionado por servomotor y mecanismo de barras. ....	71
Fig. 29: Prueba de función mecanismo dedo índice y puntos de contacto.....	72
Fig. 30: Elementos del mecanismo que establecen contacto con el dedo para una sensación de contacto total.....	73
Fig. 31: Prueba de usabilidad para la estructura mecánica de la intefaz háptica..	73
Fig. 32 Esquema de funcionamiento del sistema.....	75

## **Índice de Tablas**

Tabla 1: Comparativa de sistemas hápticos existentes. ....	33
Tabla 2: Comparativa de sistemas hápticos existentes.....	47
Tabla 3: Concentrado de respuestas a las encuestas de ITQ y PQ.....	52
Tabla 4: Calculo de totales y puntuación individual de los cuestionarios ITQ y PQ. .....	53
Tabla 5: Lista de deseos y requerimientos.....	55
Tabla 6: Evaluación de conceptos en distintas categorías.....	62
Tabla 7 Comparación de versiones de cinco y dos dedos. ....	67

## **Índice de Gráficas**

Gráfica 1: Tendencias de presencia e inmersión. ....	54
--	----

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años, la realidad virtual ha adquirido presencia en múltiples escenarios, ya que al ser un área multidisciplinaria y dada la versatilidad de su aplicación se ha convertido en un nicho de mercado que actualmente se encuentra en creciente desarrollo tanto comercial como de investigación.

Hoy en día, múltiples productos e investigaciones se pueden encontrar fácilmente con respecto a realidad virtual, sin embargo, la mayoría se centra en mejoras incrementales dirigidas a sistemas audiovisuales presentes en el mercado, dejando de lado el resto de los canales perceptivos que pueden incrementar el realismo e inmersión a dichos sistemas.

El presente trabajo se centra en el desarrollo de una interfaz háptica como herramienta para los entornos de realidad virtual, introduciendo un tercer canal de información bidireccional, habilitando el uso activo de las manos mediante la retroalimentación de fuerza, que permita generar en el usuario un estado de presencia mayor y por consiguiente, un aumento en el grado de inmersión.

En el capítulo 1 y 2 se describe un panorama general de los sistemas de realidad virtual, las limitaciones que se han encontrado y oportunidades de mejora así como la justificación para el desarrollo de dicho trabajo. En el capítulo 3, se habla de la háptica y su importancia en la interacción con el mundo para el ser humano, así como, trabajos relacionados con este campo de estudio. Posteriormente, en el capítulo 4, se describe la metodología de la investigación en sus distintas fases así como las herramientas utilizadas para su aplicación y un breve marco teórico necesario para su realización. Finalmente, en el capítulo 5 se muestran los resultados y discusión del prototipo además de los resultados obtenidos en el análisis estadístico correspondientes al diseño de experimento para las conclusiones.

## 1.1 Motivación (justificación y descripción del problema)

En 2016, según estimaciones de la consultora Deloitte, la industria de la realidad virtual logró superar los mil millones de dólares en ingresos (Sallomi & Lee, 2016). Así mismo, las ventas por los *Head Mounted Displays* (HMD) crecieron 1047% con un total de 8,2 millones de unidades vendidas (BBVA Innovation Center, 2016) lo que demuestra que es un nicho de oportunidad para futuros desarrollos.

Si bien, la realidad virtual (VR por sus siglas en inglés) no es un término nuevo, en los últimos años y con la llegada de Oculus Rift®, la posibilidad de desarrollo de aplicaciones y la introducción a nuevos mercados ha crecido deexponencialmente; ya que, los avances tecnológicos han posibilitado la estandarización de componentes y la disminución de costos. Prueba de ello, es el uso de simulación en procesos de manufactura (Mujber, Szecsi, & Hashmi, 2004), turismo (Guttentag, 2010), psicología (Srivastava, Chaudhury, & Das, 2014), educación (Ludlow, 2015), entre otras.

Asimismo, su aplicación se ha potencializado en medicina y entretenimiento, por las ventajas que dichas aplicaciones suponen versus la realidad, tales como: reducción de costos, disminución de barreras geográficas y riesgos, inclusión de personas independientemente de su antropometría, entre otras (Corbetta, Imeri, & Gatti, 2015).

A pesar de lo anterior, la mayoría de estas aplicaciones comprenden interfaces audiovisuales vía sistemas de visión 3D y audio 360 (Holden, 2005) y mecanismos complejos que involucran estructuras móviles (simuladores) para el adiestramiento de prácticas de riesgo (Kim & Lee, 2013). Sin embargo, ambas alternativas impiden al usuario una retroalimentación táctil que permita proporcionar una sensación de inmersión mayor, especialmente en actividades donde se requiere el uso de las manos para la realización de tareas específicas o para un el adiestramiento del uso de herramientas o procedimientos especiales, en donde un realismo mayor es proporcional a la efectividad de la tarea aprendida.

Las interfaces hápticas permiten tocar, sentir y manipular objetos de forma natural al introducir el sentido del tacto, lo que proporciona al usuario tanto sensaciones como información del entorno, imposible de captar de otra manera. Si a los estímulos visuales, auditivos y kinestésicos añadimos un nuevo sentido, el háptico, que consiste en emplear el sentido del tacto de manera activa con el objetivo de obtener información del objeto que se esté tocando; la experiencia, el nivel de concentración y la atención prestada aumentarían de manera significativa dando como resultado una mejora en el proceso de aprendizaje de una actividad (Alexander, Johnson, & Schreiber, 2002).

Paralelamente, a pesar de que la calidad de los sistemas audiovisuales en los entornos de realidad virtual se acrecienta día con día, existen aplicaciones para las cuales las interacciones kinestésicas y hápticas añaden más valor con respecto a la interacción y sentido de presencia (Bowman, McMahan, & Tech, 2007).

Sumado a lo anterior, se ha reportado una sensación de malestar después del uso de visores (HMD) comerciales durante un periodo de diez a treinta minutos, debido a la falta de inmersión total, ocasionada por la ausencia de la sensación del cuerpo cuando se voltea hacia abajo y la incapacidad de ver pies o manos (Eutsler, Gaertner, Pollino, Robinson, & Moges, 2015). Por consiguiente, la presencia incluso de una forma no activa del resto del cuerpo, aumenta el estado de la misma y por consiguiente, el grado de inmersión que el usuario experimenta al momento de adentrarse en un mundo virtual (Mihelj & Podobnik, 2012).

Con base en lo anterior, la introducción de una interfaz háptica a los sistemas comerciales existentes que posibilite la inclusión de un tercer sentido (tacto), , eliminaría dicha sensación de ausencia y aumentaría el grado de inmersión al contar con información extra del ambiente virtual por medio de retroalimentación háptica; además de generar mayores condiciones de interacción con el entorno para que el estado de presencia se logre exitosamente.



## 1.2 Objetivo general

Desarrollar un dispositivo háptico para limitar el movimiento en los dedos de los usuarios que emule el sentido del tacto por medio de retroalimentación de fuerza, para generar un mayor estado de presencia e incrementar la inmersión en comparación con los sistemas virtuales audiovisuales tradicionales.

## 1.3 Objetivos específicos

1. Diseñar una estructura ergonómica tipo exoesqueleto adaptable a las distintas medidas antropométricas de usuarios.
2. Elegir e implementar un método efectivo de *hand tracking* para minimizar los problemas de oclusión.
3. Aplicar un control electrónico basado en sistemas embebidos para la integración del sistema.

Analizar la respuesta del usuario conforme a la interfaz háptica, para medir la inmersividad del sistema en comparación a los sistemas audiovisuales tradicionales

## 1.4 Hipótesis

*La inclusión de la retroalimentación de fuerza para la limitación del movimiento en los dedos mediante una interfaz háptica mejora las condiciones para la generación de un estado de presencia al incluir un tercer canal de transmisión bidireccional de información del entorno y permite el aumento de inmersión del usuario, en comparación con los sistemas virtuales audiovisuales tradicionales.*

## Capítulo 2

### Realidad Virtual

El concepto de realidad virtual ha sido empleado en distintas áreas y con diversas connotaciones, por tal motivo, lo hemos aceptado y adoptado con gran facilidad, y es que la idea de adentrarse en un mundo donde la imaginación no tenga límites no es nueva para la humanidad. A lo largo de este capítulo se describen los distintos elementos que componen la realidad virtual, así como su historia y sus distintas áreas de aplicación.

#### 2.1 Definición de Realidad Virtual

La realidad virtual (VR por sus siglas en inglés *virtual reality*) es una simulación interactiva basada en un entorno creado por computadora en donde uno o varios usuarios pueden adentrarse de forma virtual, mediante el uso de distintas herramientas que le permiten experimentar percepciones multisensoriales emulando la realidad y creando un estado de presencia en el entorno. Existen cuatro elementos básicos que componen a la VR que involucran tanto al sistema virtual (hardware) como al usuario: entorno virtual, retroalimentación sensorial, interactividad y presencia virtual (Sherman & Craig, 2003).

##### 2.1.1 Entorno Virtual

El entorno virtual es una reconstrucción del mundo real mediante el uso de software de modelado en 3D y motores de renderizado, para la aplicación de leyes físicas que se aplican para dar un mayor sentido de realismo (Bystrom, Barfield, & Hendrix, 1999). Mismo, que está determinado por su contenido, es decir, objetos presentes y personajes que interactúan con ellos.

Este contenido es mostrado a través de varias modalidades, siendo la más común una pantalla o visor, y es percibido por el usuario mediante sus sentidos. Análogamente al mundo real, los objetos presentes en el entorno virtual poseen propiedades tales como color, textura, forma, densidad, temperatura, peso, entre otras; las cuales son observadas mediante los diferentes canales perceptuales del usuario (visión, audio, tacto, olfato y gusto) o mediante la combinación de ellos. Así el color, por ejemplo, se encuentra en el dominio de la visión; mientras que la textura entra en los dominios de la visión y el tacto, siendo la combinación de ambos, la que brinda mejor percepción.

Al mismo tiempo, el contenido dentro del entorno virtual tiene distintas funciones y puede ser clasificado en diferentes categorías. *Topología del entorno* que describe la forma de la superficie, áreas y características. Los *objetos*, formas tridimensionales que ocupan espacio en el mundo virtual y con los que el usuario puede interactuar, *Intermediarios*, que pueden ser personajes o avatares y son controlados por el usuario mediante las distintas interfaces. Por último, existen *elementos de interfaz de usuario* al interior del entorno virtual, tales como botones, seleccionadores o cualquier forma de control que complementa la interfaz general para la interacción del sistema con el usuario (Mihelj, Novak, & Beguš, 1999).

### **2.1.2 Estado de Presencia**

El estado de presencia, que el usuario puede o no experimentar, se divide en físico y mental (Waterworth & Waterworth, 2010); representa la sensación de realidad “ser” en un entorno que puede ser un estado completamente psicológico o bien logrado a través de algún medio físico. Este último, se obtiene por medio de la presentación del mundo virtual con una serie de estímulos físicos sintéticos, de uno o varios sentidos en respuesta a la posición o acciones del usuario en interacción con el entorno; es decir, cuando el usuario se mueve, los estímulos visuales, auditivos, kinestésicos y hápticos cambian de posición con respecto de la escena virtual que también se mueve.

Por otro lado, el nivel de presencia mental es personal, depende del contexto y respuesta del usuario y se relaciona con la experiencia de “estar ahí”. Distintos usuarios pueden experimentar diferentes niveles de presencia con el mismo sistema de VR, y un mismo usuario a su vez puede experimentar niveles desiguales de presencia con el mismo sistema en diferentes instantes de tiempo (Slater, 2003).

A su vez, el nivel deseado de presencia mental depende del objetivo de la aplicación de la VR; por ejemplo, si ésta es utilizada para el entretenimiento, un nivel alto de presencia mental es requerido. Sin embargo, un nivel alto de presencia mental no es a menudo necesario, posible o siquiera deseable.

Ya que, el estado de presencia mental de un usuario puede tener diferentes grados de intensidad; es decir, el usuario puede percibir la conexión con la computadora, ignorar el mundo real y enfocarse en la interacción con el mundo virtual mientras sigue consciente de las diferencias entre el mundo real y el mundo virtual, o puede estar tan inmerso en el entorno virtual que se olvida completamente de la realidad.

Otro factor importante que afecta el nivel de presencia es el *delay* o tiempo de retraso entre la acción del usuario y la respuesta del mundo virtual; si el retraso es muy prolongado puede fácilmente destruir el efecto de presencia mental.

### **2.1.3 Retroalimentación sensorial**

Para lograr un mejor estado de presencia, el sistema de VR debe ser interactivo, es decir, el usuario debe tener respuesta del ambiente; la retroalimentación sensorial representa una de las formas más efectivas (Mihelj & Podobnik, 2012). En la cual el usuario es provisto de *feed-back* de acuerdo con su localización física; generalmente, se brinda por medio de información visual y auditiva aunque en algunos ambientes sólo se provee información kinestésica. Por lo anterior, es de suma importancia registrar la posición del usuario para proveer una correcta retroalimentación.

Además, un indicador de efectividad de un sistema de VR es el grado de inmersión que genera. Ésta se percibe por una parte, como una descripción cuantificable de

la tecnología, principalmente por la complejidad de los sistemas de visualización (Slater & Wilbur, 1997), y por otro, como la percepción y reacción individual a los ambientes virtuales (Bystrom, Barfield, & Hendrix, 1999). Por lo que, se observa una relación entre el estado de presencia e inmersión;no obstante, no existe una relación obvia o sencilla entre ellas. A pesar de ello, al hablar de sistemas de VR se debe considerar esta relación, ya que una puede influenciar la otra y viceversa.

### **2.1.4 Interacción**

Para que un sistema de RV sea realista debe responder a las acciones del usuario, es decir, debe ser interactivo.La habilidad de afectar el entorno virtual representa una forma de interacción, otra posibilidad es cambiar la localización y el ángulo desde el cual el usuario visualiza el contenido virtual. Un esquema multiusuario representa una extensión de interactividad e involucra un gran número de usuarios, trabajando simultáneamente en el mismo entorno virtual;lo que permite interacción tanto del usuario con el entorno, como entre otros usuarios. Aunque esto último no es necesariamente un requerimiento para que un sistema sea de VR.

### **2.1.5 Perspectiva**

Además de la interacción, otro factor que afecta el nivel de inmersión de un sistema de VR es la perspectiva, definida como el punto vista desde el cual el mundo virtual es percibido y depende del objetivo de la aplicación y de la intención del creador del entorno hacia el usuario. Una perspectiva en *primera persona* es la representación del mundo a través de los ojos de un personaje o avatar, el cual está en contacto directo con las acciones; mientras que en *segunda persona* implica una observación desde la proximidad inmediata de la acción relevante, y un perspectiva en *tercera persona* involucra la observación desde un punto totalmente independiente a la acción (Mihelj, Novak, & Beguš, 1999).

## 2.2 Historia de la Realidad Virtual

El término realidad virtual, al igual que el concepto, ha ido evolucionando con el paso del tiempo, siendo utilizado en distintas maneras y bajo diferentes alcances. Incluso es un tanto controversial por la naturaleza oximorónica del término, es decir, la combinación de elementos que son en apariencia contradictorias (Pérez, Zabre, & Islas, 2004).

Desde principios del siglo XX, en la literatura se ha hecho referencia a este concepto, tal es el caso del libro de Aldous Huxley llamado *Brave New World*, donde se introdujo la idea de películas en las que además de imágenes se pudiera incorporar el tacto. Por su parte, Stanley Weibaum en 1935, presentó una idea más detallada de la realidad virtual en su libro *Pygmalion's spectacles*, donde al igual que Huxley, propone películas que incorporen no sólo el audio y la vista, sino los sentidos del gusto, olfato e incluso el tacto e incluso le permitan al espectador estar dentro de la historia y no sólo detrás de una pantalla.

Dos décadas después, en 1957 Morton Heilig, considerado el padre de la VR, desarrolló y patentó el *Sensorama*, una máquina que ofrecía un paseo en bicicleta proyectando una ciudad en tres dimensiones, los sonidos de la ciudad, el viento y la vibración en el asiento e incluso algunos olores característicos de la misma. Aunque sin éxito comercial, el *Sensorama* se convirtió en el primer paso en el desarrollo de la VR.

Posteriormente, la empresa Philco desarrollo el primer visor HMD (*Head Mounted Display*) sustituyendo las pantallas que se venían utilizando, y aunque no se utilizaba un entorno generado en computadora, sino que se proyectaba un video de la realidad, éste puede ser considerado el primer ejemplo de telepresencia.

Por su parte en la década de los 70, Myron Krueger, desarrolló el concepto bajo el término de *Artificial Reality* que consistió en el primer entorno capaz de reaccionar a las acciones de los usuarios mediante el uso de varios sensores tales como videocámaras y sensores de presión situados en el piso.

Finalmente, en 1989, el primero en acuñar el término de realidad virtual fue el escritor, informático y fundador de la empresa VPL Research Jaron Lanier (Beier, 2003). Misma que se dedicó a la investigación y desarrollo de sistemas de VR, tales como *Reality built for Two* y *VPL Data Glove*, pero al igual que el *Sensorama*, sin éxito comercial.

Paralelamente a la investigación, la ciencia ficción ha introducido el concepto de realidad virtual en la mente de las masas mediante libros, cine, radio y programas de televisión; haciendo esta idea popular y de conocimiento general, ejemplo de ello son películas como *TRON* en 1982, el exitoso programa de televisión *Star Trek* en 1987. Además de una gran cantidad de estrenos en la década de los 90's y principios de los 2000, como el caso de la trilogía de *Matrix*.

Desde la década de los 70s, hasta nuestros días, el desarrollo de la VR ha presentado hitos cada vez más recurrentes (figura 1), que permiten vislumbrar que no sólo es una tendencia en la actualidad, sino que tiene un amplio campo de aplicaciones e innovaciones en prospectiva.

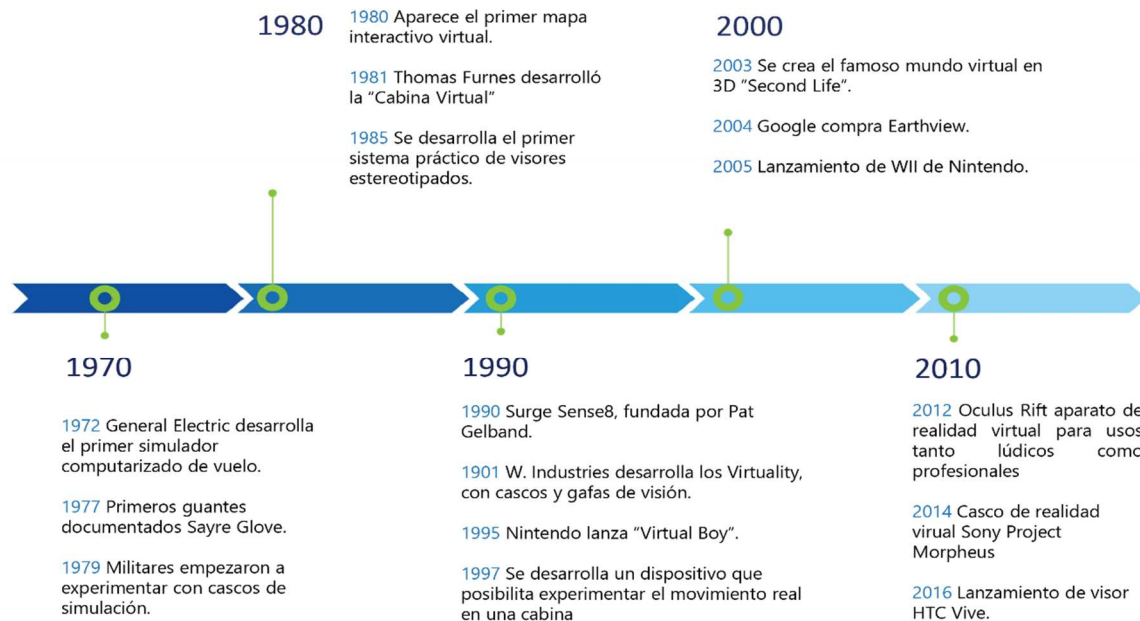


Fig. 1: Evolución de la realidad Virtual.

Fuente: BBVA Innovation Center, Mayo 2015

## 2.3 Sistemas de Realidad Virtual

La VR se centra en un sistema cerrado de retroalimentación, que permite la interacción, a través de la detección de las actividades del estado psicosocial del usuario y del intercambio de información mediante interfaces, las cuales son puentes de enlace entre el usuario y el entorno virtual (figura 2). Dichas interfaces definen cómo el usuario se comunica e interactúa con el entorno mediante la captura de movimiento procesado con algoritmos matemáticos y representado por modelos computacionales que emulan el movimiento capturado y se manifiestan en forma de percepciones sensoriales.

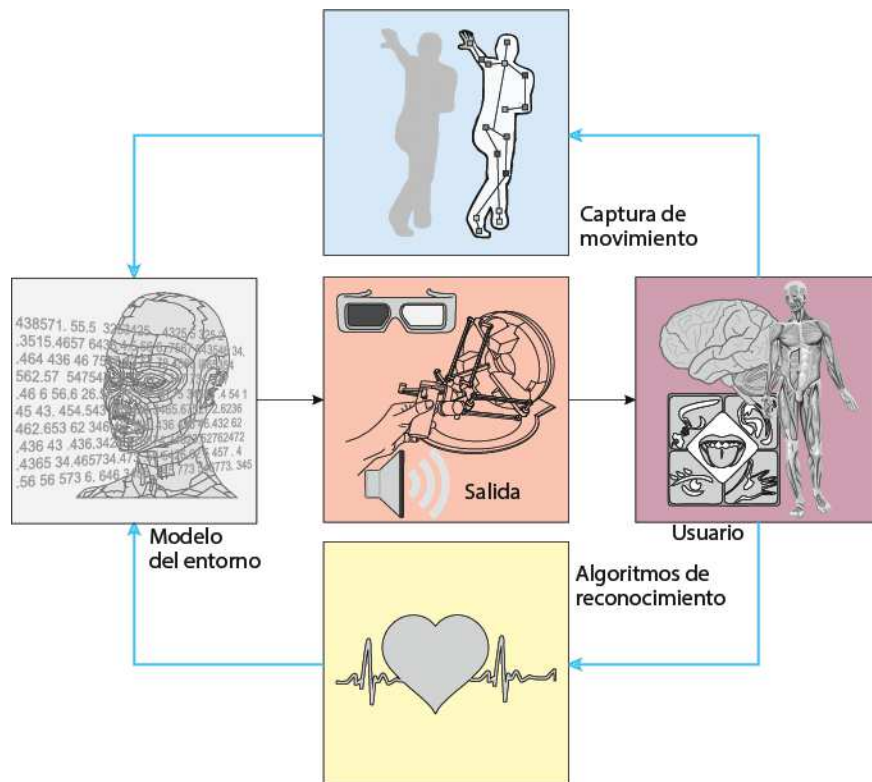


Fig. 2: Ciclo de retroalimentación de un sistema virtual.

Fuente: Extraída de Virtual Reality technologies and applications (Mihelj, Novak, & Beguš, 1999).

Estas interfaces son parte de una serie de factores que influyen directamente en la calidad de la experiencia brindada por los sistemas de VR y se pueden clasificar en tres grandes grupos (figura 3): **interface, métodos de creación del mundo virtual**



y **aspectos personales del usuario**. A su vez cada grupo contiene una serie de factores que están directamente relacionados para el logro de una mayor experiencia de inmersión y de sentido de presencia.

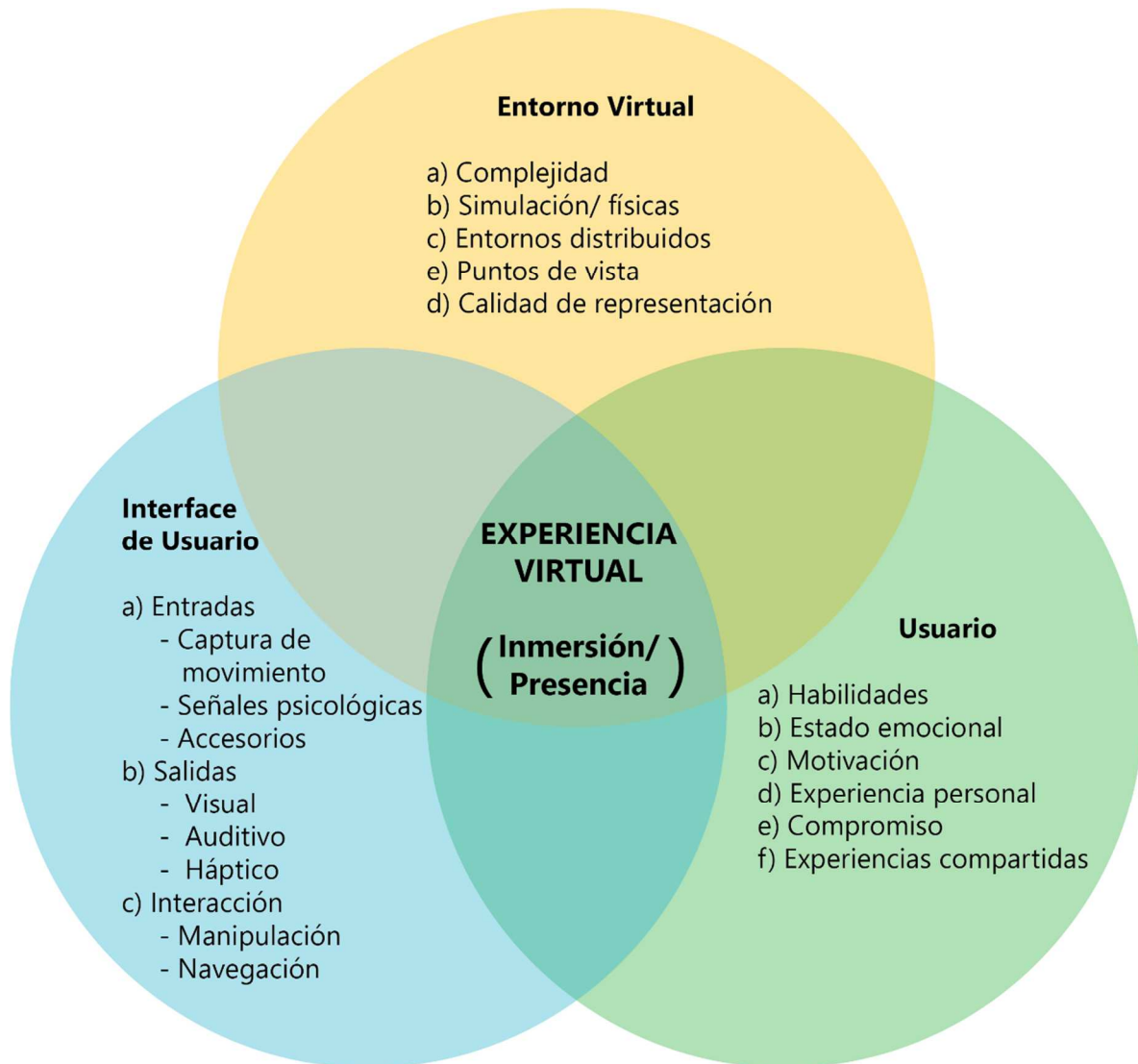


Fig. 3: Factores que influyen el grado de inmersión en un sistema de VR.

Fuente: Extraída de Virtual Reality technologies and applications (Mihelj, Novak, & Beguš, 1999).

### **2.3.1 Representación del mundo virtual**

Para crear VR es necesaria la representación de ideas e información en distintas formas, tales como imágenes, sonido, retroalimentación háptica, etc. La complejidad de la representación del entorno al incluir propiedades y leyes físicas, así como diversos puntos de vista y gráficos de alta calidad, aumenta el realismo del entorno propuesto y por consiguiente, la aceptación del usuario, facilitando la inmersión en el mismo (BBVA Innovation Center, 2015).

### **2.3.2 Renderizado del mundo virtual**

Mediante el uso de hardware y software especializado, el entorno virtual generado digitalmente es transformado en señales que son representadas en formas que el humano puede percibir de manera notable. Al mismo tiempo, debido a que cada sensación es un canal de comunicación diferente, el uso de herramientas de hardware para cada sentido es necesario. Aunado a la creación de detalles que aseguren la correcta distinción de los diferentes estímulos visuales, auditivos y hápticos (Sherman & Craig, 2003).

## **2.4 Percepción humana**

El humano percibe el entorno a su alrededor mediante múltiples canales sensoriales que captan los diferentes estímulos electromagnéticos (vista), químicos (olfato, gusto) y mecánicos (oído, tacto, orientación), mediante el uso de convertidores biológicos llamados receptores, responsables de transmitir esta información al sistema nervioso central (Bystrom, Barfield, & Hendrix, 1999). En general, cada receptor sensa sólo un tipo de energía o estímulo, por lo que, muchos de éstos pueden reproducirse de manera artificial en la VR.

A pesar de que, existe una gran variedad de tipos de receptores, la mayoría se estructura en tres unidades funcionales: filtro, convertidor y codificador. Por su parte,

el filtro recibe la energía de entrada y la acondiciona; es decir, mantiene el mismo tipo de energía (mecánica, química, óptica, etc.) pero amplifica o disminuye ciertos parámetros de su conformación. Posterior a ello, el convertidor transforma estos parámetros en pulsos eléctricos para que finalmente el codificador convierta estas señales en secuencias de acciones potenciales.

## **2.5 Sistema motor humano**

El ser humano utiliza sus habilidades motoras para interactuar con el mundo virtual. Esta interacción puede ser dividida en navegación espacial, manipulación de objetos e interacción con otros usuarios (Gutierrez, Vexo, & Thalmann, 2008). Por esta razón, cuando se habla de estímulos hápticos es de suma importancia tener conocimiento del sistema motor humano para crear una interfaz háptica estable, ya que este sistema, toma el rol principal.

## **2.6 Sistema cognitivo humano**

Una vez que los diversos estímulos son captados del entorno y procesados por los diferentes tipos de receptores y sistemas biológicos. El sistema cognitivo es utilizado para la toma de decisiones de cómo se va a interactuar con el sistema virtual. Además de ello, la parte racional de este sistema es crucial para el manejo de las emociones generadas por los entornos virtuales, ya que, éstas tienen un importante efecto en el comportamiento, que el usuario asumirá en la interacción (Gallace & Spence, 2014).

## Capítulo 3

### Háptica

La háptica, se refiere a la habilidad de tocar y manipular objetos, es decir, está basada en la sensación táctil la cual provee conciencia de los estímulos en la superficie del cuerpo (Samur, 2012).

Los entornos virtuales que sólo involucran los sentidos visual y auditivo están limitados en la habilidad de interactuar con el usuario; por lo que, se necesita la inclusión de sistemas hápticos que permitan la transmisión de sensaciones y la manipulación de objetos.

El brazo y mano humanos permiten la exploración de las propiedades de los objetos, como textura, forma y manipulación. Esta habilidad trasladada a los sistemas de VR y aumentada con la percepción visual y auditiva, permiten un grado de inmersión que de otra forma no sería posible. Aunado a esto, la inhabilidad de tocar y sentir los objetos, ya sea en el mundo real o virtual, empobrece y afecta significativamente la habilidad de interactuar con el entorno (Minsky, Ming, Steele, Brooks, & Behensky, 1990).

#### 3.1 Definición de háptica

El termino háptica proviene del termino griego “*haptios*” que describe algo que puede tocarse y es la ciencia que introduce el sentido del tacto, es decir, la combinación de sensaciones mecánicas, térmicas, táctiles y kinestésicas excluyendo la percepción óptica, acústica, olfativa y gustativa (Thorsten A., 2009).

#### 3.2 Clasificación de háptica

La háptica es una combinación de estímulos que pueden clasificarse en diferentes grupos:

- **Háptica:** describe las capacidades sensoriales, así como el motor dentro de la piel, articulaciones, músculos y tendones.
- **Táctil:** significa la interacción mecánica con la piel. Por lo tanto, la percepción táctil es la sensación de interacción exclusivamente mecánica en donde no está solamente ligada a fuerzas o movimientos.
- **Kinestesia:** describe las capacidades tanto actuarias como sensoriales de músculos y articulaciones, haciendo referencia a sus fuerzas, torques, movimientos, posiciones y ángulos. Como resultado cualquier interacción cinestésica tiene un componente táctil con base en esta definición (Gallace & Spence, 2014).

La háptica también puede clasificarse según el tipo de retroalimentación que proporcione en: retroalimentación de fuerza, retroalimentación táctil, o retroalimentación propioceptiva (Burdea, Lin, Ribarsky, & Watson, 2005). Cada una, proporciona diferente información a los estímulos hápticos, por lo que su función y correcta elección, es clave para su aplicación adecuada. Así mismo, se puede catalogar las interfaces por su portabilidad o soporte, pudiendo ser interfaces de escritorio, fijas o portátiles. En estas últimas se encuentran las del tipo exoesqueleto y guante; ambas se enfocan en el recubrimiento de las manos para emular el movimiento de las mismas (figura 4). De ahí, la importancia de entender su estructura y funcionamiento.

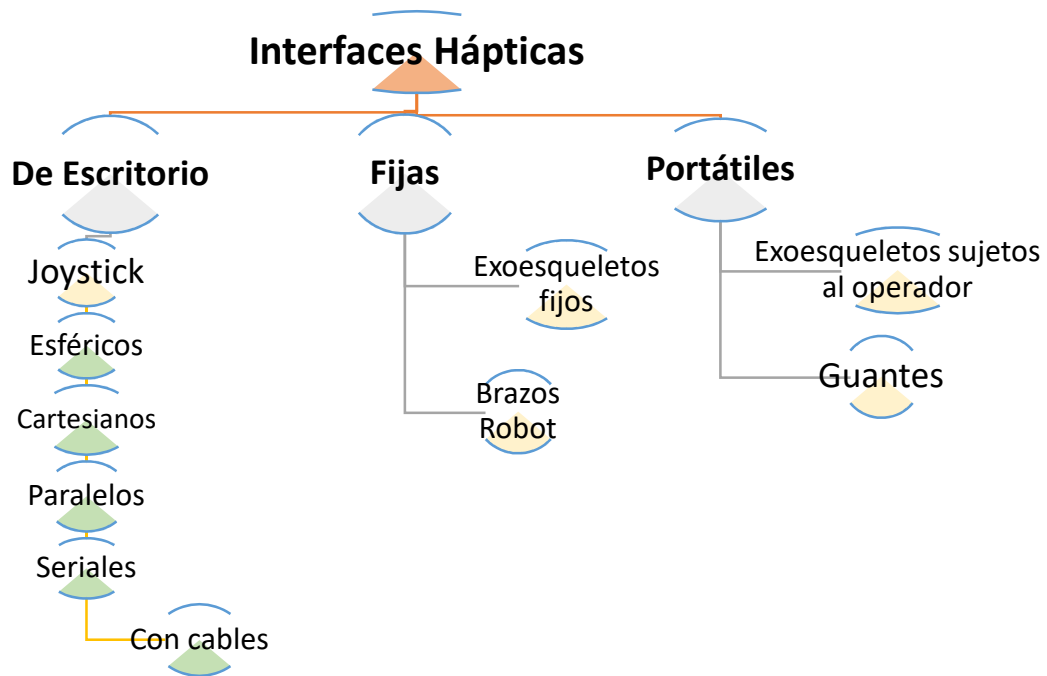


Fig. 4 Clasificación de interfaces hápticas por portabilidad.

Fuente: Elaboración propia basada en Special issue on haptics, virtual, and augmented reality (Burdea, Lin, Ribarsky, & Watson, 2005)

### 3.3 Anatomía de la mano humana

La mano humana y la muñeca (figura 5) se componen de 27 huesos: 14 huesos son falanges en los dedos, 5 metacarpianos en el área de la palma, y 8 carpos en la muñeca (Arias, 2012). Tanto la articulación de la muñeca como la de los dedos tienen dos grados de libertad de movimientos con la palma (llamada metacarpofalángica, ya que, articula la falange proximal con el hueso metacarpiano). Los movimientos laterales que permiten abrir y cerrar son limitados, pero los movimientos de flexión y extensión son extremadamente amplios.

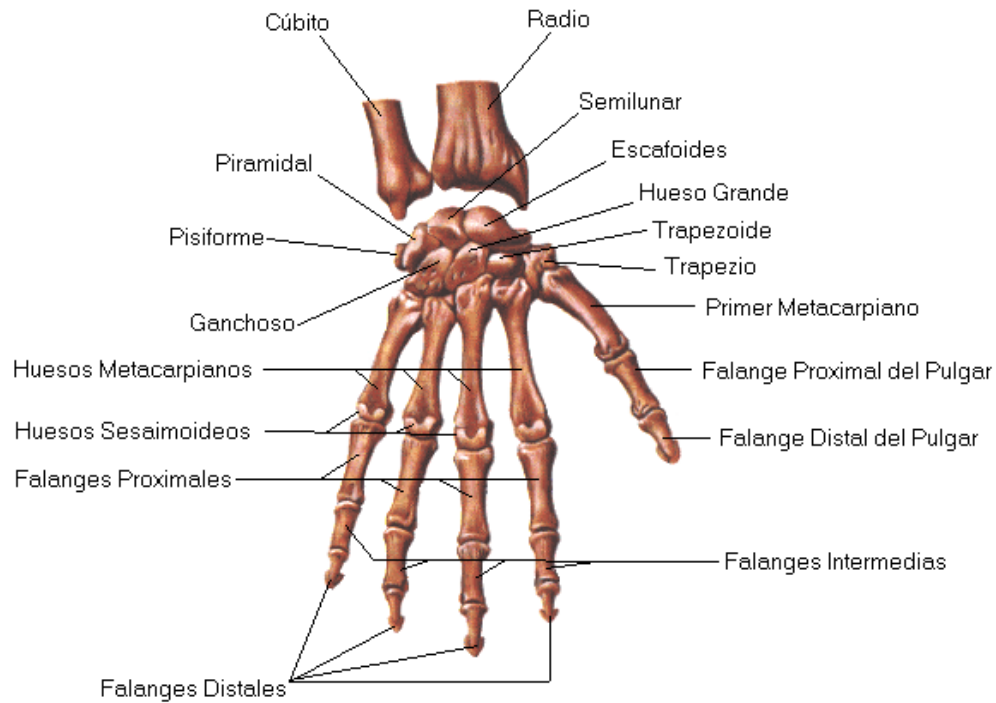


Fig. 5 Estructura ósea de la mano.

Fuente: Extraída de <http://vagoaqui.blogspot.mx/2012/09/huesos-del-cuerpo-humano.html>

Por lo que, la mano es capaz de maniobrar casi en cualquier posición que se desee, debido a la destreza de sus dedos y la habilidad de la muñeca para acomodarla en dicha posición. Por otra parte, los movimientos laterales que permiten abrir los dedos (llamados de aducción y abducción) son limitados, pero los movimientos de flexión y extensión son extremadamente amplios. El dedo pulgar tiene una movilidad excepcional (por esto, es bastante útil en las habilidades de manipulación) y los otros cuatro dedos se mueven de manera limitada en sentido lateral, aunque su capacidad de flexión (para abrir y cerrar la mano) es muy buena. Esta capacidad de flexionar, así los dedos es muy importante para la habilidad de atrapar objetos y mantenerlos con seguridad (Arias, 2012).

El movimiento de las articulaciones de los dedos de la mano, excepto el pulgar, se realiza fundamentalmente en el plano de flexión-extensión donde la flexión constituye la mayor parte del movimiento. La abducción y la aducción son limitadas, y se producen tan sólo en las articulaciones MF (figura 6).

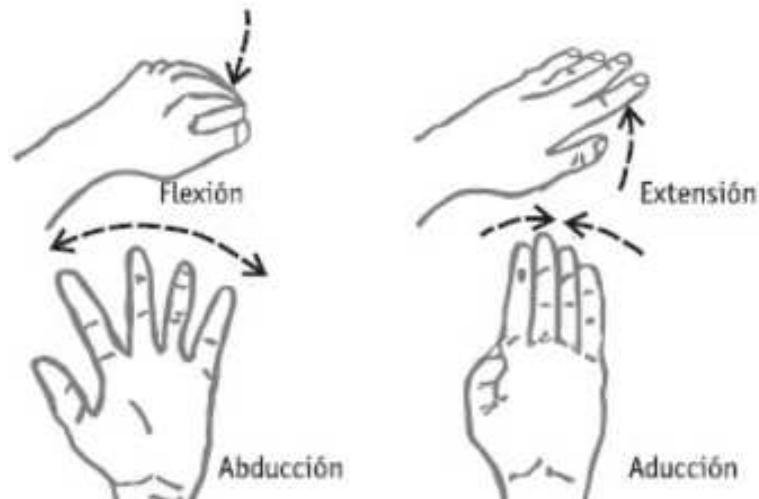


Fig. 6 Flexión de las articulaciones de los dedos de la mano.

Fuente: Extraído de <http://gsdl.bvs.sld.cu/greenstone/collect/enfermeria/index/assoc/HASHfe82.dir/>

Para coger objetos, la mano debe adaptar su forma. En una superficie plana, la mano se extiende y se aplanan contactando la superficie con la eminencia tenar e hipotenar, la cabeza de los metacarpianos y la cara palmar de las falanges. Cuando se quiere coger un objeto voluminoso, la mano se ahueca y forma arcos orientados en tres direcciones: en sentido transversal, que corresponde a la concavidad del macizo carpiano y se prolonga hacia abajo mediante el arco metacarpiano; en sentido longitudinal, los arcos carpometacarpofalángicos que están constituidos en cada dedo, por el metacarpiano, y las falanges correspondientes (Young, 2003).

Esta compleja organización anatómica y funcional de la mano converge en la prensión. La función prensil de la mano depende de la integridad de la cadena cinética de huesos y articulaciones extendida desde la muñeca hasta las falanges distales. La interrupción en los sistemas de arcos transversales y longitudinales resulta en inestabilidad, deformidad y pérdida de función.

En 1956, Napier clasificó los patrones funcionales en: agarres de fuerza y agarres de precisión (figura 7) (Young, 2003).



Los agarres de fuerza son aquellos en los cuales los dedos están flexionados en las tres articulaciones, el objeto se encuentra entre los dedos y la palma, el pulgar se aduce y queda posicionado sobre la cara palmar del objeto, hay una ligera desviación cubital y se realiza una ligera dorsiflexión para aumentar la tensión de los tendones flexores (Arias, 2012).

Por su parte, los agarres de precisión se utilizan para la manipulación de pequeños objetos entre el pulgar y las caras flexoras de los dedos, la muñeca se posiciona en dorsiflexión, los dedos permanecen semiflexionados y el pulgar se aduce y se opone. Estos agarres se clasifican a su vez, de acuerdo a las partes de las falanges utilizadas para soportar el objeto que se está manipulando, en: pinza terminal, pinza palmar, pinza lateral o de llave, pinza de pulpejo o cubital (Arias, 2012) .

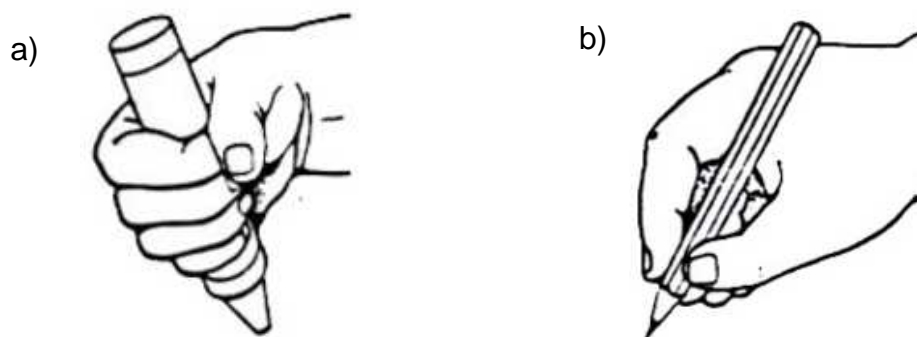


Fig. 7 Clasificación de los patrones funcionales. a) Agarres de fuerza. b) Agarre de precisión.  
Fuente: Extraído de <https://entretelo.wordpress.com/2014/01/19/el-desarrollo-del-agarre-del-lapiz/>

### 3.4 Panorama general de los dispositivos hápticos

Si bien la idea de introducir nuevos sentidos al mundo virtual no es nueva, ya que, se han realizado varias investigaciones, su complejidad de funcionamiento y elevado costo han dificultado su uso eficaz y exitosa introducción al mercado. En la

figura 8 se muestran algunos de los métodos utilizados para emular el sentido del tacto en entornos virtuales, y se mencionan algunas de sus ventajas y desventajas.



Fig. 8: Diferentes enfoques para la inclusión de las manos en entornos virtuales en la literatura.

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de ellos no ofrecen retroalimentación de fuerza, sino que son unidireccionales, ya que, sólo retroalimentan la posición del usuario al ordenador para su procesamiento, pero éste no regresa a su vez la retroalimentación táctil para experimentar una mayor sensación de inmersión. Solo los dispositivos de solución tipo mecánica ofrecen esta característica, pero su diseño robusto y poco ergonómico, los hace poco atractivos para el mercado y los usuarios en general.

Tabla 1: Comparativa de sistemas hápticos existentes.

AUTOR / COMPAÑÍA	NOMBRE	CONFORMACIÓN / TIPO	TIPO DE ACCIONAMIENTO	TRACKING	DOF (DEGREE OF FREEDOM)	SDK	ÁREA DE TRABAJO	PESO APROXIMADO (grs)	INMERSIÓN LOGRADA	STATUS	PRECIO
Cyber Glove Systems	CYBERGRASP	Exoesqueleto	Mecánico (servomotores)	Acelerómetros	11	NO	1 m Esférico	450	-	Comercial	-
Nueorodigital Technologies	GLOVEONE	Guante	Actuadores Vibrotactiles	IMU's (Acelerometro / giroscopio)	9	SI	10 m Esférico	100	+	Comercial	€ 249
Manus VR	MANUS VR	Guante	Vibradores	IMU's (Acelerometro / giroscopio)	11	SI	20 m Esférico	100	+	Comercial	€ 250
Dexta Robotics	DEXMO	Exoesqueleto	Mecánico (servomotores)	IMU's (Acelerometro / giroscopio)	11	SI	20 m Esférico	190	++	Comercial	NA
Sensable Technologies	PHANTOM	Brazo Robótico	Motor DC	Encoders	2-6	SI	160 W 120 H 120 D mm	1786	+	Comercial	\$1,200
Mourad Bouzit, George Popescu, Grigore Burdea and Rares Boian, 2002	Rutgers Master II ND	Guante	Actuador Nneumático	Sensores de Flexión Efecto Hall	5	NO	2 m Esférico	80	-	Prototipo	-
Robot Hand Unit for Research	HIRO III	Brazo y Mano Robótico	Motor DC	Encoders	15 para la mano 6 para el brazo	NO	0.09 m3	780	++	No Comercial	-
Vivoxie	POWERCLAW	Guante	Celda de Peltier Buzzers	Infrarrojo (Leap Motion)	NA	SI	650 mm3 Spherical Conic	120	+	Comercial	\$400
Rice University	HANDS OMNI	Guante	Micro Camaras de Aire	Infrarrojo (Leap Motion)	5	NO	650 mm3 Spherical Conic	350	-	Prototipo	-
El Rifado Studio	TOUCH VR	Exoesqueleto	Micro motoreductores CD	IMU's (Acelerometro / giroscopio)	11	SI	2 m Esférico	400	+	Prototipo	-

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1, se muestra una comparativa de los proyectos y productos más sobresalientes sobre interfaces hápticas.

Cyberglove, consiste de un sistema de retroalimentación táctil creado por la empresa Virtual Technologies Inc., constituido por pequeños vibradores para generar sensaciones emulando texturas mediante diferentes frecuencias, pero que dejan de lado la retroalimentación de fuerza y con ello, la posibilidad de identificar contornos (Cyberglove Systems, 2015). Por otro lado, la retroalimentación propioceptiva donde la posición del usuario es crucial, se ha utilizado en productos como Leap motion, un dispositivo creado por Leap Motion Inc. que localiza el movimiento en los dedos y manos utilizando tecnología infrarroja, lo que limita a su vez el espacio de trabajo e imposibilita la retroalimentación háptica.

Por su parte PHANTOM, consiste en un brazo robótico que transmite retroalimentación de fuerza, al oponer resistencia al movimiento mediante el uso de motores de CD, pero sólo en un punto, es decir no posee movimiento independiente en los dedos (Massie, 1994).

Por otro lado, Rice University, en su proyecto HANDS OMNI utilizó micro cámaras de aire para bloquear las coyunturas de los dedos y así bloquear el movimiento, pero además de ser invasivo, la infraestructura necesaria para generar el aire a presión encarece el sistema y dificulta su utilización.

Así mismo, la empresa mexicana Vivoxie con el desarrollo de PowerClaw, se centra en propiedades mecánicas de los objetos virtuales, como la temperatura y rugosidad, ya que su interfaz solo posibilita estas sensaciones, dejando a un lado también la retroalimentación de fuerza.

Mientras que Dexmo, un desarrollo de Dexa Robotics, ha presentado un guante háptico tipo exoesqueleto que cubre la mano y muñeca centrándose en la retroalimentación de fuerza, gracias a que es un dispositivo con estructura mecánica promete brindar una sensación de agarre muy parecida a la realidad; sin embargo, su producto aún no está disponible ya que sigue en fase de desarrollo (Gu *et al.*, 2016).

Por lo anteriormente mencionado, esta investigación presenta una alternativa con el objetivo de introducir la retroalimentación de fuerza mediante un exoesqueleto mecatrónico para la captura y control de movimiento independiente en cada uno de los dedos, con el uso de tecnologías comerciales y de fácil acceso, como la impresión 3D, servomotores y giroscopios, para generar un prototipo funcional de una interfaz háptica de retroalimentación de fuerza para emular el sentido del tacto en los entornos de VR.

Actualmente diversos dispositivos han empleado diferentes formas de retroalimentación háptica para su inclusión en entornos virtuales; no obstante, la mayoría está limitada a vibradores y sensores térmicos con retroalimentación táctil. Tal es el caso de *Cybertouch* que consiste en un sistema de retroalimentación táctil

creado por la empresa Virtual Thecnologies Inc. configurado por pequeños vibradores que generan sensaciones para emular pulsos y texturas; o bien con retroalimentación propioceptiva donde la posición del usuario es crucial. Ejemplo de esto, es *Leap motion*, un dispositivo creado por Leap Motion Inc. que soporta movimiento en los dedos y manos como entrada, utilizando tecnología infrarroja para generar *hand tracking*; sin embargo, se ha dejado de lado la retroalimentación de fuerza, por la cual, la manipulación de objetos es posible.

Asimismo, la correcta sincronización del movimiento y la respuesta de retroalimentación (*hand tracking*) juega un papel crucial en los entornos de VR, ya que, influye en el realismo de la sensación emulada sin importar la fidelidad sensorial con que el dispositivo pueda reproducirla (Mihelj *et al.*, 1999).

Una alternativa para solucionar el tema del *hand tracking*, es el uso de algoritmos de subdivisión espacial jerárquica (Stenger, Thayananthan, Torr, & Cipolla, 2006) o el método de cálculo de distancia incremental (Prisacariu & Reid, 2012); mismos que han mostrado ser efectivos en aplicaciones análogas eliminando los problemas de oclusión que la visión estereoscópica utilizada por los *head mounted display* puede llegar a presentar al momento de identificar múltiples objetos.

Por otro lado, la renderización de fuerzas es el proceso para transmitir una sensación táctil mediante la implementación de una sucesión de vectores de fuerza al dispositivo háptico causada por la interacción y modificación dinámica que ocurre entre los objetos virtuales presentes en la escena y el cuerpo representado por la interfaz. Dependiendo de la conformación física del dispositivo y de la representación del modelo háptico en el entorno, los métodos para calcular dichos vectores de fuerza varían.

Una vez, que el dispositivo ha sido representado en el entorno; el análisis y la aplicación de los vectores de fuerzas se pueden expresar en tiempo, dependiendo del movimiento o en combinación de ambos (SensAble Technologies, 2008).

La respuesta entregada por estos cálculos es leída e inscrita mediante señales digitales y analógicas que se comunican entre sí, es decir, la información captada por los sensores para el posicionamiento, los vectores resultantes del cálculo de los

algoritmos y las salidas para activar los actuadores que limitarán el movimiento. Dichas señales tienen que ser procesadas y acondicionadas para su correcto funcionamiento; para lograr esto, es necesario el uso de procesadores, microprocesadores, periféricos electrónicos y protocolos de comunicación responsables de su interacción.

# Capítulo 4

## Metodología

El presente estudio es mixto, ya que, conjunta elementos de carácter cualitativo como usabilidad, sentido de inmersión y presencia de los usuarios; así como, cuantitativo en el manejo de parámetros y variables de control para generar los algoritmos pertinentes para la captura de movimiento y los vectores de fuerza de la retroalimentación háptica. Por la naturaleza de la investigación, el trabajo está dividido en cinco etapas basadas en la metodología del Design Thinking (DT) propuestas por Tim Brown, CEO de la consultoría de diseño IDEO (Brown, 2009).

### 4.1 Design Thinking

El *design thinking* o pensamiento de diseño es una metodología de gran utilidad, y cada vez es más utilizada por las organizaciones para el desarrollo de productos y servicios exitosos e innovadores; los cuales, se basan en el conocimiento de los usuarios y la formación de equipos multidisciplinarios que ofrezcan diversos puntos de vista durante el proceso de diseño. Ya que, por definición, esta metodología lleva implícita la necesidad de observar a los usuarios con el objetivo de buscar soluciones que se centren en ellos.

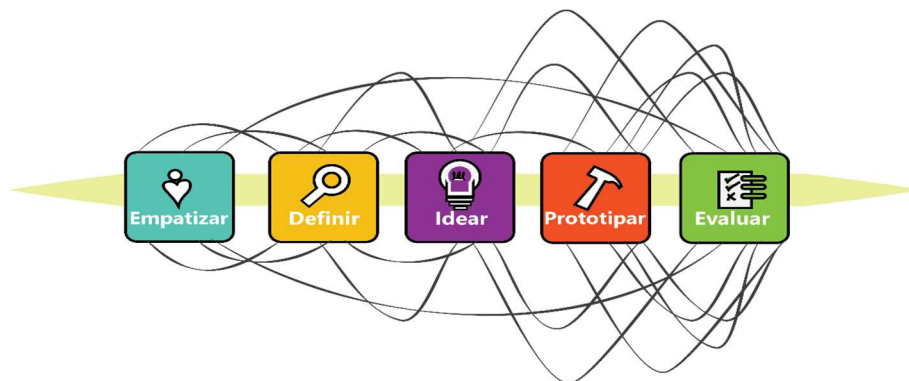


Fig. 9: Metodología Design Thinking de cinco pasos de (Brown, 2009) .

Fuente: Elaboración propia basada en Design Thinkking en Español,

<http://www.designthinking.es/inicio/index.php>.

Como se muestra en la figura 9, esta metodología no es lineal sino iterativa, es decir, en cualquier momento se puede avanzar o retroceder dependiendo de cómo el mismo proceso lo dictamine, e incluso se pueden saltar etapas, ya que aunque se propone un orden, dicha metodología, da la libertad de movimiento a través de ella (Plattner, Meinel, & Leifer, 2011).

## **4.2 Enfoque del Design Thinking para la innovación**

Las nuevas, rápidas y cambiantes tendencias en los mercados, así como, la competencia han obligado a las empresas y compañías a desarrollar productos y servicios innovadores como respuesta. Es por ello que, el DT ha sido adoptado como método generador de ideas innovadoras para los problemas que diseñadores y no diseñadores enfrentan hoy en día (Seidel & Fixson, 2013).

Ya que, el carácter multidisciplinario que presenta, es un punto clave para favorecer la innovación, pues es el resultado de un proceso en donde múltiples actores se complementan con la contribución de sus distintas capacidades (Harhoff, Henkel, & Von Hippel, 2003). Además, los equipos multidisciplinarios mejoran el rendimiento del mismo equipo (West *et al.*, 2003), ya que, presentan un pensamiento divergente y convergente, donde primero amplían su mente, generando múltiples ideas para el área del problema y promoviendo la creatividad. Al mismo tiempo, el intercambio de experiencias adquiridas hace un balance del equipo de trabajo en la interpretación de la información, resultando en la correcta definición del problema real (Brown, 2009). Debido a que el proceso de innovación requiere poner las ideas en acciones, se adopta un pensamiento convergente identificando la solución con mayor impacto y llevándola a su implementación (Gurteen, 1998).



### 4.3 Funcionamiento del Design Thinking

Se comienza por recolectar gran cantidad de información mediante diferentes herramientas tales como mapa de empatía, observación en cubierta, mapa de actores, entre otras; con el fin de tener un mayor conocimiento de las necesidades del usuario que interactúa directa e indirectamente en la solución que se está desarrollando y se conoce como **fase de empatía**.

Posteriormente pasamos a la **fase de definición**, donde se analiza la información recopilada en la fase anterior para determinar cuál es útil y cuál puede ser desechada; con base en ella, se define el problema o serie de problemas, cuya solución o soluciones serán la clave para la resolución de nuestro problema global.

A continuación, la **fase de idear**, consta de generar una gran cantidad de ideas creativas para cubrir los problemas definidos en la etapa anterior con el objetivo de no encasillarse en una sola idea, sino más bien, contemplar todas las posibilidades de solución aplicando el principio de innovación “piensa fuera de la caja”.

Al mismo tiempo que se generan las ideas, se hacen prototipos rápidos, dando pie a la siguiente fase, **prototipar**, con la finalidad de hacer real y palpable nuestra propuesta de solución y así visualizarla de manera sencilla eliminando los posibles problemas en la transmisión de ideas que en equipos multidisciplinarios se presentan, es decir, comunicar dicha idea de manera rápida pero clara y precisa.

Finalmente, en la **fase de evaluación**, el prototipo es validado y probado por el usuario con el objetivo de generar toda la retroalimentación posible para lograr mejoras significativas de la idea o para desecharla y continuar con el desarrollo de otra propuesta.

En esencia, como se muestra en la figura 10, el Design Thinking consta de un análisis iterativo que va de lo divergente a lo convergente para encontrar soluciones particulares a problemas claramente definidos tras comprender al usuario y su entorno generando insights al empatizar con él (Plattner *et al.*, 2011).

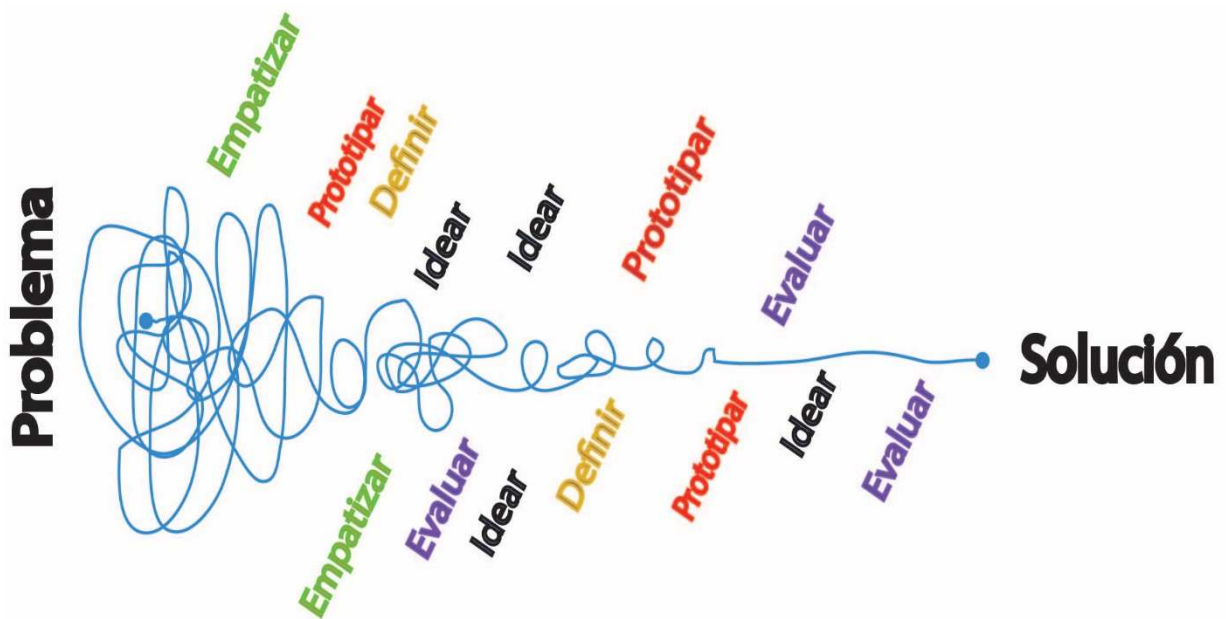


Fig. 10: Descripción grafica de funcionamiento del Design Thinking, de lo divergente a lo convergente.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.4 Técnicas y herramientas del Design Thinking

Como se menciona, el DT se compone de cinco etapas; cada una de ellas hace uso de distintas herramientas para cumplir con el objetivo de cada fase, ya sea recabar información, generar ideas creativas, analizar la información, entre otras. Estas herramientas son muy diversas y pueden ser de carácter cuantitativo y cualitativo, predominando las últimas y con alto contenido visual más que teórico. A continuación se describen las utilizadas en este proceso de investigación.

### 4.4.1 Observación encubierta

Es una técnica derivada de la tecnologías de la información para probar un producto o servicio y consiste en la observación del usuario cuando se encuentra

interactuando con algún objeto, producto o prototipo, sin revelar la presencia del evaluador; es decir, sin que el usuario sepa que está siendo evaluado. Se utiliza usualmente en la fase de empatía para obtención de información de carácter objetivo al no interferir con usuario dejando a un lado cualquier tipo de influencia sobre éste.

#### **4.4.2 Mapa de Empatía**

Es una herramienta que se utiliza para tener una mayor comprensión del usuario, y puede representar a diversos grupos de usuarios o segmentos de mercado. Consiste en la organización de la información recopilada en una entrevista con preguntas clave para entender al usuario a través de quién es (Gray, 2010). Algunos ejemplos de interrogantes son:

- ¿Quiénes son?
- ¿Qué hace?
- ¿En dónde pasan su tiempo?
- ¿Quiénes son sus amigos?
- ¿Qué opiniones influyen en él?
- ¿Cuáles son sus creencias?

Además de las respuestas dadas a estas preguntas, es importante resaltar que algunos de los pensamientos, creencias y sentimientos no pueden ser percibidas directamente; por lo que, tienen que ser inferidas por una cuidadosa observación en el comportamiento del usuario, lenguaje corporal, tono de voz, selección de palabras, entre otras. En la figura 11 podemos observar un ejemplo de cómo se organiza la información.

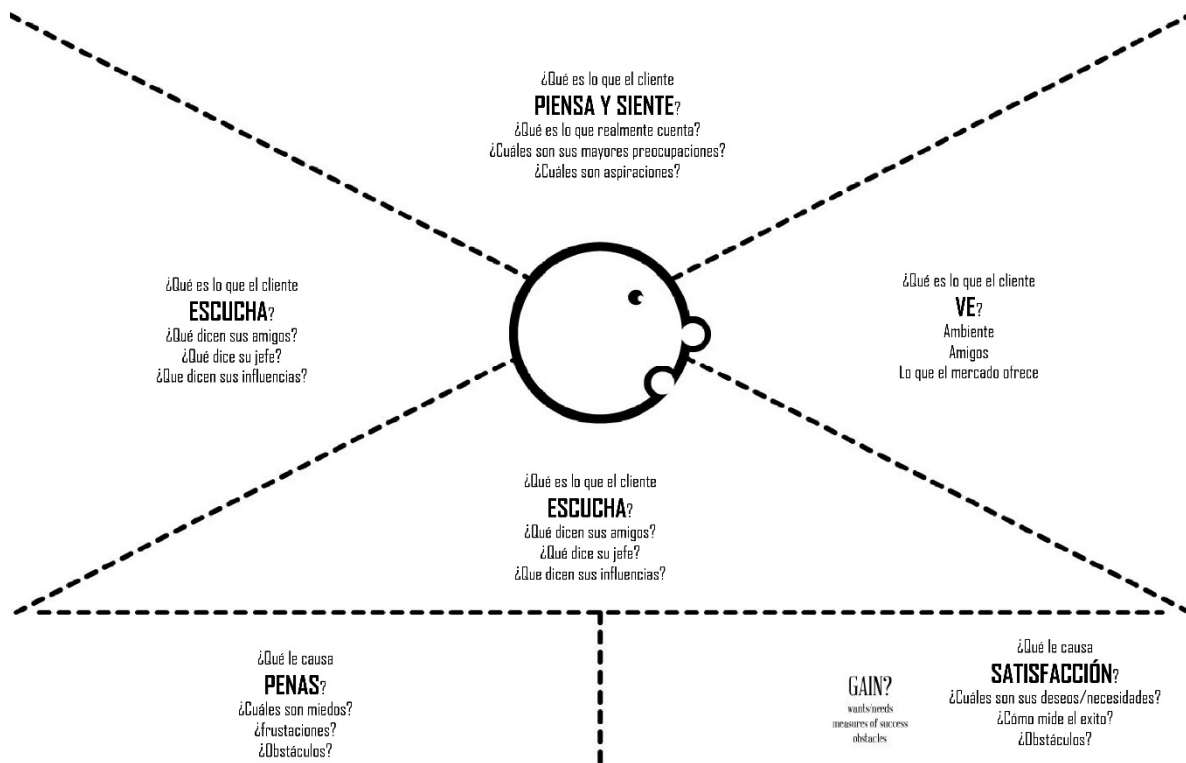


Fig. 11 Plantilla de Mapa de Empatía.

Fuente: Elaboración propia basada en modelo de Gray (Gray, 2010).

### 4.4.3 Los 5 Porqué

Consiste en hacer una serie de repeticiones de la pregunta ¿Por qué?, donde la respuesta del primer cuestionamiento es utilizado para formular la siguiente pregunta y así sucesivamente. Es una técnica sencilla con poca dificultad de aplicación, pero empleada correctamente genera buenos resultados para encontrar la causa raíz de un problema. Si bien el nombre de la técnica emplea el número cinco, el número de preguntas “¿por qué?” no es fijo, ya que, el proceso iterativo de pregunta y respuesta se puede repetir tantas veces como sea necesario, pero de acuerdo a la experiencia, el quinto porqué es suficiente para encontrar la raíz de un problema (Myszewski, 2013).

Esta técnica se utilizó por primera vez por la empresa Toyota durante la evolución de sus metodologías de calidad y manufactura, se emplea en el ámbito industrial como herramienta para *problem solving* (Myszewski, 2013). El DT la aplica en la etapa de empatizar y de idear, con el objetivo de obtener una comprensión más profunda del problema y analizar las ideas generadas.

#### **4.4.4 Brainstorming**

Es una de las técnicas más antiguas empleadas para la generación de ideas, ya que, a pesar de que fue publicada por su creador Alex Osborn en 1954 (Gobble, 2014) fue utilizada desde la década de los 30 y sigue vigente hoy en día. Consiste en la generación de ideas aleatoriamente en una sesión de trabajo con los miembros del equipo, en donde cualquier propuesta es bienvenida, porque su objetivo final es generar el mayor número de ideas posible, para tener una perspectiva amplia y diversa de la posible solución.

Para el correcto uso de esta técnica existen cuatro reglas básicas (Gobble, 2014):

- **Eliminar el juicio**, es decir, suspender toda crítica en el momento en que las ideas surgen, cualquier idea es válida y su evaluación se reservará a *posteriori*.
- **Pensar Librementemente**, es importante dejar volar la imaginación, ya que, si bien algunas ideas pudieran parecer poco prácticas o irrealizables, éstas aportan información importante en distintos factores y variables que afectan al problema.
- **Cantidad**, entre más ideas se generen es mejor y no es necesario detenerse a detallar una idea, si no buscar todas las alternativas posibles para vislumbrar hasta el más pequeño aspecto que pueda generar una posible solución. Posteriormente, se trabajará detalladamente en las ideas que resulten las mejores opciones.
- **Efecto multiplicador**, no solo las ideas propuestas son útiles, sino la combinación de ellas. Una idea puede perfeccionar a otra y esta a su vez

puede ser el complemento de la suma de otras distintas. Al final, la idea seleccionada estará conformada por la suma de todas, haciéndola más profunda, una vez considerados todos los aspectos necesarios.

#### **4.4.5 Prototipado rápido**

El prototipado rápido es la materialización de las ideas y conceptos en modelos para poner a prueba la interacción de éstos con el usuario.

Estos prototipos no tienen que ser funcionales o detallados, ni siquiera estéticos; ya que, el objetivo de esta técnica es comunicar de manera rápida y efectiva una idea o propuesta al usuario y personas involucradas con el proyecto (Chasanidou, Alassandro, & Lee, 2015). Generalmente, se utilizan materiales como plastilina, papel, cinta adhesiva o cualquier elemento que se tenga al alcance; sin embargo, se utilizan también tecnologías más avanzadas como la impresión 3D o el uso de elementos básicos de electrónica. Lo más importante, es la retroalimentación que se genera al evaluar las ideas de manera rápida, al esclarecer las limitaciones y bondades del concepto, permitiendo hacer mejoras e identificar nuevas oportunidades.

#### **4.5 Descripción del sujeto de Estudio**

La validación del proyecto se llevará a cabo por una serie de entrevistas de control a dos grupos de 25 personas escogidas al azar y mayores de edad, mismas que serán previamente informadas del proyecto, su participación en éste y se les entregará un consentimiento informado de aceptación (Anexo I).

#### **4.6 Diseño de experimento**

El sujeto de estudio será sometido al uso de un sistema de VR (visor de con visión estereoscópica, audio 360° y entorno de simulación virtual), con el cual

probaran que tan inmersos se sienten en el sistema, sólo con la inclusión de los sentidos de la vista y el audio. Posteriormente, se les entregarán los cuestionarios PQ (Presence Questionnaire) e inmersión ITQ (Immersive Tendencies Questionnaire) propuestos por Witmer y Singer (Anexo II y III) (Witmer & Singer, 1998).

Después del llenado de los cuestionarios, el sujeto de estudio será sometido nuevamente al sistema virtual, esta vez, agregando la interfaz háptica propuesta para la inclusión de un tercer sentido (tacto). Se correrá una aplicación para elaborar tareas cotidianas donde el uso de las manos es necesario para evaluar la efectividad de la interfaz así como el grado de inmersión que se brinde al usuario.

Paralelamente, otro grupo de 25 sujetos también previamente informados, se someterán al segundo experimento, donde únicamente tendrán la experiencia completa (visor estereoscópico, audio 360°, interfaz háptica propuesta y ambiente virtual simulado) sin pasar por el primer experimento, con la finalidad, de eliminar el conocimiento previo del sistema y evaluar la reacción del primer acercamiento. A los dos grupos se les aplicarán los cuestionarios PQ e ITQ (Anexo II y III).

La participación de los individuos en el experimento es exclusivamente para medir sus reacciones y su participación será anónima. Al mismo tiempo, por ser un experimento controlado y de prueba de uso y reacción al producto, el usuario no correrá ningún riesgo ni actividad que comprometa su bienestar físico y mental.

Además, de los cuestionarios de presencia y de tendencias inmersivas, se propone un lista de preguntas que prueben las distintas fases del sistema, con el fin de evaluar, el uso de la interfaz propuesta sin visión ni audio, para determinar si el usuario es capaz de distinguir la forma de los objetos simulados en el mundo virtual, valiéndose exclusivamente de la sensación táctil que el dispositivo háptico le proporcione.

## 4.7 Variables a evaluar

Existe una relación directamente proporcional entre el estado de presencia (físico y mental) y la inmersión del usuario en el sistema de RV (figura 12(Mihelj & Podobnik, 2012). Esto se debe, en primer lugar a que una mayor cantidad de estímulos sensoriales brinda un estado de presencia mental superior, y en segundo, como define Slater un sistema tecnológico más sofisticado, en términos de eficiencia y efectividad de transmisión de información, automáticamente posee un grado de mayor inmersión física (Slater, 2003).

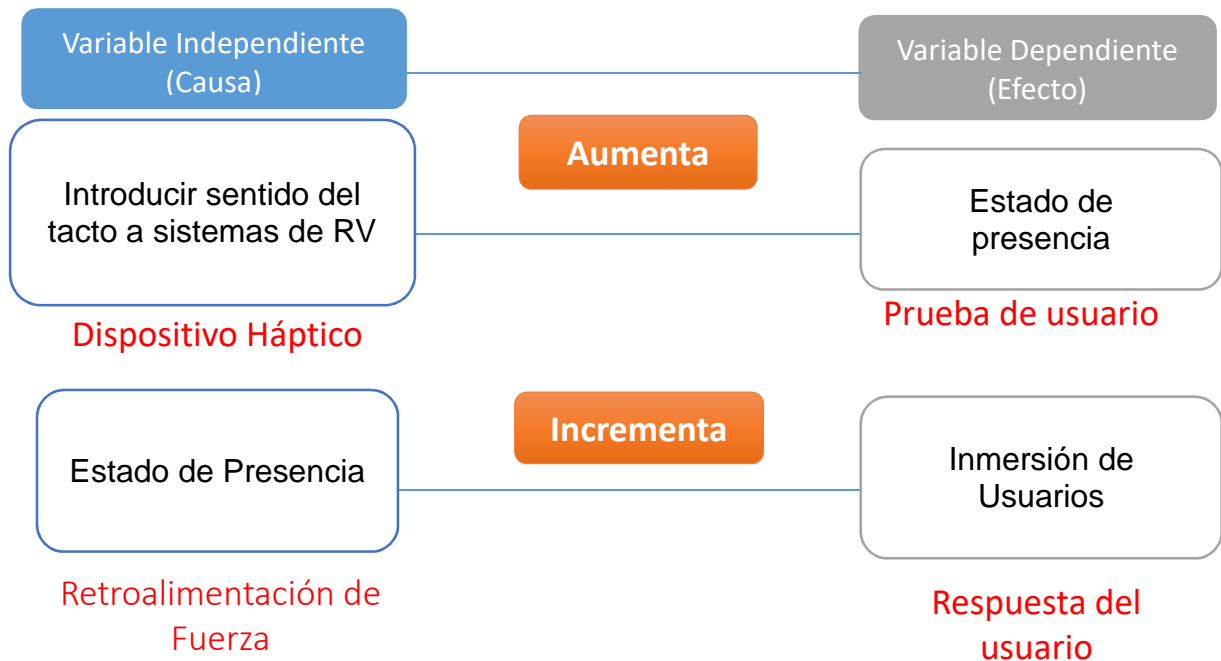


Fig. 12 Relación de variables causa - efecto

Fuente: Elaboración propia



## 4.8 Análisis de la información

Los cuestionarios PQ y ITQ (Witmer & Singer, 1998) consisten en una serie de ítems que utilizan la escala de Likert de 1 a 7, del menor valor en aceptación a un nivel de satisfacción total (Sullivan & Artino, 2013), para evaluar los diversos factores que influyen en el estado de presencia que el usuario experimenta durante su interacción con un entorno virtual.

Como se enlistan en la tabla 2, en estos cuestionarios encontramos cuatro grupos de factores que afectan el sentido de presencia.

Tabla 2: Comparativa de sistemas hápticos existentes.

<b>Factores de Control</b>	<b>Factores de Sensado</b>	<b>Factores de Distracción</b>	<b>Factores de Realismo</b>
<b>Grados de control</b>	Modalidad de sensado	Aislamiento	Realismo de la escena
<b>Inmediatez de control</b>	Riqueza del entorno	Atención selectiva	Información consistente con el mundo real
<b>Anticipación de eventos</b>	Presentación multimodal	Conocimiento de la interfaz	Significado de la experiencia
<b>Modos de control</b>	Consistencias de la información multimodal		Ansiedad / desorientación
<b>Modificabilidad del entorno físico</b>	Grado de percepción del movimiento		

Fuente: elaboración propia basada en Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire (Witmer & Singer, 1998).

Por su parte, el PQ (Presence Questionnaire), a través de 24 ítems basados en estos factores, evalúa la experiencia de presencia individual como respuesta a un sistema de RV propuesto, con inclusión o no háptica.

Por otro lado, el ITQ (Immersive Tendencies Questionnaire), a través de 18 ítems, mide el grado de concentración y de adentramiento del usuario en actividades

comunes. Un alto grado de involucramiento puede resultar en un nivel superior de inmersión en el sistema virtual, ya que, el usuario en cuestión posee mayores tendencias de inmersividad (Witmer & Singer, 1998).

Una vez aplicados los cuestionarios y obtenidas las puntuaciones, mediante el uso de métodos estadísticos se evaluarán su distribución de frecuencias, medidas de tendencia central, medidas de variabilidad; así como, análisis paramétrico con el fin de describir el fenómeno e inferir si existe o no correlación entre los usuarios con tendencias inmersivas y aquellos que presentan un mayor estado de presencia. Con el objetivo de validar si al introducir un nuevo canal perceptivo se aumenta la inmersión y en consecuencia, el estado de presencia en el usuario.

# Capítulo 5

## Resultados y conclusiones

### 5.1 Aplicación del Design Thinking

En esta investigación se utiliza la metodología del Design Thinking , enfatizando las fases de empatizar, prototipado y validación; con el fin de generar una estructura mecánica tipo exoesqueleto para la mano y emular el movimiento natural de la misma, generando un mecanismo más real para la limitación del movimiento.

En figura 13 se observa cada una de las etapas de la metodología empleada, así como, las diferentes herramientas y resultados obtenidos para el concepto final de la interfaz háptica.

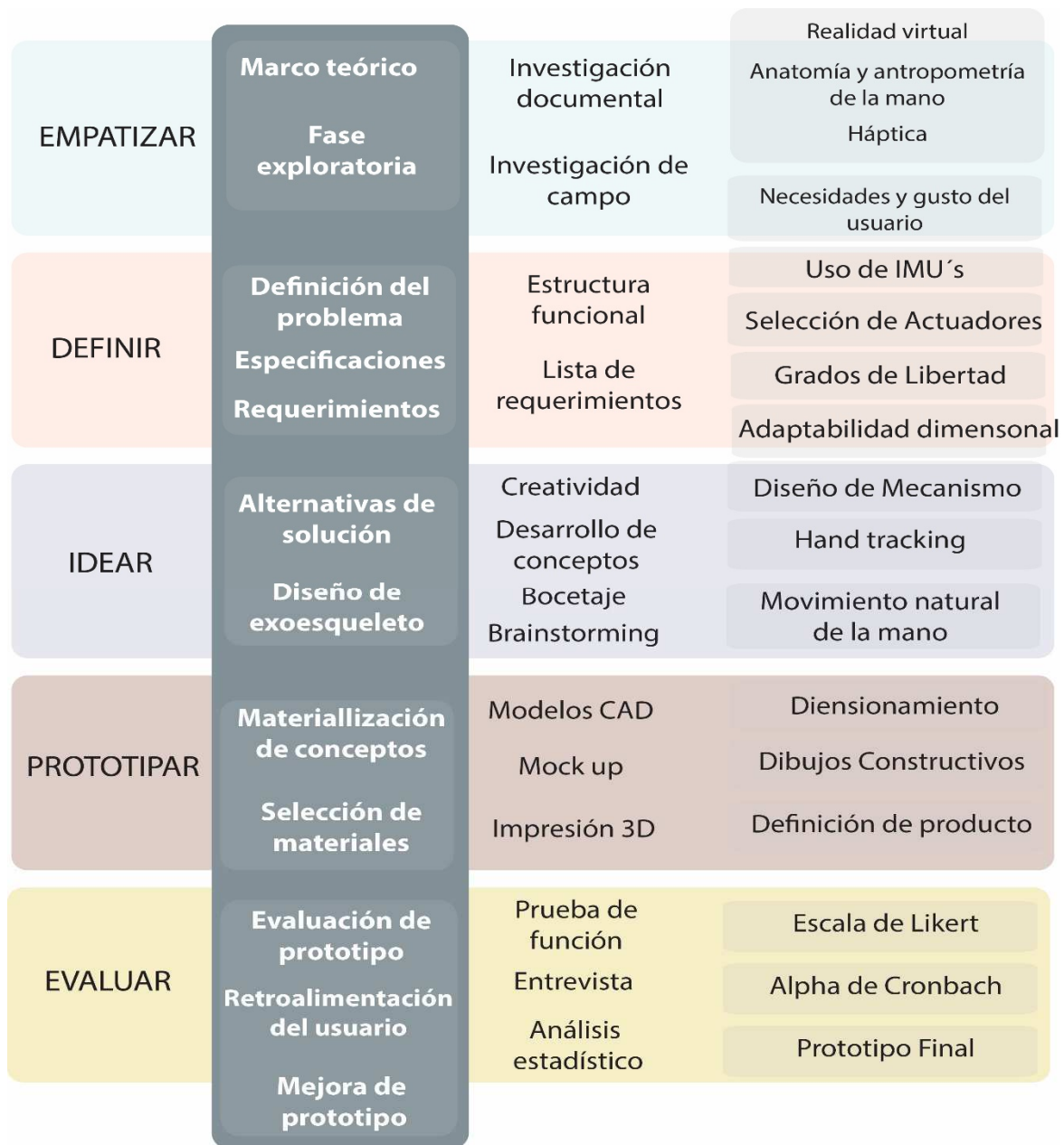


Fig. 13: Design Thinking aplicado al desarrollo de una interfaz háptica.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Empatizar

Durante las distintas exhibiciones del Rifado Estudio (empresa incubada en la Universidad Autónoma de Querétaro enfocada al desarrollo de simuladores y aplicaciones inmersivas de VR), en el ámbito local en muestras tecnológicas como EXPOCYTEQ 2016 (Exposición de ciencia y tecnología del estado de Querétaro) e internacional como GAMESCOM 2016 (convención europea de videojuegos y desarrolladores) situada en Alemania, se evaluaron a usuarios de VR para conocer sus necesidades y comentarios por medio de entrevistas PQ (*Presence Questionnaire*) e inmersión ITQ (*Immersive Tendencies Questionnaire*) (Witmer & Singer, 1998) así como observación en cubierta (figura 14). Asimismo, se les propuso a los usuarios, la introducción de un dispositivo háptico para el uso activo de manos y se recopiló las opiniones e información obtenida.



Fig. 14: Etapa de empatizar con el usuario.

Fuente: fotografías propias.



Como se observa en la tabla 3, el ítem 23 y 24 no aplican, ya que, no se contaba con estímulos hápticos.

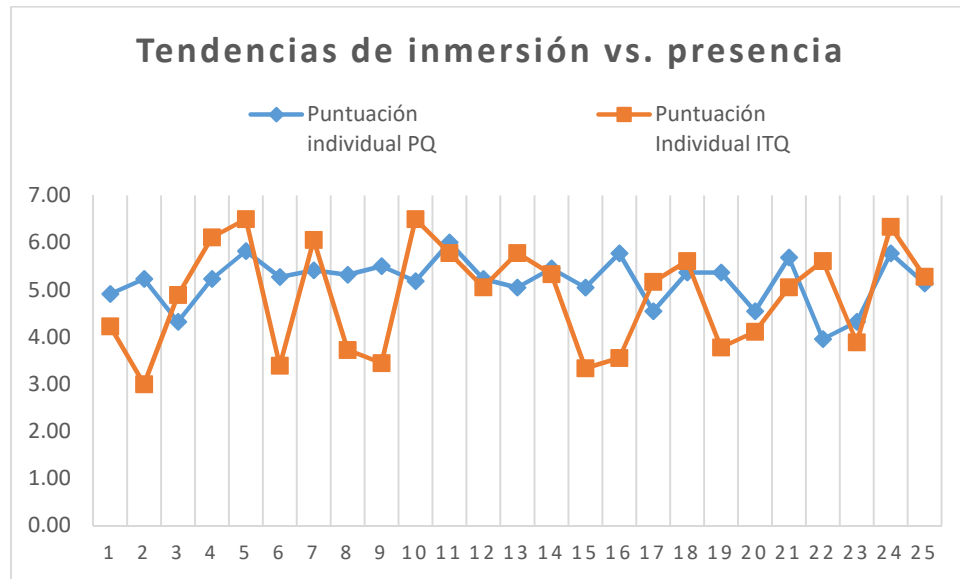
Una vez calculado los totales de cada sujeto así como su puntuación individual (ver tabla 4), se generó una gráfica de líneas y marcadores para observar la tendencia de la aceptación de los sujetos.

Tabla 4: Cálculo de totales y puntuación individual de los cuestionarios ITQ y PQ.

SUJETO	TOTAL PQ	PUNTAJÓN	TOTAL ITQ	PUNTAJÓN
		INDIVIDUAL		INDIVIDUAL
		PQ		ITQ
1	108	4.91	76	4.22
2	115	5.23	54	3.00
3	95	4.32	88	4.89
4	115	5.23	110	6.11
5	128	5.82	117	6.50
6	116	5.27	61	3.39
7	119	5.41	109	6.06
8	117	5.32	67	3.72
9	121	5.50	62	3.44
10	114	5.18	117	6.50
11	132	6.00	104	5.78
12	115	5.23	91	5.06
13	111	5.05	104	5.78
14	120	5.45	96	5.33
15	111	5.05	60	3.33
16	127	5.77	64	3.56
17	100	4.55	93	5.17
18	118	5.36	101	5.61
19	118	5.36	68	3.78
20	100	4.55	74	4.11
21	125	5.68	91	5.06
22	87	3.95	101	5.61
23	95	4.32	70	3.89
24	127	5.77	114	6.33
25	113	5.14	95	5.28

Fuente: Elaboración propia en MS Excel

En la gráfica 1 se muestra que los sujetos con mayor grado de estado de presencia también son los que tienen mayor facilidad de inmersión, haciendo evidente la relación entre estas variables.



Gráfica 1: Tendencias de presencia e inmersión.

Fuente: Elaboración propia en MS Excel.

### 5.3 Definir

Posteriormente, a la fase de empatizar en la que se observó al usuario y su interacción con los entornos de VR, así como, conocer sus gustos, deseos y necesidades con respecto a su experiencia; es necesario establecer especificaciones y requerimientos, así como funciones para tener una mayor comprensión de lo que se necesita antes de generar ideas o alternativas de solución.



### 5.3.1 Lista de requerimientos

Los requerimientos (R) son aquellos aspectos necesarios que se deben de cumplir en todas las circunstancias, aunque también se incluyen deseos (D), los cuales agregan cierto valor a la propuesta pero que no son obligatorios de satisfacer. En la tabla 5 se muestran tanto deseos como requerimientos ordenados por concepto y con una breve descripción

Tabla 5: Lista de deseos y requerimientos.

ESPECIFICACIONES		
CONCEPTO	R/D	DESCRIPCIÓN
Dimensiones	R	Peso máximo de 450 g
	R	Espacio de trabajo no menor de 2m esféricos (cables de alimentación y control)
Energía	R	Alimentación eléctrica doméstica 110 VAC 60 Hz
Ergonomía	R	Ajuste de longitud de dedos $\pm 10$ mm.
Fabricación y Montaje	D	Modularidad de componentes
Función	R	Limitar el movimiento en los dedos con uso de actuadores.
	R	Detección de posición relativa en software
Material	R	Permitir la transpiración de la piel en la zona de la palma.
Señales y Control	R	Comunicación USB 2.0 o posterior
	R	Respuesta en tiempo real al ambiente virtual.
Uso	R	Cubrir superficie de cuatro dedos (índice, medio, anular y menique) y del pulgar de la mano para lograr movimiento de pinza con cada uno de ellos.
Vida Útil y Mantenimiento	D	Actualizable a versiones posteriores de software para posibles mejoras.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2 Estructura funcional

La estructura funcional nos proporciona una idea de las funciones básicas que la propuesta debe cumplir para alcanzar el objetivo propuesto (figura 15).

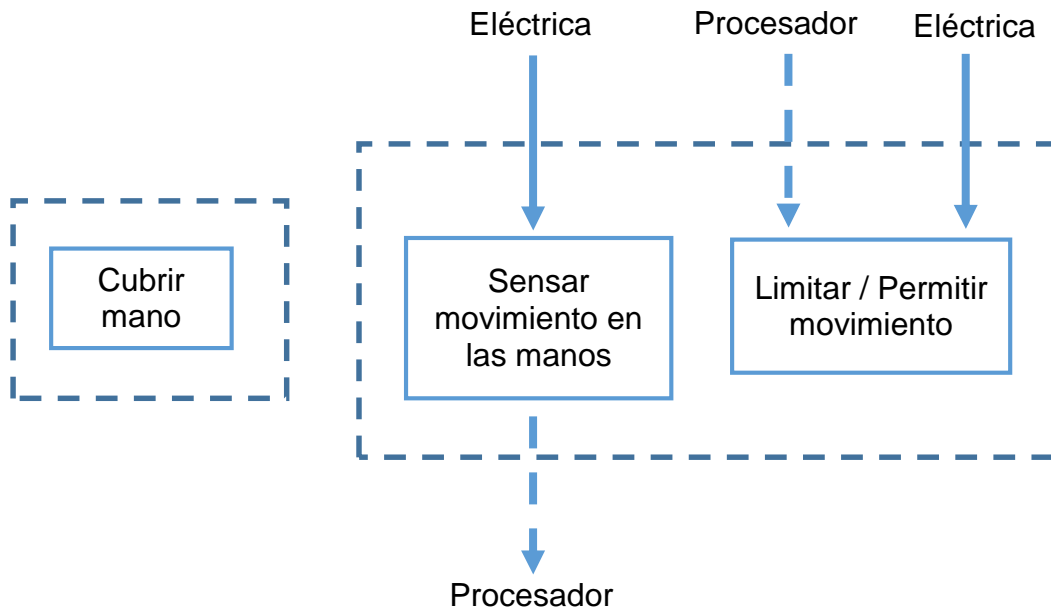


Fig. 15: Estructura funcional para dispositivo háptico.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.4 Idear

Una vez analizada la información y los requerimientos definidos, se realizaron sesiones de brainstorming, de grupos de enfoque y técnicas como los 5 porqué, con el fin de desarrollar diferentes bocetos de conceptos que definan propuestas del sistema de limitación de movimiento; algunos de ellos se describen a continuación.

El concepto 1 (figura 16) planteó el uso de hilos tensores unidos a anillos conectados a las yemas de los dedos y a las falanges proximales, estableciendo dos puntos de contacto en cada dedo con la finalidad de generar una sensación de limitación del movimiento completa. Mediante el uso de servomotores los hilos se

tensarían o extenderían según la interacción con los objetos, limitando o permitiendo el movimiento en los dedos según la proximidad al objeto.

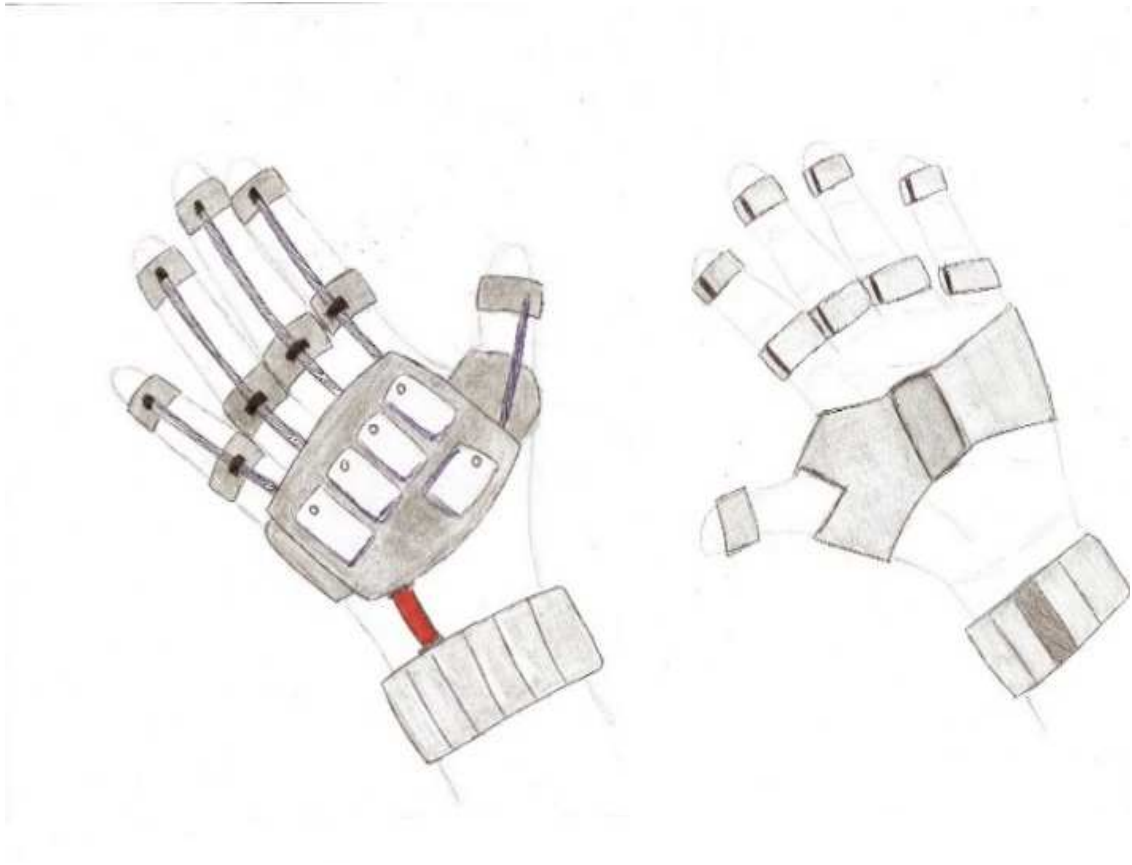


Fig. 16: Concepto 1, uso de sensores para limitación del movimiento.

Fuente: Boceto elaboración propia.

Por otro lado, el concepto 2 (figura 17), establece el uso de barras rígidas articuladas en un punto medio, conectadas en un extremo a un actuador electromecánico y por el otro, a un anillo situado en las yemas de los dedos, estableciendo un único punto de contacto responsable de la limitación del movimiento. En el caso del dedo índice se plantea el uso de dos actuadores para lograr los tres grados de libertad que componen el movimiento de esta extremidad permitiéndole un movimiento libre. Una vez accionados los actuadores, las barras al ser rígidas impedirían el movimiento

de cada dedo emulando el contacto con un objeto y permitiendo la interacción con éste.

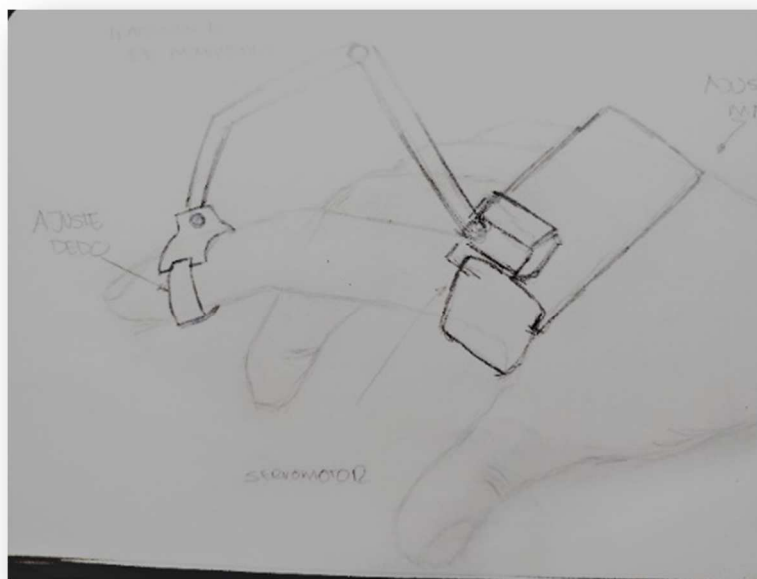
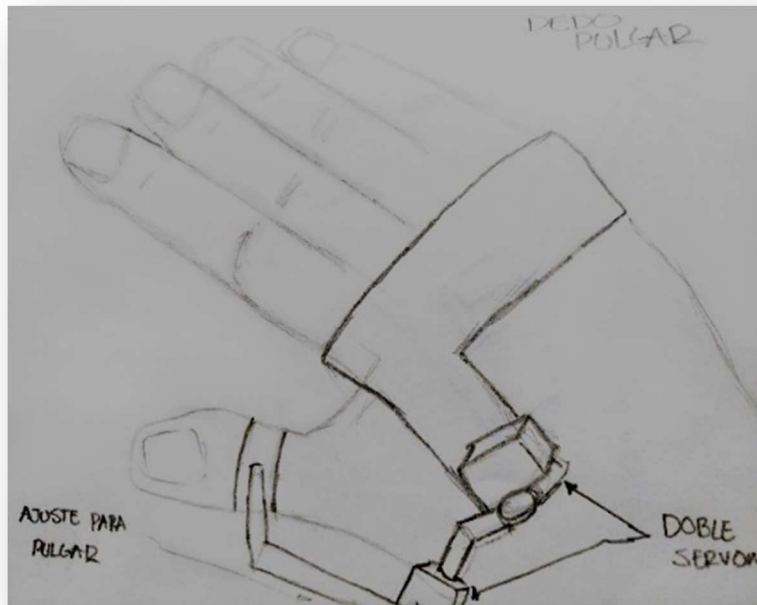


Fig. 17: Concepto 2, uso de servomotores y eslabones rígidos para limitación del movimiento.

Fuente: Boceto elaboración propia.

Posteriormente, en el concepto 3 (figura 18), se establece el uso de sensores flexibles y se retoma el uso de anillos en dos puntos, descritos en el concepto 1, con la finalidad de facilitar la tensión o extensión de los mismos para emular objetos flexibles. Se define una muñequera para un mayor soporte, así como para el alojamiento del sistema de control electrónico.

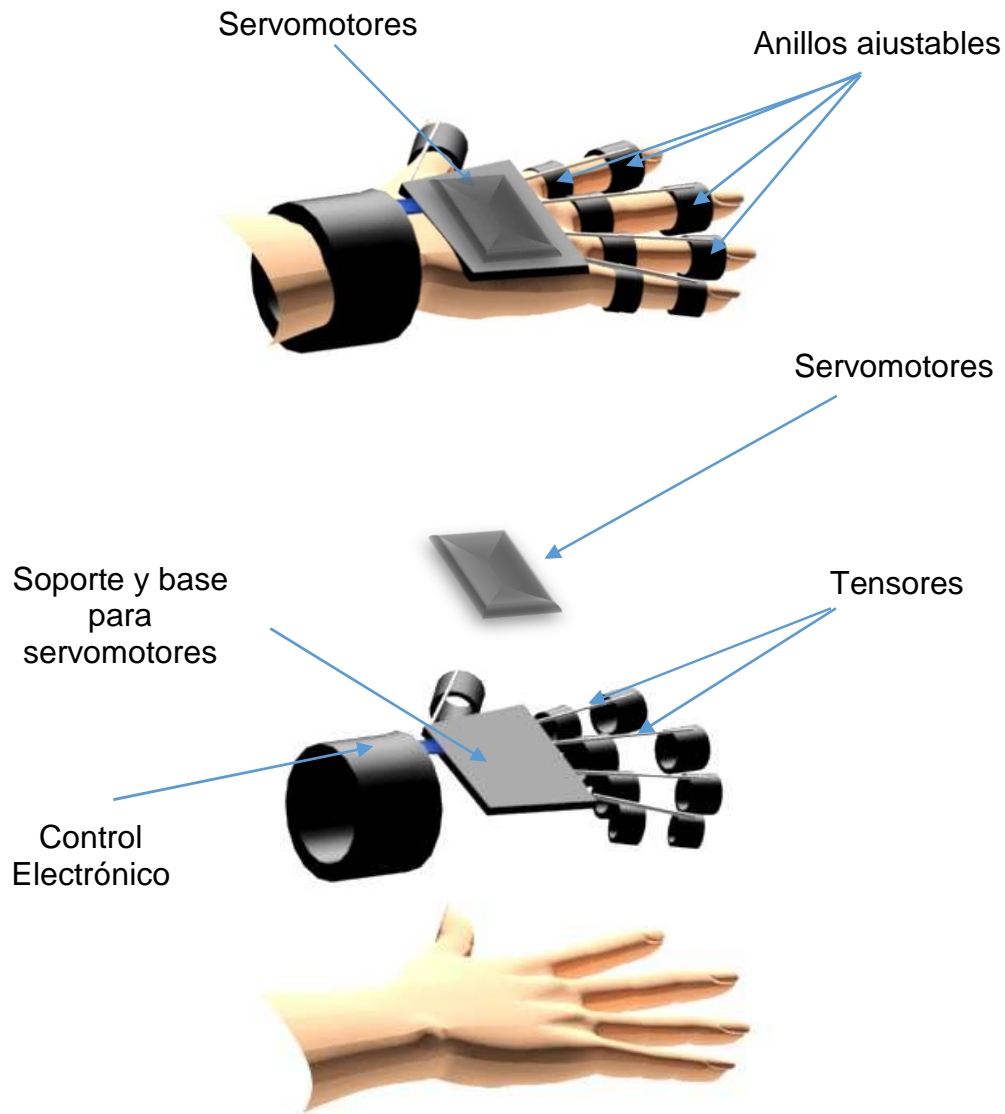


Fig. 18: Concepto 3, uso de sensores flexibles y servomotores para limitación de movimiento.

Fuente: Elaboración propia en 3Ds Max Studio.

## 5.5 Prototipar

Después de la sesión para generar ideas, conceptos y bocetos, el equipo de trabajo seleccionó los modelos más apegados a la resolución de los problemas que fueron encontrados, al analizar la información que el usuario proporcionó y se llevaron a la fase de prototipado. Se utilizaron técnicas de prototipado rápido y mock up para validar los conceptos y tener retroalimentación del usuario (figura 20), así como, herramientas de modelado en 3D con software CAD tales como, Solidworks, Rhinoceros 3D y 3Ds Max Studio y tecnologías como impresión 3D. En la figura 19 se pueden observar alguno de los prototipos generados.



Fig. 19 Prototipado rápido de concepto 1, para evaluar su funcionamiento.

Fuente: Fotografías propias.



Fig. 20: Prototipado rápido de conceptos de interfaz háptica.

Fuente: Fotografías y bocetos propios en Solidworks.

Estos prototipos se evaluaron con respecto a usabilidad, libertad de movimiento, estética y área de acoplamiento del sistema de control electrónico mediante la observación y entrevistas a los sujetos de prueba que representan al usuario final (figura 20).

### 5.5.1 Retroalimentación del usuario

Como resultado de las pruebas de usabilidad y ergonomía, así como de integración de sistema se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 6).

Tabla 6: Evaluación de conceptos en distintas categorías.

<i>Evaluación</i>	<i>Concepto 1</i>	<i>Concepto 2</i>	<i>Concepto 3</i>
<i>Usabilidad</i>	Buena, fácil movimiento de la mano y poco peso al utilizar tensores.	Libertad de movimiento en los dedos pero mecanismo moderadamente invasivo para el usuario.	Resistencia al movimiento por la naturaleza flexible de los tensores.
<i>Ajuste de talla</i>	Buena, tensión o extensión del sensor. Anillos ajustables.	Compleja, el ajuste debe calcularse para las distintas barras rígidas planteadas.	Buena, pero requiere mayor complejidad de control.
<i>Puntos de contacto con los dedos</i>	Buenas, dos puntos permiten una sensación buena de tacto.	Baja, un solo punto de contacto empobrece la sensación de tacto.	Buena sensación de tacto, dos puntos o más.
<i>Espacio de integración del sistema de control</i>	Limitado al requerir un mecanismo para la tensión o extensión del tensor.	Bueno por estar conectada la barra rígida directo con el actuador.	Limitado por requerir mecanismo extra, además de mayor complejidad de control
<i>Limitación del movimiento</i>	Poco efectiva ya que el tensor no limita el movimiento de forma natural	Buena pero carece de una limitación completa de la extremidad	Poco efectiva, limitación no natural.

Fuente: Elaboración propia.



Una vez revisada la retroalimentación se generaron los siguientes *insights* para el diseño estructural de la interfaz:

- Se requiere una estructura mecánica que posea dos o más puntos de contacto en los dedos para generar una sensación real de contacto con objetos.
- Es necesario el diseño de un mecanismo que siga el movimiento natural de los dedos para emular un agarre natural y con facilidad de actuación para limitación.
- El uso de servomotores unidos a eslabones rígidos favorece la limitación natural del movimiento pero dificulta la adaptabilidad para distintos tamaños.
- Una interfaz tipo exoesqueleto con barras rígidas permite un mayor espacio para el acoplamiento de los actuadores y control electrónico, ya que gran parte del mecanismo limitador se encuentra en los dedos.

## **5.6 Proceso de diseño de exoesqueleto**

Después de varias iteraciones del proceso de diseño basado en la metodología anteriormente descrita, se llegó a un concepto final.

El diseño del exoesqueleto consiste en un mecanismo de barras interconectadas que sigue el movimiento natural de la mano, mediante un eslabón curvo conectado al mecanismo en un extremo y al servomotor del otro, para seguir la trayectoria descrita por los dedos de las manos (figura 21).

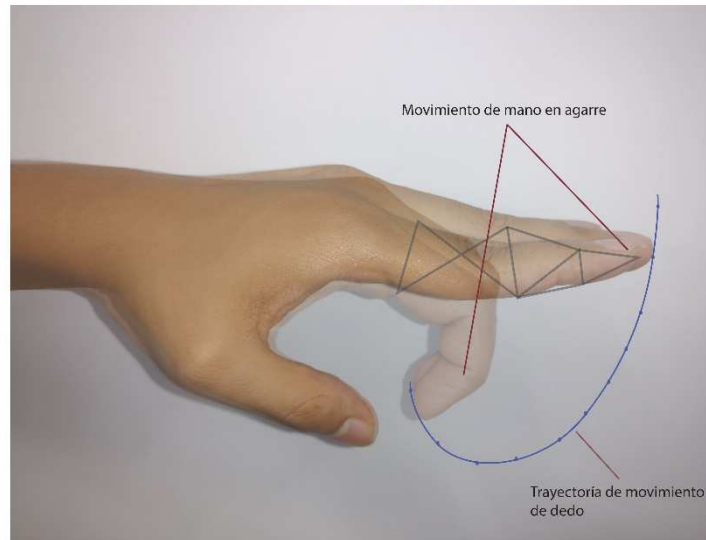


Fig. 21: Trayectoria de movimiento de los dedos en posición de agarre.

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular las distancias de las barras se propusieron tres tamaños estándar (chico, mediano y grande) basados en las medidas antropométricas de la norma DIN33 4022-2 (Anexo IV) para establecer el tamaño promedio de las manos, ya que, no hay estudios antropométricos oficiales en México. Las dimensiones planteadas en la norma se compararon con estudios de muestras latinoamericanas (Ávila, Prado, & Gonzáles, 2007), donde las dimensiones de la norma y los estudios coincidían en los percentiles del 5 y 95%, tomados como referencia para los tres tamaños propuestos.

Una vez establecidas las distancias y a través del estudio cinemático del mecanismo, se propuso la conformación mostrada en la figura 22. El mismo estudio se realizó también para el resto de los dedos con sus respectivas distancias y se montó el exoesqueleto completo (figura 23).

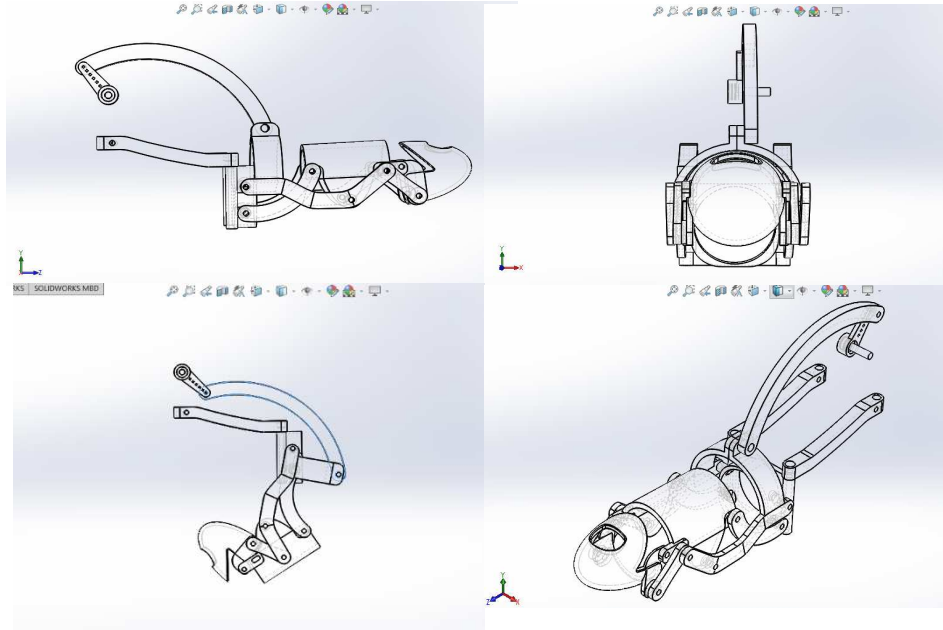


Fig. 22: Modelo 3D de dedo de mecanismo propuesto y estudio de movimiento en Solidworks.

Fuente: Elaboración propia en Solidworks .

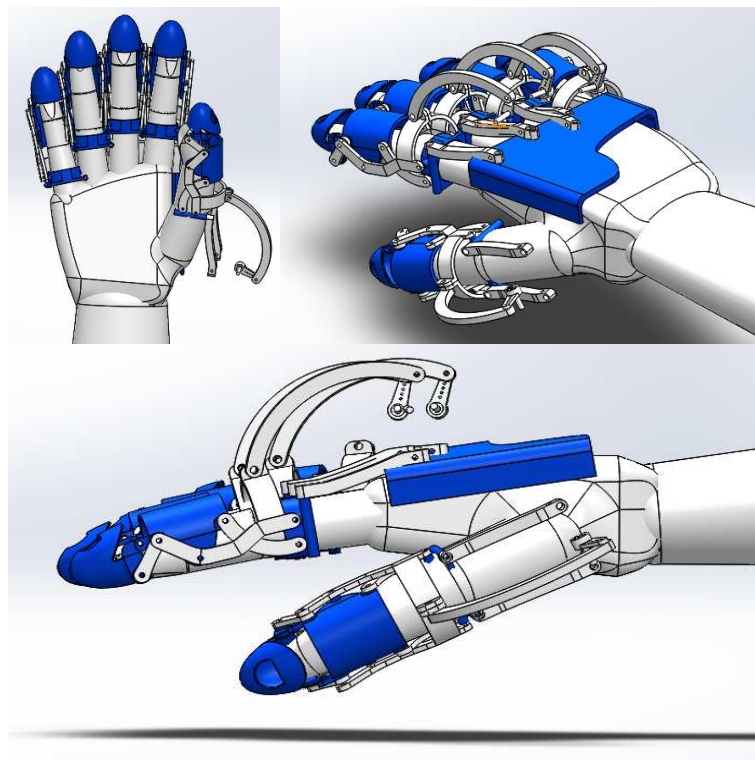


Fig. 23: Modelo de montaje de exoesqueleto mecánico en mano.

Fuente: Elaboración propia en Solidworks.

Mediante simulaciones en Solidworks, se validó el movimiento del mecanismo de barras para la transmisión del mismo para finalmente generar un concepto de diseño futurista, conforme a la expectativa del usuario. El concepto está basado en tendencias de ciencia ficción para generar un producto coherente con el mundo virtual y el sentido estético que la mayoría de los usuarios sugirieron en la fase de entrevistas. En la figura 24, se puede observar dicho concepto, así como la carcasa que recubrirá los servomotores y el control electrónico en Rhinoceros 3D. A su vez, en la figura 25 se muestran renders del concepto final del exoesqueleto.

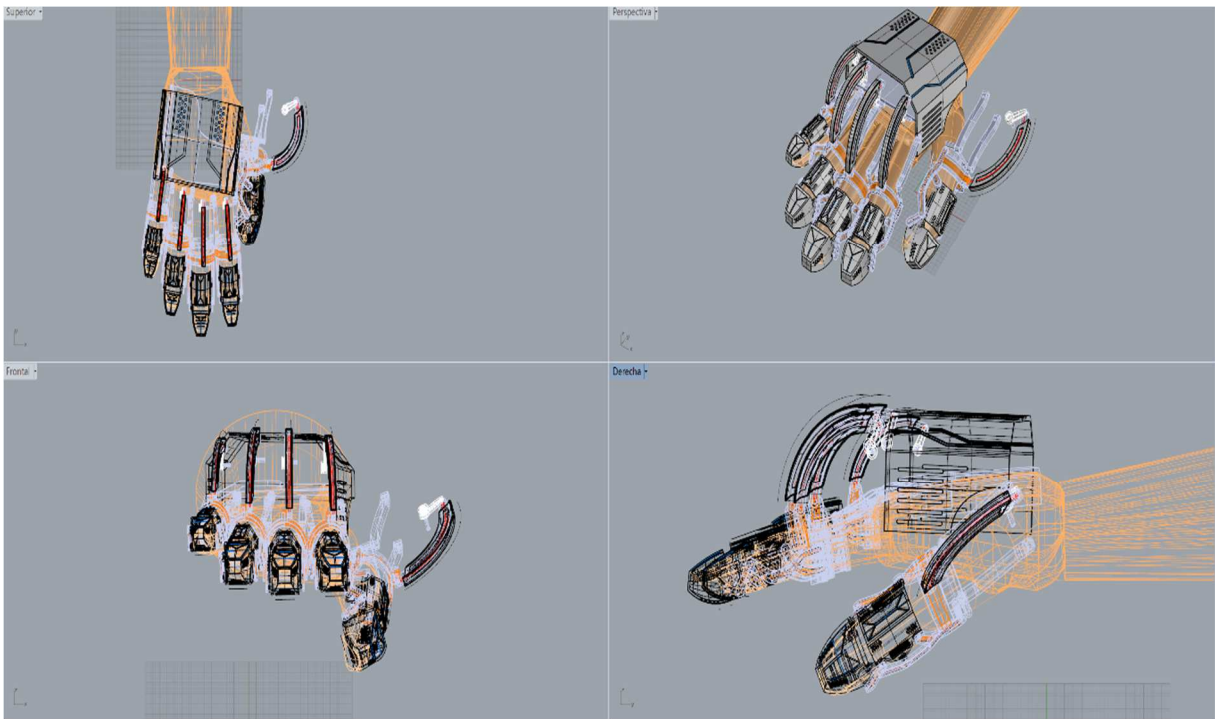


Fig. 24: Modelo 3D de concepto futurista para la parte estética.

Fuente: Elaboración propia en Rhinoceros 3D.

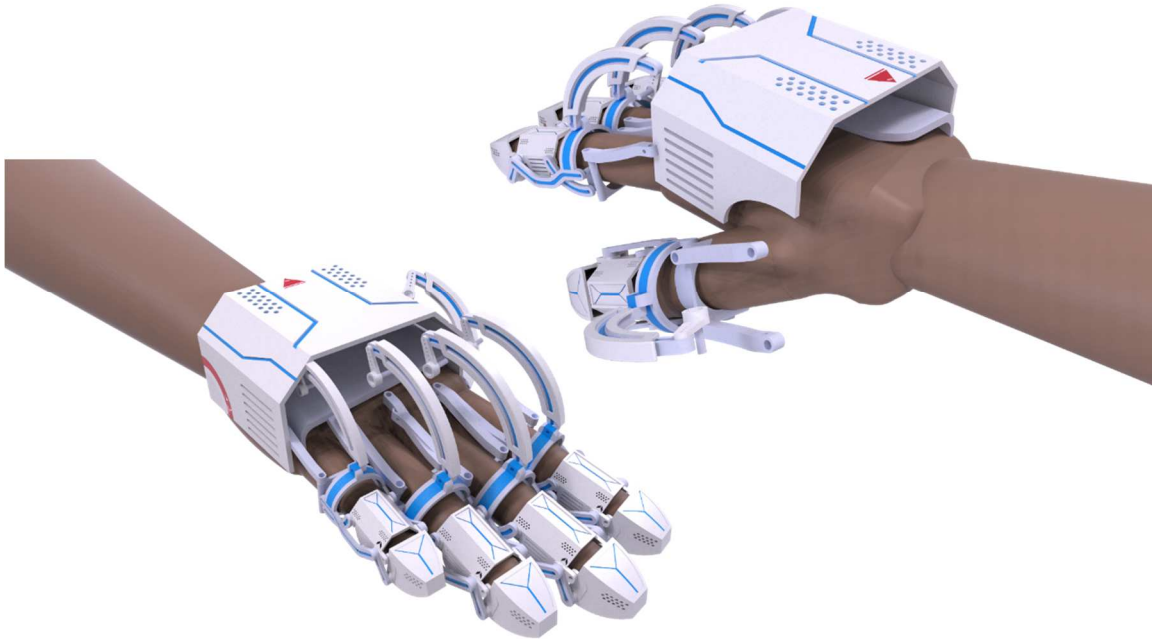


Fig. 25: Render de concepto de diseño basado en ciencia ficción.

Fuente: Elaboración propia en Rhinoceros 3D.

### **5.6.1 Configuración de dos dedos de exoesqueleto**

Paralelamente al mecanismo descrito en la sección anterior, se propuso una versión simplificada de la interfaz, donde se planteó el uso de dos dedos únicamente, el dedo índice y el dedo pulgar, por ser las extremidades utilizadas en todos los tipos de agarre.

Esta versión al igual que la de cinco dedos utiliza el mismo mecanismo de barras que sigue el movimiento natural en los dedos y se plantea el uso de servomotores de menor potencia para reducir su tamaño. En la tabla 7, se hace una comparación de ambas versiones.

Tabla 7 Comparación de versiones de cinco y dos dedos.

	<b>Versión 5 dedos</b>	<b>Versión 2 dedos</b>
<b><i>Usabilidad</i></b>	Estructura moderadamente invasiva por cubrir la mano completa.	Libertad de movimiento. Menor invasión en la mano del usuario.
<b><i>Interacción en el entorno virtual</i></b>	Uso de los 5 dedos independientes logrando una interacción completa	Agarre de pinza representativo del uso de las manos.
<b><i>Peso de la interfaz</i></b>	Mayor número de elementos mayor peso.	Menor peso que la versión completa.
<b><i>Procesamiento de señales.</i></b>	Complejidad elevada por la interacción de múltiples actuadores y sensores de posición.	Reducción de señales por menor número de elementos. Menor poder de procesamiento.
<b><i>Consumo energético</i></b>	Uso de fuente de alimentación externa para demanda de corriente.	Disminución de corriente y alimentación requerida.
<b><i>Costo</i></b>	Mayor debido a mayor cantidad de elementos.	60% menor costo de construcción.
<b><i>Espacio para integración del control electrónico.</i></b>	Uso total del dorso de la mano y muñeca.	Mejor distribución en los espacios para el control electrónico.

Fuente: Elaboración propia.

Con base en las ventajas que representa la versión de dos dedos sobre la versión completa, y debido a un recorte presupuestal fuera del alcance de este proyecto, se tomó la decisión de desarrollar ésta en lugar de la versión original.

Esta versión simplificada (figura 26) cuenta con cinco grados de libertad con el uso de solo dos servomotores para la limitación del movimiento; no obstante, al ser estos dedos los más funcionales de la mano humana, el grado de interacción en un entorno virtual no disminuye de manera significativa.

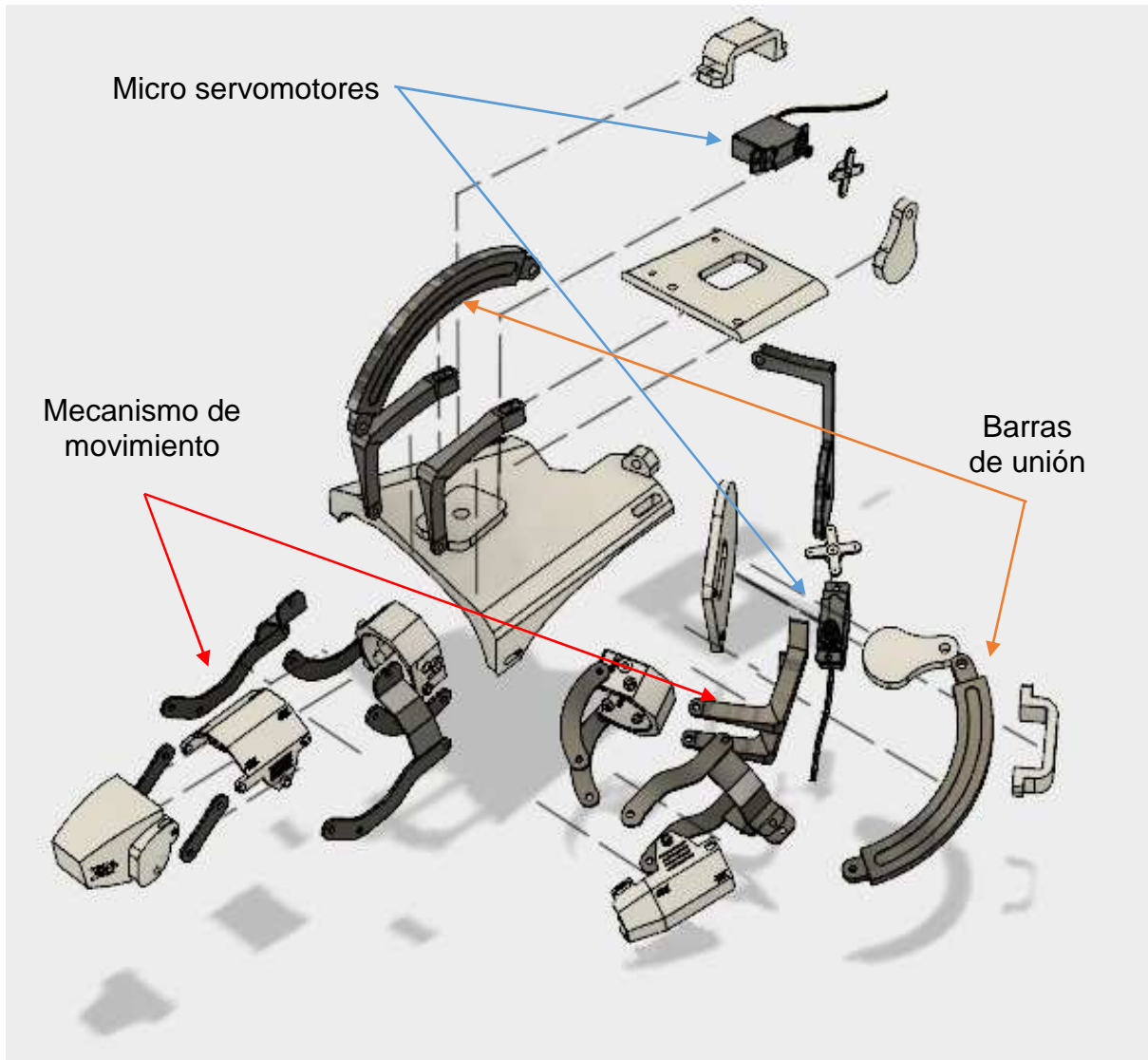


Fig. 26: Conformación de versión de dos dedos.

Fuente: Elaboración propia en Autodesk Fusion 360.

El movimiento tanto del dedo pulgar como del dedo índice, es limitado y controlado por un micro servomotor que unido al mecanismo por una barra semicircular efectúa el movimiento de flexión y extensión natural proporcionando tres puntos de contacto asegurando una sensación de limitación real (figura 27 y 28).

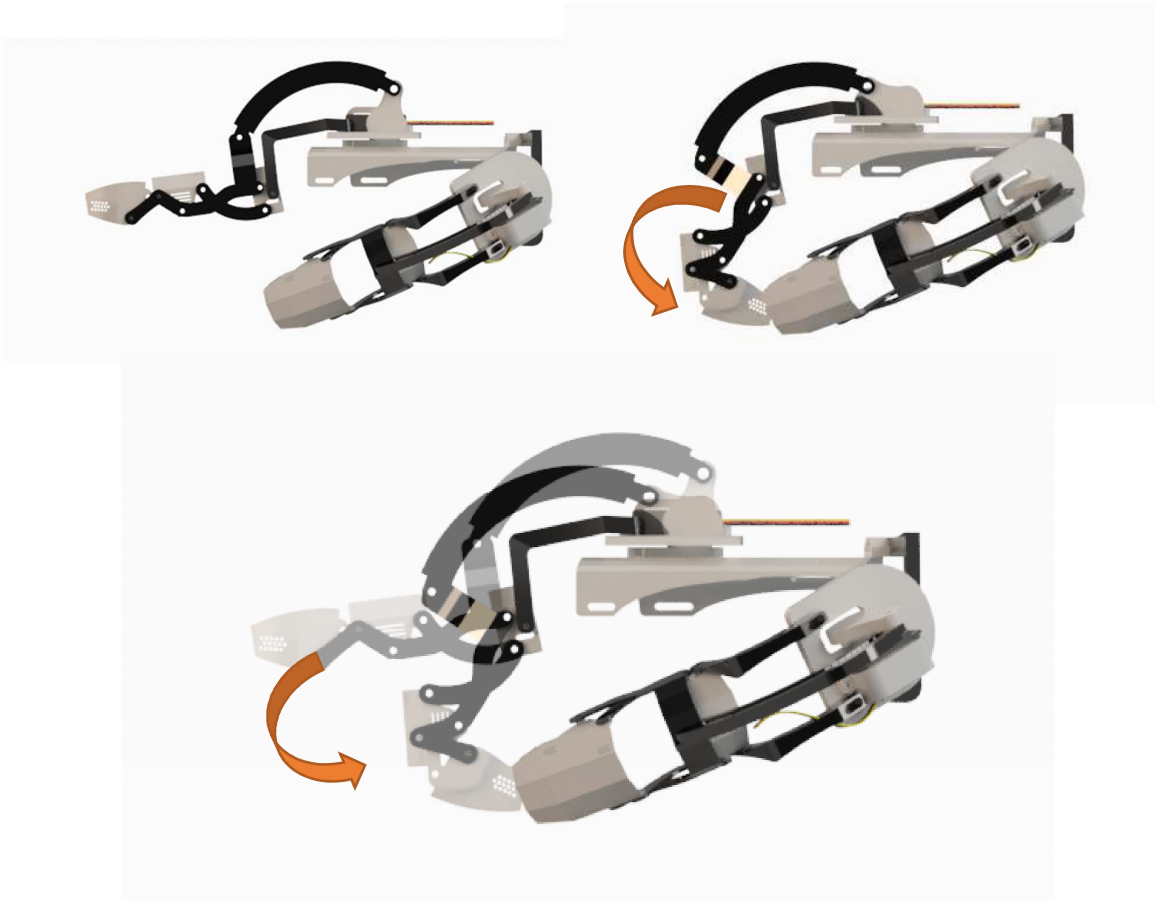


Fig. 27: Movimiento de dedo índice accionado por servomotor y mecanismo de barras.

Fuente: Elaboración propia en Autodesk Fusion 360.





Fig. 28: Movimiento de dedo pulgar accionado por servomotor y mecanismo de barras.

Fuente: Elaboración propia en Autodesk Fusion 360.

## 5.7 Prototipo funcional

Utilizando tecnología de impresión 3D, se materializó la estructura mecánica de la interfaz háptica en la versión de simplificada de dos dedos para las pruebas de función y de usabilidad. Como se observa en la figura 29 y 30, el mecanismo propuesto sigue el movimiento del dedo además de proporcionar 3 puntos de contacto, falange proximal con el anillo de sujeción, falange intermedia con la cubierta y la falange distal o yema del dedo con el dedal de recubrimiento, brindando a una sensación de contacto en la totalidad de la extremidad.

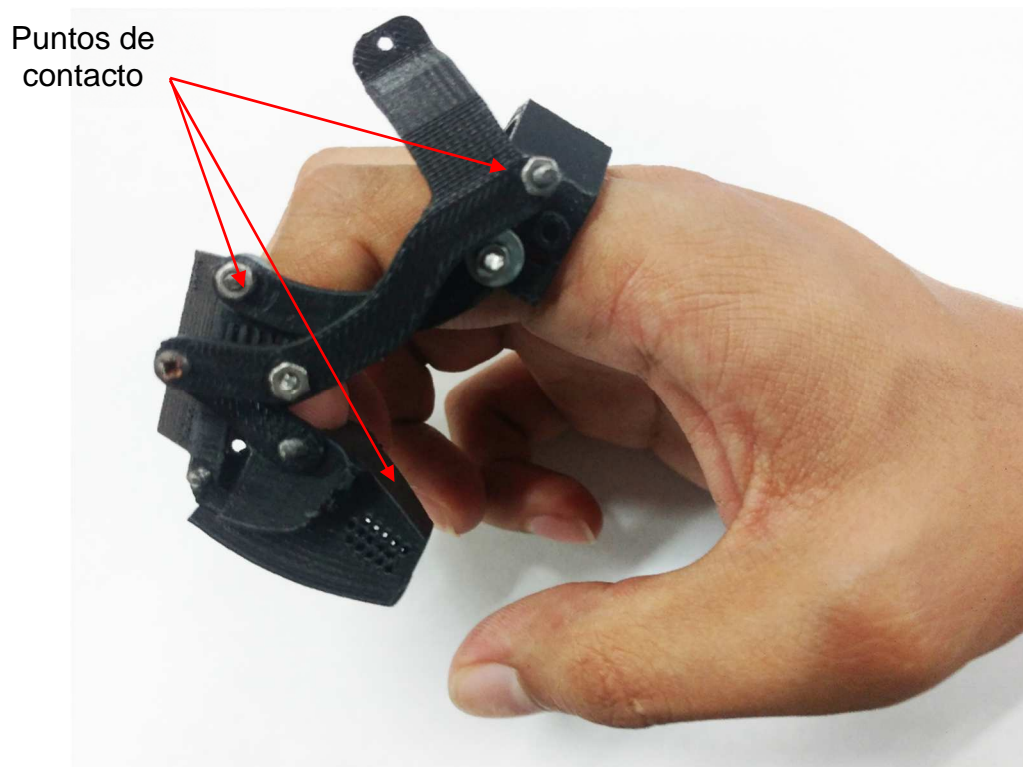
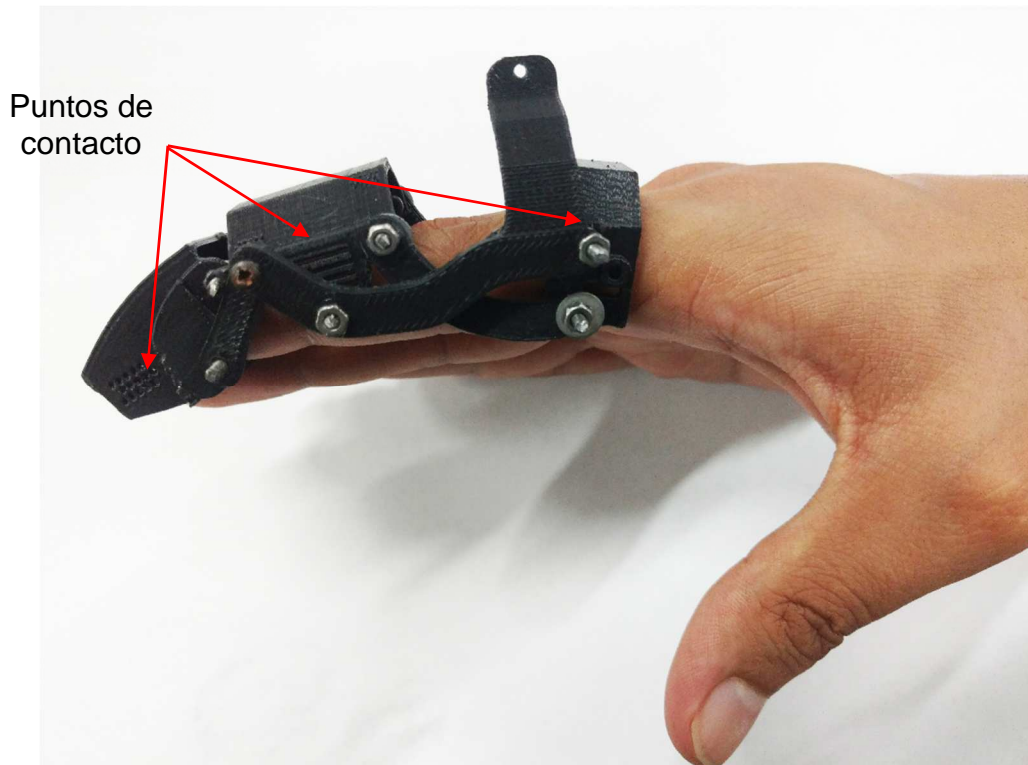


Fig. 29: Prueba de función mecanismo dedo índice y puntos de contacto

Fuente: Fotografías propias.

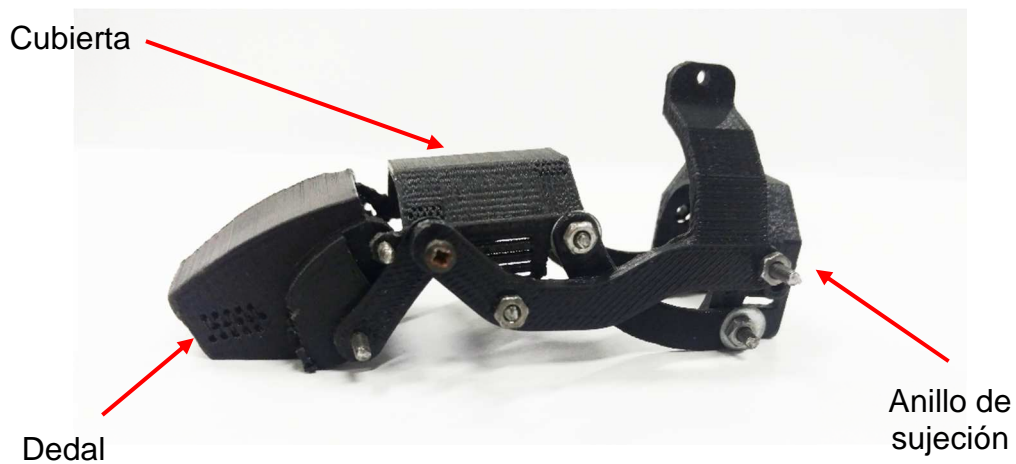


Fig. 30: Elementos del mecanismo que establecen contacto con el dedo para una sensación de contacto total.

Fuente: Fotografías propias.

Así mismo, se comprobó el ajuste en la mano para verificar que la usabilidad en terminos de dimensiones y de libertad de movimiento que corresponden a la talla del usuario(figura 30).

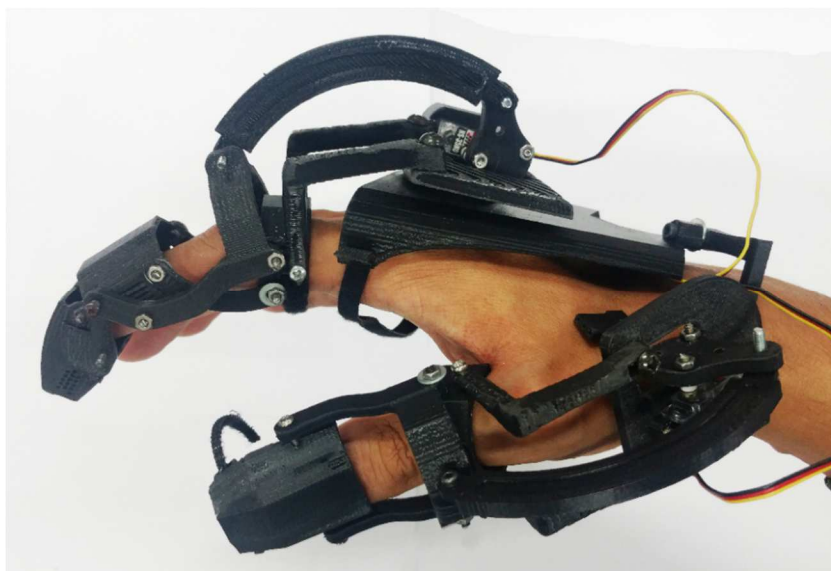


Fig. 31: Prueba de usabilidad para la estructura mecánica de la intefaz háptica.

Fuente: Fotografías propias.

## 5.8 Funcionamiento

Para la correcta utilización de este dispositivo, existe una serie de elementos que se encuentran interactuando para lograr un correcto funcionamiento.

- **Visor de realidad virtual:** Gafas que permiten la visualización de la simulación en VR en 360°.
- **Audifonos:** Permitirán al usuario escuchar la reproducción del audio de la simulación.
- **Ordenador:** Mediante una computadora, la simulación, el procesamiento y análisis de información, interfaz de comunicación entre control electrónico de interfaz háptica serán posibles.
- **Interfaz Háptica:** Sistema mecánico, actuadores, control electrónico.

Primeramente, un ambiente de realidad virtual creado por computadora, en el cual el usuario se adentra de forma virtual y es capaz de navegar por su entorno, a cualquier entorno que se le proyecte y manipularlo; con la ayuda de un visor virtual 3D y audífonos con audio 360°..

Una vez adentrado, con la ayuda de la interfaz háptica propuesta, el usuario además de utilizar el sentido de la vista y del oído cubiertos por visor y audífonos, podrá utilizar el sentido del tacto, mediante el uso de sensores que lo posicionengeográficamente en el ambiente simulado; mientras que un sistema de actuadores serán los responsables de limitar el movimiento en los dedos.

Una vez que el usuario decida tomar un objeto virtual, el procesamiento de la información se lleva a cabo mediante un algoritmo de reconocimiento de colisión de objetos, así como de software especializado, que en conjunto posibilitan una respuesta de retroalimentación de fuerza en tiempo real, logrando así la interacción táctil con el ambiente.

Finalmente, como se muestra en la figura 32, la información generada en la interacción entre el usuario y el sistema háptico será procesada y actualizada en el visor iniciando el ciclo nuevamente.



Fig. 32 Esquema de funcionamiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.9 Conclusiones

Existe una relación directa entre el estado de presencia que un sistema de VR genera al usuario y la inmersión que proporciona; sin embargo, existe una serie de factores involucrados en el estado de presencia cuyo análisis requiere el estudio de cada variable por separado, quedando fuera del alcance del proyecto.

Ya que, el desarrollo de nuevos proyectos y productos basados en tecnología, además de su aplicación en la ciencia, debe enfocarse y centrarse en los usuarios; debido a que ellos dictaminan si el producto será exitoso o no, si cubre sus necesidades y expectativas, y si son capaces de generar un lazo emocional con ellos, en cuyo caso, su deseo por el nuevo producto aumentará significativamente lo que se traduce en una mayor aceptación y ventas.

Las técnicas y metodologías centradas en el usuario y no en la tecnología se requieren para la correcta integración de todos los actores involucrados en el proceso de diseño, ya que, además de considerar el cómo, se centran en el porqué.

Lo que brinda una visión más amplia del problema, así como, una solución eficaz sin dejar de lado aspectos de uso, función, estética y forma; generando soluciones integrales y no parciales, a necesidades bien definidas por el usuario final. Por esta razón, todo proyecto cualquiera que sea su naturaleza, debe integrar desde su fase inicial el diseño no sólo en términos estéticos sino de estrategia; una visión clara del objetivo asegura un producto exitoso en lugar de aplicaciones obvias de la tecnología que sufraguen problemas inexistentes.

## **5.10 Limitaciones y trabajos futuros**

El proyecto tiene el objetivo de brindar una herramienta para evaluar la inmersión generada en la inclusión de un tercer sentido, dejando las bases para trabajos posteriores con el fin de afinar la características técnicas de la captura de movimiento y el aumento de grados de libertad para la incorporación de nuevos actuadores y sistemas de tracking más sofisticados. Así como la generación de contenido para diferentes aplicaciones basadas en la SDK que se proporcionará para el uso del dispositivo.

## Referencias

- Alexander, J. M., Johnson, K. E., & Schreiber, J. B. (2002). Knowledge is not everything: Analysis of children's performance on a haptic comparison task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82(4), 341–366. [http://doi.org/10.1016/S0022-0965\(02\)00100-5](http://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00100-5)
- Arias, L. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano, 4(1), 14–24.
- Ávila, R., Prado, L., & Gonzáles, E. (2007). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile*.
- BBVA Innovation Center. (2015). TOTAL IMMERSION IN A REAL WORLD INCREASINGLY. *Ebook Virtual Reality*, (SERIE INNOVATION TRENDS). Retrieved from <http://www.centrodeinnovacionbbva.com/en/ebook/ebook-virtual-reality>
- BBVA Innovation Center. (2016). Trends 2017: Virtual reality, on the hunt for its “Pokemon Go” moment. Retrieved February 13, 2017, from <http://www.centrodeinnovacionbbva.com/en/news/trends-2017-virtual-reality-hunt-its-pokemon-go-moment>
- Beier, K. P. (2003). Virtual Reality a Short introduction. Retrieved from <http://www.umich.edu/~vrl/intro/index.html>
- Bowman, D. a, & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? (Cover story). *Computer*, 40(7), 36–43. <http://doi.org/10.1109/MC.2007.257>
- Brown, T. (2009). *Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspire Innovation*. HarperCollins.
- Burdea, G. C., Lin, M. C., Ribarsky, W., & Watson, B. (2005). Guest editorial: Special issue on haptics, virtual, and augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(6), 611–612. <http://doi.org/10.1109/TVCG.2005.102>
- Bystrom, K.-E., Barfield, W., & Hendrix, C. (1999). A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 241–244.
- Chasanidou, D., Alssandro, G. A., & Lee, E. (2015). Design Thinking Methods and Tools for Innovation. In *Design, User Experience, and Usability: Design Discourse. DUXU* (Vol. 9186, pp. 12–23). <http://doi.org/10.1007/978-3-319->

- Corbetta, D., Imeri, F., & Gatti, R. (2015). Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review. *Journal of Physiotherapy*, 61(3), 117–24. <http://doi.org/10.1016/j.jphys.2015.05.017>
- Cyberglove Systems. (2015). No Title. Retrieved from <http://www.cyberglovesystems.com/>
- Eutsler, B., Gaertner, J., Pollino, E., Robinson, N., & Moges, M. (2015). Virtual Reality Glove. In *American Society for Engineering Education*. San Antonio, Texas. Retrieved from [http://engineering.utsa.edu/~aseegsw2015/papers/ASEE-GSW\\_2015\\_submission\\_3.pdf](http://engineering.utsa.edu/~aseegsw2015/papers/ASEE-GSW_2015_submission_3.pdf)
- Gallace, A., & Spence, C. (2014). *In touch with the future: The sense of touch from cognitive neuroscience to virtual reality*. New York: OXFORD.
- Gobble, M. M. (2014). Beyond brainstorming. *Research Technology Management*, 57(2), 60–62. <http://doi.org/10.5437/08956308X5702005>
- Gray, D. (2010). Empathy Map. Retrieved January 1, 2017, from <http://thetoolkitproject.com/tool/empathy-map#sthash.JdlhT648.dpbs>
- Gu, X., Zhang, Y., Sun, W., Bian, Y., Zhou, D., & Kristensson, P. O. (2016). Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*, 1991–1995. <http://doi.org/10.1145/2858036.2858487>
- Gurteen, D. (1998). Knowledge , Creativity and Innovation. *Knowledge Associates*, 2(1), 5–13.
- Gutierrez, M., Vexo, F., & Thalmann, D. (2008). *Stepping into virtual reality*. SPRINGER. Retrieved from <http://www.springer.com/us/book/9781848001169>
- Guttentag, D. A. (2010). Virtual reality: Applications and implications for tourism. *Tourism Management*, 31(5), 637–651. <http://doi.org/10.1016/j.tourman.2009.07.003>
- Harhoff, D., Henkel, J., & Von Hippel, E. (2003). Profiting from voluntary information spillovers: How users benefit by freely revealing their innovations. *Research Policy*, 32(10), 1753–1769. [http://doi.org/10.1016/S0048-7333\(03\)00061-1](http://doi.org/10.1016/S0048-7333(03)00061-1)
- Holden, M. K. (2005). Virtual environments for motor rehabilitation: review.



*Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 8(3), 187-211-219.  
<http://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.187>

Kim, N. W., & Lee, H. J. (2013). Developing of vision-based virtual combat simulator. *2013 International Conference on IT Convergence and Security, ICITCS 2013*, 1–4. <http://doi.org/10.1109/ICITCS.2013.6717823>

Ludlow, B. L. (2015). Virtual Reality: Emerging Applications and Future Directions. *Rural Special Education Quarterly*, 34(3), 3–10.

Massie, T. H. (1994). The PHANToM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects. *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*.

Mihelj, M., Novak, D., & Beguš, S. (1999). *Virtual reality technology and its industrial applications. Control Engineering Practice* (Vol. 7).  
[http://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00114-8](http://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00114-8)

Mihelj, M., & Podobnik, J. (2012). *Haptics for Virtual Reality and Teleoperation*. SPRINGER. [http://doi.org/10.1007/978-94-007-5718-9\\_1](http://doi.org/10.1007/978-94-007-5718-9_1)

Minsky, M., Ming, O., Steele, O., Brooks, F. P., & Behensky, M. (1990). Feeling and seeing: issues in force display. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 24(2), 235–241. <http://doi.org/10.1145/91394.91451>

Mujber, T. S., Szecsi, T., & Hashmi, M. S. J. (2004). Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156(1–3), 1834–1838. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.401>

Myszewski, J. M. (2013). On improvement story by 5 whys. *The TQM Journal*, 25(4), 371–383. <http://doi.org/10.1108/17542731311314863>

Pérez, M., Zabre, E., & Islas, E. (2004). Realidad virtual: un panorama general. *Instituto de ilvestigaciones Eléctricas*.

Plattner, H., Meinel, C., & Leifer, L. (2011). *Understanding Innovation. Hasso Plattner Institut*. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-13757-0>

Prisacariu, V. A., & Reid, I. (2012). 3D hand tracking for human computer interaction. *Image and Vision Computing*, 30(3), 236–250.  
<http://doi.org/10.1016/j.imavis.2012.01.003>

Sallomi, P., & Lee, P. (2016). Technology, Media & Telecommunication trends that will impact your business, 84.

- Samur, E. (2012). *Performance metrics for haptic interfaces*. Springer London. [http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4225-6\\_1](http://doi.org/10.1007/978-1-4471-4225-6_1)
- Seidel, V. P., & Fixson, S. K. (2013). Adopting design thinking in novice multidisciplinary teams: The application and limits of design methods and reflexive practices. *Journal of Product Innovation Management*, 30(SUPPL 1), 19–33. <http://doi.org/10.1111/jpim.12061>
- SensAble Technologies. (2008). OpenHaptics Toolkit v.3.0 Programmer's Guide. Retrieved from [http://www.geomagic.com/files/4013/4851/4367/OpenHaptics\\_ProgGuide.pdf](http://www.geomagic.com/files/4013/4851/4367/OpenHaptics_ProgGuide.pdf)
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2003). *Understanding Virtual Reality: Interface, Application and Design*. (U. of California, Ed.). San Francisco: MORGAN KAUFMANN.
- Slater, M. (2003). A Note on Presence Terminology. *Emotion*, 3, 1–5.
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616. <http://doi.org/10.1007/s10750-008-9541-7>
- Srivastava, K., Chaudhury, S., & Das, R. (2014). Virtual reality applications in mental health: Challenges and perspectives. *Industrial Psychiatry Journal*, 23(2), 83. <http://doi.org/10.4103/0972-6748.151666>
- Stenger, B., Thayananthan, A., Torr, P. H. S., & Cipolla, R. (2006). Model-based hand tracking using a hierarchical Bayesian filter. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(9), 1372–1384. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.189>
- Sullivan, G. M., & Artino, A. R. (2013). Analyzing and interpreting data from likert-type scales. *Journal of Graduate Medical Education*, 5(4), 541–542. <http://doi.org/10.4300/JGME-5-4-18>
- Thorsten A., K. (Ed.). (2009). *Engineering Haptic Devices*. SPRINGER. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-88248-0>
- Waterworth, J. A., & Waterworth, E. L. (2010). The Meaning of Presence. *Interactive Institute*, 58(1), 5–6. <http://doi.org/10.1111/1468-4446.12187>
- West, M. A., Borrill, C. S., Dawson, J. F., Brodbeck, F., Shapiro, D. A., & Haward, B. (2003). Leadership clarity and team innovation in health care. *Leadership Quarterly*, 14(4–5), 393–410. [http://doi.org/10.1016/S1048-9843\(03\)00044-4](http://doi.org/10.1016/S1048-9843(03)00044-4)

- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 7(3), 225–240. <http://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Young, R. W. (2003). Evolution of the human hand: thr role of throwing and clubbing. *Journal of Anatomy*, 202, 165–174. <http://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2003.00144.x>

# ANEXO I

## CONSENTIMIENTO INFORMADO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA



### CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Querétaro, Qro \_ de \_\_\_\_\_ del 2017.

Por medio de la presente acepto participar en la investigación titulada “**Incremento de inmersividad en usuarios de entornos de realidad virtual utilizando una interfaz háptica para limitación de movimiento en dedos.**”. La cual está siendo realizada por \_\_\_\_\_ quien se ha identificado como colaborador del proyecto.

Se me ha informado que el objetivo del estudio **recabar información mediante un cuestionario sobre el nivel de inmersión y presencia que el sistema de realidad virtual el cual probé me brindó.**

Así mismo se me ha explicado ampliamente lo siguiente:

- ✓ Se trata de una investigación sin riesgos para mi salud e integridad física, mental y social.
- ✓ Tengo libertad de retirarme de la investigación cuando así lo desee sin que ello ocasione daño físico o moral alguno a mi persona y sin que tenga la necesidad de explicar los motivos de mi decisión.
- ✓ Toda la información que yo proporcione será manejada de forma confidencial garantizando mi derecho a la privacidad no registrando mi nombre, dirección, teléfono o algún otro dato personal en los resultados del estudio, mediante el cual me pudieran identificar personas ajenas a la investigación.
- ✓ Las preguntas y dudas que tenga sobre el desarrollo de la investigación y mi participación en ella, serán contestadas y aclaradas oportunamente por el investigador.

Ing. Juan Pedro Cruz Sánchez

---

INVESTIGADOR RESPONSABLE

---

PARTICIPANTE

## ANEXO II

### CUESTIONARIO DE PRESENCIA (PRESENCE QUESTIONNAIRE)

(Witmer & Singer, Vs. 3.0, Nov. 1994)\*

Describa su experiencia en el entorno virtual, marcando con una "X" en la casilla correspondiente de la escala de 7 puntos, de acuerdo con el contenido de la pregunta y las etiquetas descriptivas. Consideraré la totalidad de la escala al marcar sus respuestas, ya que se pueden aplicar los niveles intermedios. Responda a las preguntas de forma independiente en el orden en que aparecen. No salte las preguntas o vuelva a una pregunta anterior para cambiar su respuesta.

#### CON RESPECTO AL AMBIENTE EXPERIMENTADO

1. ¿Cuánto fue capaz de controlar los acontecimientos?

DE NINGÚN MODO	ALGO	COMPLETAMENTE	

2. ¿Qué tan responsivo fue el medio ambiente a las acciones que iniciaste (o desempeñaste)?

NO RESPONSIVO	MODERADAMENTE RESPONSIVO	COMPLETAMENTE RESPONSIVO	

3. ¿Qué tan natural te pareció la interacción con el entorno?

EXTREMADAMENTE ARTIFICIAL	EN EL LÍMITE	COMPLETAMENTE NATURAL	

4. ¿Qué tanto te envolvieron los aspectos visuales del ambiente?

DE NINGÚN MODO	ALGO	COMPLETAMENTE	

5. ¿Qué tan natural fue el uso del mecanismo mediante el cual controlaste el movimiento en el entorno?

EXTREMADAMENTE ARTIFICIAL	EN EL LÍMITE	COMPLETAMENTE NATURAL	

6. ¿Qué tan convincente fue tu sentido de movimiento de los objetos a través del espacio?

NO CONVINCENTE			MODERADAMENTE CONVINCENTE			COMPLETAMENTE CONVINCENTE

7. ¿Qué tanto tu experiencia en el ambiente virtual parece consistente con tus experiencias en el mundo real?

NO CONSISTENTE			MODERADAMENTE CONSISTENTE			COMPLETAMENTE CONSISTENTE

8. ¿Fuiste capaz de anticipar lo que sucedería a continuación en respuesta a las acciones que realizaste?

DE NINGÚN MODO			ALGO			COMPLETAMENTE

9. ¿Qué tan completamente fuiste capaz de examinar de forma activa o buscar en el ambiente utilizando la visión?

DE NINGÚN MODO			ALGO			COMPLETAMENTE

10. ¿Qué tan convincente fue su sensación de moverse dentro del entorno virtual?

NO CONVINCENTE			MODERADAMENTE CONVINCENTE			COMPLETAMENTE CONVINCENTE

11. ¿Qué tan cerca fuiste capaz de examinar los objetos?

DE NINGÚN MODO			MODERADAMENTE DE CERCA			MUY CERCA

12. ¿Qué tan bien pudiste examinar objetos desde diferentes puntos de vista?

DE NINGÚN MODO			ALGO			EXTENSIVAMENTE

13. ¿Qué tan involucrado estuviste en la experiencia del ambiente virtual?

NO INVOLUCRADO			MEDIANAMENTE INVOLUCRADO			COMPLETAMENTE ABSORTO

14. ¿Cuánta demora experimentaste entre tus acciones y los resultados esperados?

SIN RETRASOS			MODERADAMENTE RETARASADO			RETTRASOS LARGOS

15. ¿Qué tan rápido te adaptaste al ambiente virtual experimentado?

DE NINGÚN MODO			LENTAMENTE			MENOS DE UN MINUTO

16. ¿Qué tan hábil en el movimiento y la interacción con el entorno virtual te sentiste al final de la experiencia?

NADA HÁBIL			RASONABLEMENTE HÁBIL			MUY HÁBIL

17. ¿Qué tanto la calidad de la pantalla interfirió o te distrajo de la realización de las tareas asignadas o actividades requeridas?

DE NINGÚN MODO			INTERFIERE ALGO			EVITA LA REALIZACIÓN

18. ¿Qué tanto los dispositivos de control interfirieron con de la realización de las tareas asignadas o actividades requeridas?

DE NINGÚN MODO			INTERFIERE ALGO			INTERFIERE BASTANTE

19. ¿Qué tan bien te pudiste concentrar en las tareas asignadas o actividades requeridas y no en los posible los mecanismos utilizados para realizar estas tareas o actividades?

DE NINGÚN MODO			ALGO			COMPLETAMENTE

SI EL AMBIENTE VIRTUAL INCLUYE SONIDO

20. ¿En qué medida los aspectos de audio del ambiente te involucraron?

DE NINGÚN MODO | ALGO | COMPLETAMENTE

21. ¿Qué tan bien pudiste identificar los sonidos?

DE NINGÚN MODO | ALGO | COMPLETAMENTE

22. ¿Qué tan bien pudiste localizar los sonidos en el ambiente?

DE NINGÚN MODO | ALGO | COMPLETAMENTE

SI EL AMBIENTE VIRTUAL INCLUYE INTERFACES HÁPTICAS

23. ¿Qué tan bien pudiste examinar activamente o buscar el entorno utilizando el tacto?

DE NINGÚN MODO | ALGO | COMPLETAMENTE

24. ¿En qué medida pudiste mover o manipular objetos en el entorno virtual?

DE NINGÚN MODO | ALGO | EXTENSAMENTE

Última versión Marzo de 2013

\*Versión original: Witmer, B.G. & Singer. M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240.

Revisado Junio 2016



# ANEXO III

## CUESTIONARIO DE TENDENCIAS INMERSIVAS (IMMERSIVE TENDENCIES QUESTIONNAIRE)

(Witmer & Singer, Vs. 3.01, September 1996)\*

Indica tu respuesta preferida marcando con una "X" en la casilla correspondiente de la escala de 7 puntos. Por favor considera la escala completa cuando hagas tus respuestas, ya que los niveles intermedios también son válidos. Por ejemplo, si tu respuesta es una o dos veces, la segunda casilla del lado izquierdo debe ser marcada. Si tu respuesta es "muchas veces" pero no extremadamente frecuente. Entonces la casilla número seis (o segunda de derecha a izquierda) debe ser marcada.

1. ¿Eres fácilmente envuelto profundamente en películas o series?

NUNCA			OCASIONALMENTE			FRECUENTEMENTE

2. ¿Te has inmerso tanto en un programa de tv o de un libro que los demás tienen problemas para obtener tu atención?

NUNCA			OCASIONALMENTE			FRECUENTEMENTE

3. ¿Qué tan alerta te sientes mentalmente al presente?

NADA ALERTA			MODERADAMENTE			TOTALMENTE ALERTA

4. ¿Alguna vez has estado tan atento en una película que no te das cuenta de lo que sucede a tu alrededor?

NUNCA			OCASIONALMENTE			FRECUENTEMENTE

5. ¿Qué tan frecuente te sientes fuertemente identificado con los personajes de una historia?

NUNCA			OCASIONALMENTE			FRECUENTEMENTE

6. ¿Alguna vez te has sentido tan envuelto en un videojuego que es como si estuvieras dentro y no sólo moviendo una palanca y viendo una pantalla?

--	--	--	--	--	--	--



\_\_\_\_\_

NUNCA OCASIONALMENTE FRECUENTEMENTE

15. ¿Alguna vez te has emocionado durante una persecución o escena de lucha en la televisión o en el cine?

\_\_\_\_\_

NUNCA OCASIONALMENTE FRECUENTEMENTE

16. ¿Alguna vez te has asustado por algo que sucede en algún programa de televisión o durante una película?

\_\_\_\_\_

NUNCA OCASIONALMENTE FRECUENTEMENTE

17. ¿Alguna vez ha quedado preocupado y temeroso por largo tiempo después de ver una película de miedo?

\_\_\_\_\_

NUNCA OCASIONALMENTE FRECUENTEMENTE

18. ¿Alguna vez te has involucran tanto en hacer algo que pierdes toda noción del tiempo?

\_\_\_\_\_

NUNCA OCASIONALMENTE FRECUENTEMENTE

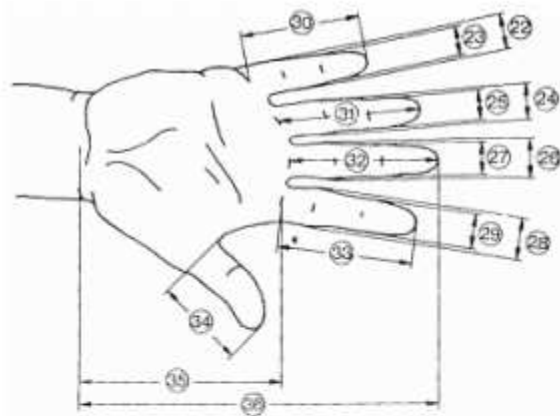
Última versión Marzo de 2013

\*Versión original: Witmer, B.G. & Singer. M.J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240.

Revisado Junio 2016

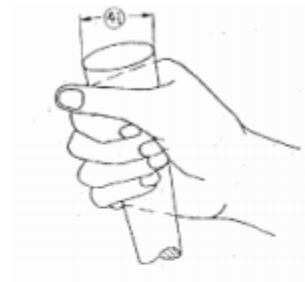
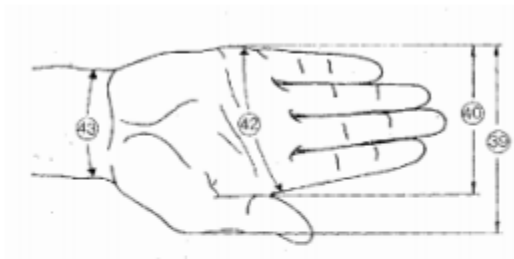
## ANEXO IV Norma DIN 33 402

Las dimensiones de las manos tienen una gran importancia para el diseño de herramientas, utillaje y mandos. Ante tal necesidad se estableció la norma DIN 33 402 con el fin de estandarizar estas medidas y poder ser utilizadas en la industria. A continuación se muestran las medidas para las manos que esta norma dicta. Figura 1. Medidas de los dedos según Norma DIN 33402 (Parte 1) 77 Figura 2. Medidas de los dedos según Norma DIN 33402 (Parte 2).



Dimensiones En cm.	PERCENTIL						
	Hombres			Mujeres			
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %	
22	Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23	Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedeo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30	Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

Figura 1. Medida de los dedos según norma DIN 33 402 (parte 1).



Dimensiones	PERCENTIL					
	Hombres			Mujeres		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
En cm.						
37 Ancho del dedo pulgar	2,0	2,3	2,5	1,6	1,9	2,1
38 Grosor de la mano	2,4	2,8	3,2	2,1	2,6	3,1

Dimensiones	PERCENTIL					
	Hombres			Mujeres		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
En cm.						
39 Ancho de la mano incluyendo dedo pulgar	9,8	10,7	11,6	8,2	9,2	10,1
40 Ancho de la mano excluyendo el dedo pulgar	7,8	8,5	9,3	7,2	8,0	8,5
41 Diámetro de agarre de la mano*	11,9	13,8	15,4	10,8	13,0	15,7
42 Perímetro de la mano	19,5	21,0	22,9	17,6	19,2	20,7
43 Perímetro de la articulación de la muñeca	16,1	17,6	18,9	14,6	16,0	17,7

\* Las medidas corresponden al anillo descrito por los dedos pulgar e índice

Figura 2. Medida de los dedos según norma DIN 33 402 (parte 2).