



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño e implementación de
guante para estudios
ergonómicos**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Juan Pablo Peña Herrera

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Manuel Dorador González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El científico no estudia la naturaleza porque le resulte útil hacerlo, la estudia porque le da placer, y le da placer porque es bella. Si la naturaleza no fuera bella no valdría la pena conocerla y la vida no valdría la pena vivirse.

Henri Poincaré

Agradecimientos

A mamá y papá, que con amor me han criado, visto crecer y compartido mis logros, su ejemplo como padres me llena de orgullo.

A Roy, por los consejos y las ideas geniales, pero sobre todo por ser mi hermano.

A mis tías, Pily y Blanquita, a cada una por ser como otra madre para mí.

A mis abuelos, Tita y Yeye, por el amor incondicional.

A mis amigos por todos los momentos juntos .

A los profesores que me han formado como profesionista.

A la Univerisdad Nacional Autónoma de México, la máxima casa de estudios, por todas las oportunidades que me ha ofrecido.

Gracias a todos los que han formado parte de mi vida por hacer de mí la persona que hoy soy y ayudarme a cumplir este sueño.

Agradecimientos especiales al Dr. Jesús Manuel Dorador González por el apoyo, la asesoría y la confianza absoluta durante la realización del proyecto.

Esta tesis se realizó en el marco del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME). Registro del proyecto PE109818 “Enseñanza de la ergonomía”. Agradezco a la DGAPA-UNAM por la beca recibida.

Resumen

Es bien sabido que en la última década ha habido grandes avances tecnológicos en las áreas de ingeniería, diseño y medicina; pero a pesar de esto, no existen muchos dispositivos capaces de determinar cuán correcta es la ergonomía de un objeto, es decir, que si la forma en que se agarra ayuda o no a realizar la tarea para la que fue hecho. Este proyecto trata de encontrar una solución alternativa a aquellos dispositivos que miden, de alguna forma, la interacción de las manos con el medio ambiente y además darle un enfoque hacia el área de la ergonomía. Con el dispositivo propuesto se pretende encontrar una repetibilidad de fuerzas y posiciones en la mano al momento en que se manipula un objeto, este dispositivo estará conformado principalmente por dos partes: la física, que será el modelo del guante instrumentado con los sensores para hacer las mediciones correspondientes; y la virtual, que es la encargada de realizar la simulación de una mano virtual que imita los movimientos de la mano real y donde se hará todo el procesamiento de los datos necesarios para un posterior análisis. Al final, basado en los resultados obtenidos, será posible analizar las ventajas y desventajas, posibilidades y limitaciones del dispositivo propuesto, así como las mejoras con que podría contar para hacer de él un prototipo funcional más robusto y completo.

Índice general

Introducción	1
Objetivo	1
Alcances	1
Justificación	2
1. Marco teórico	3
1.1. Ergonomía	3
1.2. Ergonomía de la mano	8
1.3. Fisiología de la mano	9
2. Estado del arte	15
2.1. Guantes para la medición de fuerzas	15
2.2. Dispositivos para medir los movimientos de la mano	19
2.3. Otros proyectos relevantes	23
3. Especificaciones y diseño conceptual	25
3.1. Características del guante	25
3.2. Sensores de fuerza	26
3.3. Sensores de movimiento	29
3.4. Selección de conceptos	33
4. Diseño del prototipo y de la interfaz	37
4.1. Definición de sistemas y subsistemas	37
4.2. Selección de movimientos	39
4.3. Implementación de los sensores	40
4.4. Desarrollo de la simulación	43
4.5. Procesamiento de datos y despliegue de la información	45
4.6. Mejoras al ambiente virtual	45
5. Experimentación y resultados	51
5.1. Procedimientos de experimentación	51
5.2. Resultados	53
5.3. Trabajo a futuro	55
Conclusiones	55
Bibliografía	59
A. Apéndice del Capítulo 5	63

Introducción

La ergonomía es la ciencia que estudia la interacción del ser humano con los objetos, puesto que la interacción principal que tenemos con ellos es con las manos, es natural que se busque la manera de cuantificar esta interacción. Dicha cuantificación posiblemente no abarque la medición de todos los sistemas fisiológicos que se involucran al usar las manos (como la presión arterial, por ejemplo), pero sí los más determinantes como son la posición y fuerza de la mano y los dedos durante la manipulación de un objeto en particular.

En términos prácticos, ergonomía es sinónimo de comodidad, pero la comodidad no siempre es un aspecto fácil de evaluar en el desarrollo de un producto, pues el desafío se encuentra en diseñar objetos que sean cómodos y fáciles de usar, es decir un diseño que otorgue el máximo confort en condiciones de uso, por una amplia densidad demográfica, con el fin de optimizar la actividad en cuestión y reducir fatiga e incomodidades durante su ejecución, pero sin perder de vista que se mantenga el costo de manufactura y producción lo más bajo posible.

Objetivo

Diseñar un guante instrumentado capaz de medir los ángulos en las articulaciones y las fuerzas de presión de los dedos, con lo cual se podrá determinar la eficiencia de la sujeción de los objetos. Se propone el desarrollo de un dispositivo capaz de medir ciertos aspectos de la interacción mano-objeto para así poder evaluar si realmente el diseño de un producto puede calificarse como ‘ergonómico’ y, en caso de no ser así, dar la información necesaria para su correcto rediseño.

Alcances

Desarrollar un prototipo funcional como propuesta alternativa a las tecnologías existentes para la medición de ángulos de flexión y fuerza ejercida en cada uno de los dedos de la mano. El modelo que se plantea cubre solamente los movimientos de los dedos de flexión-extensión, así como la fuerza de presión en los pulpejos de las falanges distales de cada dedo (la yema de los dedos), con la finalidad de recopilar la información más determinante durante la sujeción de los objetos sin comprometer la naturalidad de los movimientos de la mano debido a un exceso de componentes en el guante que limiten dicho movimiento.

Justificación

Se hará un guante para registrar la posición y fuerza de agarre de cada uno de los dedos durante la manipulación de distintos objetos para determinar cuán ergonómico es asirlos, es decir, qué tan adaptados están para con las condiciones anatómicas de las manos del usuario.

La necesidad de un guante que sea capaz de medir la ergonomía de los objetos surge de que la cualidad de ergonomía es meramente subjetiva y depende únicamente de la opinión de la persona que en su momento manipula el objeto. Por tanto, se busca estandarizar qué tan propenso es un objeto a ser sujetado de la misma manera por varios usuarios y en diferentes momentos.

En el mercado existen un sinnúmero de productos que se jactan de ser “ergonómicos”, sin si quiera dar pruebas contundentes y aludiendo solamente a que estos tienen perfiles redondeados o con surcos donde se deben de colocar los dedos.

La medición de la ergonomía, que si bien no se podrá colocar en una escala con una magnitud definida, se podrá establecer qué tan adaptable es un objeto a la fisiología de la mano a partir de la repetitividad en el modo de sujeción y las variaciones que pueda haber durante una misma prueba.

Capítulo 1

Marco teórico

Las manos son una de las partes más esenciales del ser humano, ya que son la principal conexión física que tenemos con el ambiente que nos rodea. La complejidad anatómica de la mano (27 huesos, casi 40 músculos y 20 grados de libertad o GDL) explica su riqueza funcional e importancia que juega a la hora de relacionarnos y manipular nuestro entorno, haciendo con ellas un sinnúmero de tareas en el día a día.

1.1. Ergonomía

La palabra ‘ergonomía’¹ proviene de los vocablos griegos *ergo* (trabajo) y *nomos* (norma o medida), lo que significaría, literalmente, el estudio o la medida del trabajo. En este contexto, la palabra trabajo se refiere a cualquier actividad humana realizada con un propósito, concepto que va más allá del que se entendería como actividad que es hecha para obtener algún beneficio económico, abarcando un campo semántico más amplio donde se incluyen los deportes, las labores domésticas, los servicios sociales, etc., todo esto sin desperdiciar recursos, sin errores y sin daños a la persona involucrada o a terceros. Por lo tanto, se puede inferir, que el centro de estudio de la ergonomía es el humano.

El ser humano tiene una capacidad excepcional para adaptarse, física y mentalmente, para un sinnúmero de situaciones demandantes y exigentes. Sin embargo, las posibilidades de la plasticidad humana para responder a los requerimientos de su trabajo tiene sus límites. Es por esto, que uno de los principios básicos de la ergonomía es el adaptar la actividad a las capacidades y limitaciones de los usuarios y no a la inversa.

Ahora bien, la definición de lo que se entiende por ergonomía no siempre ha sido la misma, pues al igual que muchas otras ciencias, su significado y finalidad han ido evolucionado con el paso del tiempo. Por esta razón, a continuación, se hace un breve repaso de la historia de la ergonomía y su relación con el hombre.

¹Las referencias del subcapítulo 1.1 pertenecen a [1, 2, 3, 4, 5]

1.1.1. Historia de la ergonomía

El hombre primitivo se convirtió en ser social, porque el andar solo lo hacía una criatura vulnerable, defecto que resolvió empezando a reunirse en grupos. Cuando el hombre se volvió sedentario, los grupos se hicieron cada vez más grandes hasta convertirse en comunidades. A partir de entonces, para satisfacer sus necesidades, el hombre hizo uso de herramientas, que magnificaban sus facultades para sobrepasar sus propias limitaciones, herramientas que se fueron perfeccionando a la par del avance tecnológico.

Estos avances hicieron obligatorio el desarrollo de un método de diseño que superara a los procesos de elaboración antiguos; entonces, como consecuencia del cuestionamiento de las ventajas de los primeros objetos de producción industrial a finales del siglo XVIII, apareció el diseño industrial. En términos generales, el diseño industrial es una actividad que tiene por vocación, después de un exhaustivo análisis tecnológico, económico y estético, la creación de formas, materias, colores y estructuras que permitan mejorar todos los aspectos del entorno humano condicionados por la producción industrial.

No fue, sino hasta mediados del siglo XIX, que surgió la ergonomía, estudiando únicamente la incidencia de la fisiología en los procesos industriales. En 1857, el biólogo polaco Wojciech Bogumil Jastrzebowski fue quien por primera vez utilizó el término 'ergonomía', acuñó el término en su artículo *Ensayos de Ergonomía o Ciencia del Trabajo* como el estudio de la incidencia de la fisiología humana dentro de los procesos industriales.

Son ambas guerras mundiales las que impulsan a los estudios ergonómicos, aplicándola en la adaptación del hombre a los aparatos bélicos. A estas alturas, solamente se aplica el aspecto de la antropometría, fabricando herramientas y objetos con dimensiones para ciertas medidas del cuerpo humano establecidas y estandarizadas, sin tomar en cuenta del todo los límites admisibles en términos de salud y seguridad.

Fue durante el periodo de la posguerra en que el término 'ergonomía' comenzó a ampliarse, cuando las prioridades del desarrollo industrial comenzaron a anteponerse a las prioridades militares. Inmediatamente después de la guerra, la finalidad de la industria, era el aumento de la productividad; esto competía al campo de acción de la ergonomía, ya que la magnitud de la producción estaba determinada directamente por el esfuerzo físico de los trabajadores.

Debido a que el rendimiento de una máquina o un sistema estaba limitado por el rendimiento humano, la flexibilidad para permitir la adaptación del usuario para con el sistema se fue volviendo necesario. Así, la ergonomía, como la adaptación entre la ingeniería y diseño y las necesidades del usuario, fue cada vez más necesaria y factible como proceso, gracias a la tecnología.

Sin embargo, al empezarse a producir las cosas con mayor rapidez, los riesgos de accidentes también aumentaron. Entonces el enfoque de la ergonomía volvería a cambiar. Fue en la década de los sesenta y principios de los setenta cuando la preocupación principal iría de la productividad a la seguridad.

A partir de entonces, surgirían varios ergónomos que le darían su propia definición a la ergonomía:

- **Murrell (1965)** - es el estudio del ser humano en su ambiente laboral.
- **Singleton (1969)** - la interacción entre el hombre y las condiciones ambientales.
- **Faverge (1970)** - análisis de los procesos industriales centrado en los hombres que aseguran su funcionamiento.
- **Cazaminan (1973)** - estudio multidisciplinar del trabajo humano que pretende descubrir sus leyes para formular mejor sus reglas.
- **Wisner (1973)** - conjunto de conocimientos científicos relativos al hombre y necesarios para concebir útiles, máquinas y dispositivos que puedan ser utilizados con la máxima eficacia, seguridad y confort.
- **McCormick (1981)** - relacionar las variables de diseño, por una parte, y los criterios de eficacia funcional y bienestar para el ser humano, por otra.

Por último, se tiene la definición adoptada desde 2000 por la Asociación Internacional de la Ergonomía (IEA, por sus siglas en inglés), asociación creada a partir la fusión de diferentes organismos nacionales individuales de distintos países: “la ergonomía es una disciplina científica de carácter multidisciplinar, que estudia las relaciones entre el hombre, la actividad que realiza y los elementos del sistema en que se halla inmerso, con la finalidad de disminuir las cargas físicas, mentales y psíquicas del individuo y de adecuar los productos, sistemas, puestos de trabajo y entornos a las características, limitaciones y necesidades de sus usuarios; buscando optimizar su eficacia, seguridad, confort y el rendimiento global del sistema”.

1.1.2. Objetivos

El objetivo de la ergonomía es el estudiar las capacidades y limitaciones del hombre, para poder aplicar estos conocimientos en la mejora de la interacción del usuario con los productos. Estos estudios se realizan mediante el análisis de las limitaciones preceptivas, motrices, de capacidad de respuesta, de las restricciones, en fin, que suponen las características físicas del producto al potencial de las acciones humanas; brindando información, para el diseño –o rediseño– de un producto, que optimicen el trabajo que el usuario realiza. La optimización del trabajo del hombre recae en el complementar y magnificar sus capacidades, aligerar la carga y brindarle comodidad y bienestar mientras dicho trabajo se lleva a cabo.

Así, la ergonomía se encarga de determinar las condiciones óptimas de trabajo que existen en el cuerpo. Pero también se encarga de explorar los efectos adversos que se producirían en el caso de que estos límites fuesen superados y ver cómo es que repercute en los resultados. Desde este punto de vista, su enfoque está dirigido a identificar y reducir los riesgos de error, las molestias al usuario, pérdidas en la productividad y disminución en la calidad que podría provocar algún producto por tener fallas de diseño. Se podría decir que su interés es anticiparse a las condiciones del objeto y prevenir que algún inconveniente suceda de modo que la actividad se ejecute con los mejores resultados posibles.

El fruto de la ergonomía se puede ver directamente reflejado en aspectos concretos que se pueden diferenciar unos de otros:

- **Productividad y calidad** - la producción por unidad de tiempo y de la relación inversión-ganancia de recursos.
- **Fiabilidad y efectividad** - el correcto funcionamiento del producto; fácil de medir después obtenido el resultado, pero difícil de predecir.
- **Seguridad y salud** - conceptos que no es posible medir directamente, su valoración se mide más bien por la ausencia de las situaciones adversas.
- **Calidad del trabajo** - satisfacción por parte del usuario.

El papel que desempeña la ergonomía consiste en definir los métodos que garanticen una relación hombre-objeto completamente armónica y equilibrada, métodos que se aplican siempre tomando en cuenta la efectividad de los beneficios y su viabilidad económica. De lo que finalmente se trata, es hacer uso óptimo del trabajo humano como recurso, haciendo el trabajo más ergonómico, es decir, más humano.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que, más allá de la comodidad del usuario, lo que se pretende es conseguir un fin en situaciones determinadas, lo que significaría el desarrollo de cierta habilidad sobre alguna otra. Ejemplo de esto, es la industria automovilística: la ergonomía es importante no solo en la fabricación de automóviles con las dimensiones suficientes para que el usuario esté cómodo en los asientos, que la visibilidad sea buena, la facilidad de entrar y salir, todo esto tomando en cuenta el tamaño y la fuerza de los posibles conductores; por otro lado, para un auto de carreras, se preferirá sacrificar la comodidad en aras de que se consiga, mediante la habilidad del piloto, la máxima velocidad que el vehículo pueda desarrollar.

1.1.3. La ergonomía como ciencia

La ergonomía, como ciencia que tiene por objeto de estudio al ser humano y cuyas bases se encuentran en la ingeniería y la medicina, es natural e inevitable que se apoye con disciplinas complementarias derivadas de las ciencias humanas como son la anatomía, fisiología, la biomecánica, la psicología, volviéndola en sí misma una ciencia multidisciplinaria. Haciendo hincapié en que el objetivo principal de la ergonomía es el ser humano y debido a que sus raíces se hallan en el campo de la ingeniería, la ergonomía también es denominada como ingeniería humana.

Considerada en un principio como la disciplina más importante de la ergonomía, la antropometría se encarga de dimensionar las partes del cuerpo humano; cuantifica las medidas anatómicas, describe sus diferencias y se ocupa de calcular las porciones que existen entre sus diferentes estructuras. Por ejemplo, un acotamiento corporal con cortes transversales, permitiría apreciar tridimensionalmente alguna parte del cuerpo y, de esta forma, adaptar el entorno a las medidas corporales.

De la mano con la antropometría, se encuentra la biomecánica que, a diferencia de la primera, estudia las posiciones del cuerpo humano resultantes del movimiento: busca explicar su funcionamiento aplicando las leyes de la física, analizando cada uno de sus elementos que intervienen en el desarrollo del movimiento (huesos, tendones,

músculos, articulaciones) y aplicando las leyes de mecánica de estructuras. Para la ergonomía, el interés de entender al cuerpo humano en movimiento reside en la necesidad de establecer los límites de capacidad de alcance, fuerza, velocidad y fatiga del cuerpo; además de conocer los rangos que tengan los movimientos de rotación. Claro está, estos valores no solamente dependerán de las diferencias anatómicas que puedan existir, sino también de otros factores como edad, sexo, posición del cuerpo y la tarea que se esté desempeñando. Con ayuda de la biomecánica, se pretende responder a la necesidad de hallar la adaptación física entre el cuerpo humano en actividad y los componentes del espacio que lo rodea.

Otra disciplina que tiene por labor abordar estudios relacionados a factores biológicos del cuerpo humano, es la fisiología. La fisiología se refiere al hombre como organismo dinámicamente activo y tiene por objeto estudiar las cualidades y funciones orgánicas observables y medibles como consumo de energía, las posturas, capacidades musculares y aplicación de fuerzas.

Siendo que la ergonomía es una ciencia, para que sus resultados tengan validez como tal, es necesario que sus estudios se apliquen bajo el modelo del método científico. Esto es, un conjunto ordenado y sistematizado de acumular conocimiento para la ciencia en cuestión: partir de una teoría bien fundamentada, establecer objetivos cuantificables y constatar los resultados con los objetivos. A grandes rasgos, las etapas del método científico están ordenadas como: hipótesis, experimentación, observación y medición, análisis, comprobación o refutación de la hipótesis. Para el caso del estudio de la ergonomía, las etapas de su método de estudio pueden definirse de la siguiente manera:

1. **Análisis de la situación:** cuando aparece algún tipo de conflicto que deba solucionarse o una situación que pueda mejorarse.
2. **Diagnóstico de propuestas:** destacar las variables relevantes en función de su importancia para el caso y diferenciarlas de la información trivial, para así proponer una solución a la situación.
3. **Experimentación:** simulación o modelado de las soluciones propuestas y sus posibles respuestas.
4. **Validación de los resultados:** recoger la información pertinente para determinar el grado de efectividad de las propuestas, hacer una valoración económica de la intervención y análisis de fiabilidad.
5. **Retroalimentación:** seguimiento del caso de estudio, analizar los valores obtenidos y compararlos a los valores pretendidos.

La normalización de la ergonomía surge en 1970 junto con la fundación de los primeros comités internacionales como la ISO (Organización Internacional de Normalización, por sus siglas en inglés); su objetivo era establecer principios y conocimientos ergonómicos que garantizan la salud y seguridad, necesarios en el diseño de productos y sistemas de trabajo. La normalización de la ergonomía inicia con un enfoque protector y preventivo cuyos propósitos eran: garantizar que las tareas asignadas no sobrepasaran las capacidades del trabajador y evitar tareas que pudieran producir lesiones o cualquier efecto dañino.

1.2. Ergonomía de la mano

Como se ha mencionado, la ergonomía es la ciencia que estudia la interacción del ser humano con los objetos, y puesto que la interacción principal que tenemos con los objetos es con las manos, es natural que se busque la manera de cuantificar esta interacción.

La ergonomía está íntimamente relacionada con la comodidad. Desgraciadamente, la comodidad no es un aspecto fácil de evaluar; de hecho, se trata de un elemento de carácter cualitativo, más que cuantitativo, lo que significa que no es posible asignarle magnitud ni unidad alguna.

Ahora bien, el sentido del tacto está involucrado en un sinnúmero de actividades cotidianas, por lo que un producto que sea cómodo y agradable al tacto es vital para que un este ayude a desempeñar las habilidades manuales para las que fue hecho, sin producir fatigas o incomodidades.

La intención que tienen los productores es desarrollar un diseño que otorgue el máximo confort en condiciones de uso, mientras se trata de mantener el costo de manufactura y producción lo más bajo posible. Pero considerando que existen claras diferencias anatómicas entre las personas, es de imaginar que un objeto no se adapte a las dimensiones de todos los usuarios, pues la persona “promedio” no existe.

Adicionalmente, se debe hacer énfasis en que una misma persona puede sostener un objeto de muchas maneras, ora en la posición de los dedos, ora en las fuerzas ejercidas para asirlo. Por tanto, el desafío del productor se encuentra en diseñar objetos que sean cómodos y fáciles de usar para una amplia densidad demográfica, a la vez de que este diseño plantee que la forma de sujeción del objeto sea la misma durante todo el tiempo que se manipule y que, asimismo, la distribución de fuerzas se mantenga constante.

El mapeo de presiones es una tecnología que se utiliza para poder determinar la comodidad, más allá de saber la magnitud de la fuerza aplicada, se trata de conocer la distribución de las mismas, los cambios producidos durante su uso y la identificación de las zonas de alta presión dinámica. En cambio, con los sistemas de captura de movimiento, se puede ponderar la comodidad del agarre al comparar las posiciones, ángulos de flexión y separación entre sí de los dedos de la mano.

Estas son algunas características del diseño que se deben considerar a ser evaluados para el análisis ergonómico que se desee hacer de un objeto:

- morfología de las partes de agarre
- si el material del que está hecho beneficia o perjudica al agarre
- longitudes de las partes
- dónde y cómo se ejercen las presiones, si están mal distribuidas
- posiciones de agarre
- movimientos de mayor presión
- lugar donde se colocan los dedos

- si el asirlo causa algún tipo de fatiga
- si puede ser usado por diestros y zurdos

1.3. Fisiología de la mano

Para el desarrollo del proyecto no se consideró necesario poseer un gran grado de especialidad en lo que se refiere al conocimiento de la mano, ya que algunos sistemas (por ejemplo, el sistema musculoesquelético o el sistema nervioso) no tienen mayor incidencia en los alcances de este proyecto, por lo que basta con conocer de manera general la anatomía de la mano.

Por otro lado, cabe mencionar, que sí es relevante ahondar en lo que se refiere a la fisiología de la mano, esto con la finalidad de comprender las capacidades de movimiento que se tiene en la mano². Aunque el guante no medirá todos y cada uno de sus grados de libertad, es importante tener noción de todos estos movimientos, con el objeto de poder discriminar cuáles de ellos serán medidos por el guante y de cuáles se podrá prescindir.

La mano, la extremidad más distal del miembro superior, es el órgano de la prensión, actividad útil al ser humano para explorar y relacionarse con el ambiente que le rodea, volviéndola una de las partes más indispensables del cuerpo. Formada por un gran número de músculos y huesos, la mano está dividida en tres zonas: el carpo, los metacarpios y las falanges, se conecta a la muñeca a través de la palma (donde se encuentran los metacarpos).

La gran importancia de la mano también recae en el ejecutar movimientos en los tres planos del espacio. Iniciando por el carpo, que es el conjunto de huesos que conforman la muñeca, cuenta con movimientos de rotación en tres ejes:

Flexión-extensión

La flexión es el movimiento que aproxima la palma a la cara anterior del antebrazo, tiene una amplitud de 80° o, en algunos casos, llega hasta 90°.

La extensión endereza la mano, la aleja de la cara anterior del antebrazo, su movimiento depende de dos articulaciones que otorgan 50° y 30° respectivamente, resultando que cuando ambas articulaciones participan en el movimiento, se tiene un total de 80° (fig. 1.1).

Abducción cubital y radial

La abducción cubital aleja la mano del cúbito, desplazándose del eje transversal de la mano (determinado por el dedo medio) 25°, el dedo medio se coloca en el lugar del meñique.

La abducción radial, con un rango aproximado de 25°, aleja la mano del radio, esto es: el dedo medio pasa a ocupar el lugar del índice y el pulgar (fig. 1.2).

²Las referencias del subcapítulo 1.3. *Fisiología de la mano* pertenecen a [6]

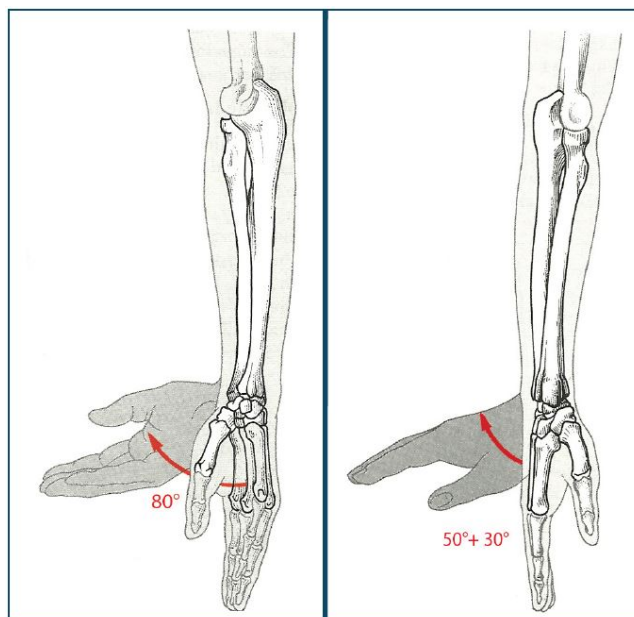


Figura 1.1: Flexión-extención. [6]

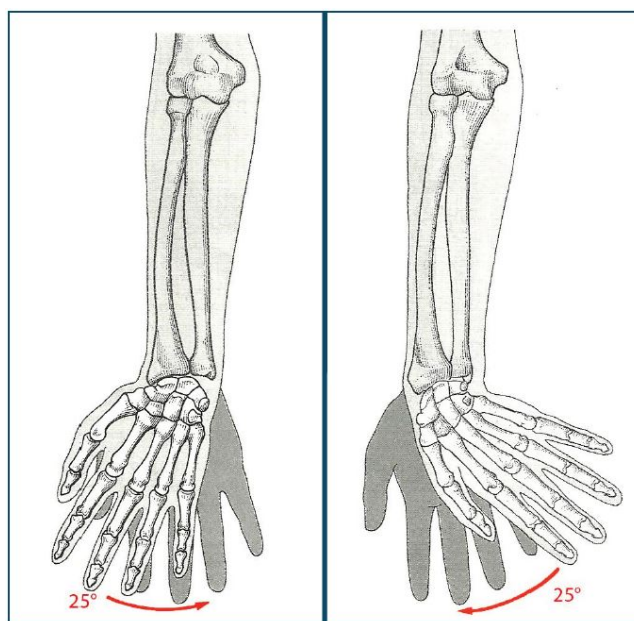


Figura 1.2: Abducción cubital y radial. [6]

Pronación-supinación

Movimientos donde intervienen los dos huesos del antebrazo, el radio gira alrededor del cúbito, el cual permanece como eje guía del antebrazo y la mano. La posición intermedia es aquella cuando, con el antebrazo colgando, la mano se encuentra extendida y el pulgar orientado anteriormente (hacia adelante).

En la supinación, los huesos del antebrazo se hallan paralelos entre sí, se muestra la palma (como cuando se hace un gesto de ofrecimiento). En la pronación, el radio cruza al cúbito: la palma gira inferiormente. De la supinación extrema a la pronación extrema existe un rango de 120° (fig. 1.3).

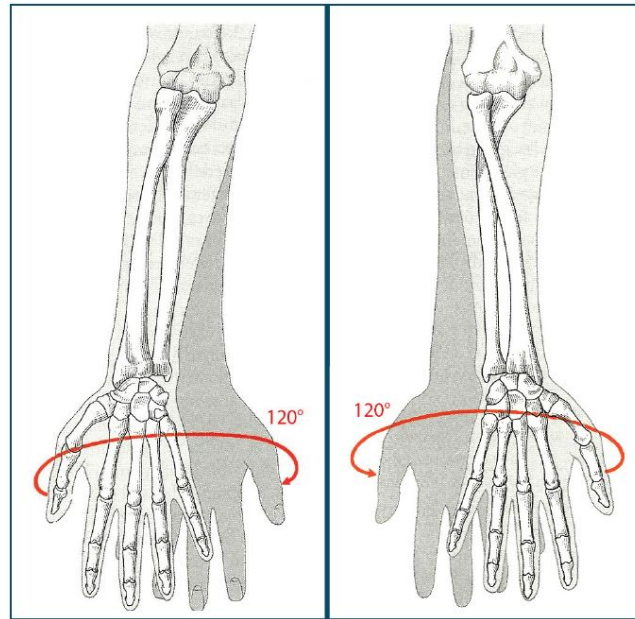


Figura 1.3: Pronación-supinación. [6]

Los dedos, cada uno de las cinco extremidades articuladas en que termina la mano, están compuestos por tres segmentos óseos llamados falanges: distal, media y proximal; a excepción del dedo pulgar que solo cuenta con distal y proximal.

- **Pulgar** - La importancia del dedo pulgar es evidente: su condición de dedo opuesto permite todos los tipos de presiones de fuerza y precisión que la mano es capaz de ejecutar; sin él, el resto de los dedos solo serían capaces de ejercer presiones globales en vez de movimientos precisos.
- **Índice** - Junto con el pulgar, constituye los elementos más importantes para la ejecución de los movimientos de presión fina y precisa.
- **Medio** - Su funcionalidad es la de ejercer mayores fuerzas en la presión, además de contribuir en gestos de precisión como la escritura.
- **Anular** - Ejerce menos fuerza que el índice y el medio, es una estructura auxiliar al momento de sostener objetos.
- **Meñique** - Su utilidad es la de dar a la mano una mayor capacidad de expansión; no obstante, a pesar de poseer su musculatura propia, su independencia de movimiento del dedo anular no es muy frecuente en las personas.

Son las articulaciones que unen los huesos de las manos las que permiten determinar, por su orientación y su forma, los ejes mecánicos que dotan de movimiento a los dedos, el cual se produce gracias a la acción de los músculos. Las articulaciones metacarpofalángicas (unen al metacarpo con la falange proximal) son esferoideas, lo que significa que sus movimientos se pueden efectuar tres ejes:

Flexión-extensión

Este movimiento se efectúa alrededor de un eje transversal al dedo en cuestión. Normalmente alcanza una amplitud de 90° respecto a su posición inicial

en extensión, ángulo que formaría la falange proximal respecto a la palma de la mano.

Para las articulaciones interfalángicas, que constan de un solo eje de rotación, su único movimiento es de flexión: la máxima flexión de la falange media sobre la proximal es de entre 110° y 130° , mientras que el ángulo de flexión de la falange distal sobre la falange media (no independiente de la anterior) es de 65° a 90° (fig. 1.4).

En todos los casos, la extensión no es considerada como un movimiento en sí, sino simplemente el movimiento de retorno a la posición inicial después de la flexión.

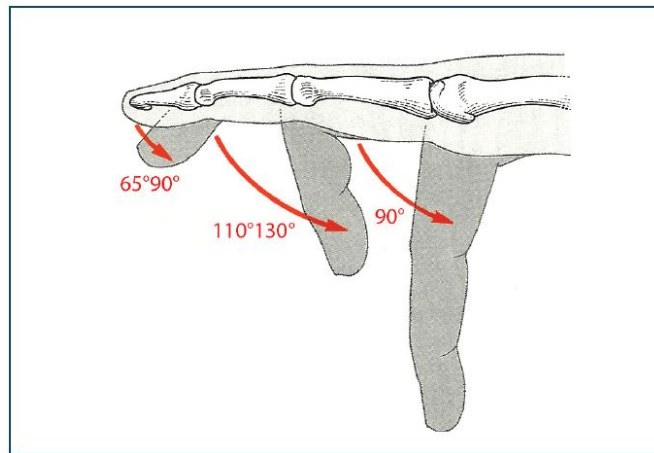


Figura 1.4: Flexión de los dedos. [6]

Aducción-abducción

Siendo que el dedo medio se considera como el eje medio de la mano, estos movimientos se toman respecto a la línea imaginaria que forma el dedo medio extendido. La aducción aproxima a los dedos entre sí. La abducción aleja los dedos de esta línea, el índice alcanza los 60° , el anular y el meñique logran 45° de separación (fig. 1.5).

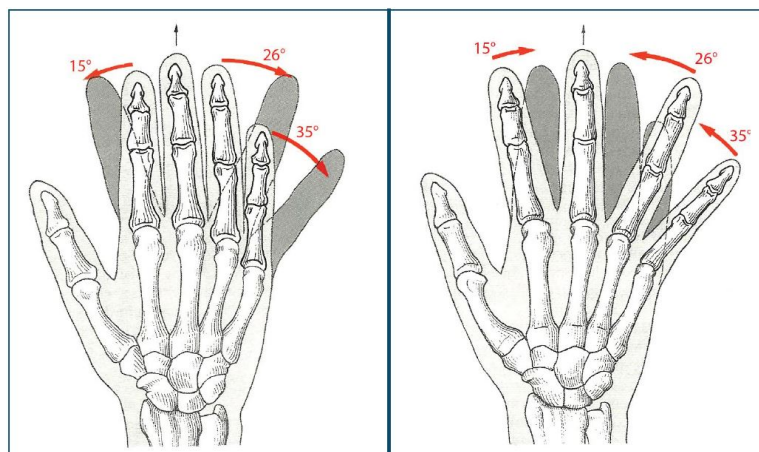


Figura 1.5: Abducción-aducción. [6]

Rotación

Se trata de un movimiento no voluntario, pues no hay músculos que permitan este movimiento; sin embargo, los dedos pueden hacer giros de 50° hasta 80° alrededor de su eje para acoplarse a la forma del objeto que se toma.

Como se ha mencionado anteriormente, el pulgar es vital para llevar a cabo todo tipo de prensiones necesarias en las actividades del día a día que, de otra forma, sin él, no serían posibles. Es de destacar la importancia del conjunto estructural que forma al pulgar, específicamente hablando, de sus articulaciones: la articulación carpometacarpiana confiere al dedo pulgar su orientación en el espacio y su posibilidad de rotación; las demás articulaciones (metacarpofalángica e interfalángica) producen los movimientos principales efectuados por el pulgar:

Abducción-extensión

Separa el dedo pulgar del eje de la mano y del resto de los dedos; la amplitud de este movimiento de apertura es de 35° a 40° (fig. 1.6).

Aducción

Aproxima el pulgar al eje de la mano; es el movimiento opuesto a la abducción-flexión (fig. 1.6).

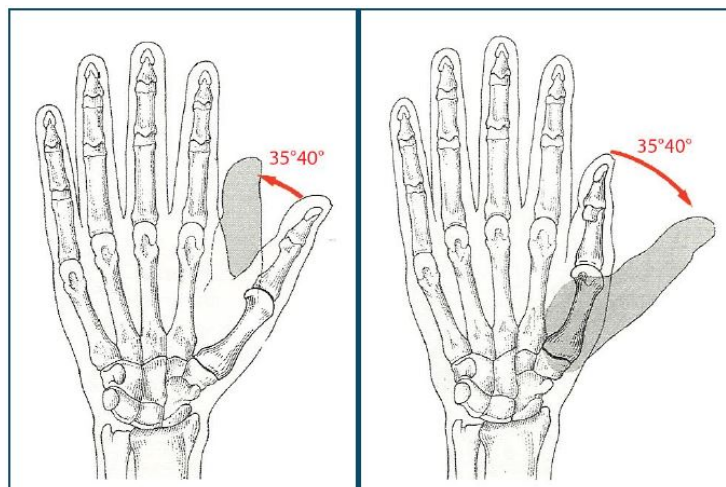


Figura 1.6: Aducción (izquierda) y abducción-extensión (derecha) del pulgar. [6]

Flexión

Movimiento que corresponde a la rotación de la única articulación interfalángica con la que cuenta el pulgar (fig. 1.7).

Oposición

Combinado con el movimiento de flexión, se trata de un movimiento de prensión o cierre de la mano, donde el pulgar se coloca frente al meñique; como su nombre lo dice, se opone al resto de los dedos. Presenta una amplitud mayor que los movimientos anteriores, alcanzando 45° e incluso 60° (fig. 1.8).

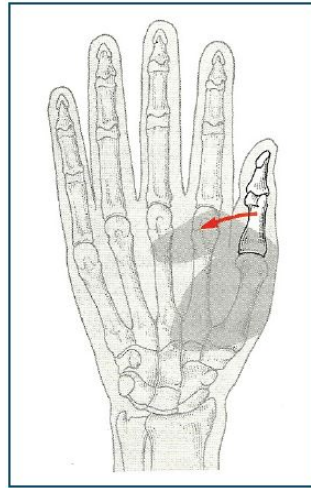


Figura 1.7: Flexión del pulgar. [6]

Reposición

La reposición devuelve el dedo pulgar a su posición inicial de reposo; su amplitud es necesariamente igual al movimiento precedente.

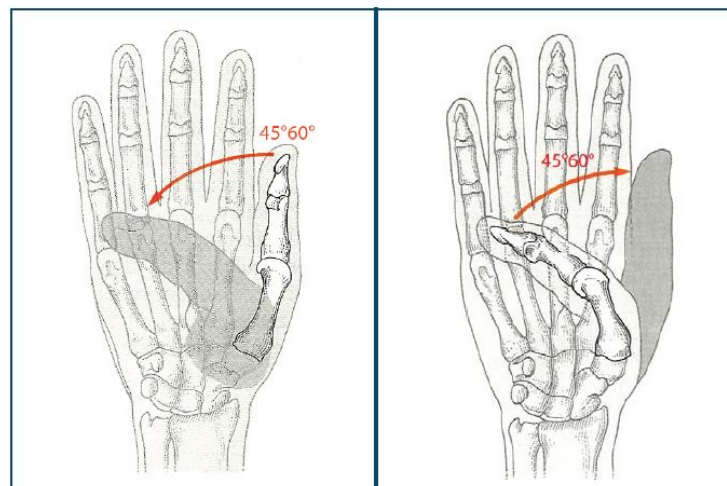


Figura 1.8: Oposición del pulgar. [6]

Capítulo 2

Estado del arte

Está claro lo importante e indispensable que son las manos, por esta razón, no es una sorpresa que exista una cantidad considerable de investigaciones enfocadas al desarrollo de tecnologías para estudiar la interacción de las manos a la hora de realizar tareas cotidianas. No solo campos de la ingeniería como la robótica y la realidad virtual se han visto beneficiados de estos estudios, sino también áreas como la biomecánica, la terapia y rehabilitación física, goniometría, e incluso como traductor de lenguaje de señas o en cualquier tipo de entrenamiento para mejorar cierta habilidad manual.

Actualmente en México existen dos guantes instrumentados patentados, desarrollados ambos en 2016, por la Universidad de Sonora [7] y la Universidad Autónoma del Estado de México [8] respectivamente. Dichos guantes se enfocan en el reconocimiento del lenguaje de señas mexicano (LSM) para su posterior traducción a texto. Por lo que estos guantes solo cuentan con la parte del seguimiento de la posición de la mano para su funcionamiento, mas no miden la presión individual ejercida por cada parte de la mano.

2.1. Guantes para la medición de fuerzas

El objetivo principal de estos guantes es cuantificar las diferentes fuerzas aplicadas por la mano humana al agarrar objetos, proporcionando información de la presión ejercida por cada dedo y distintas partes de la palma, la cual que es recopilada por los diferentes tipos de sensores, según sea el caso, distribuidos alrededor del guante. A continuación, se presenta una recopilación de algunos de los guantes existentes más destacados en los últimos 10 años para la medición de fuerzas.

2.1.1. TEKSCANTM Grip System [9]

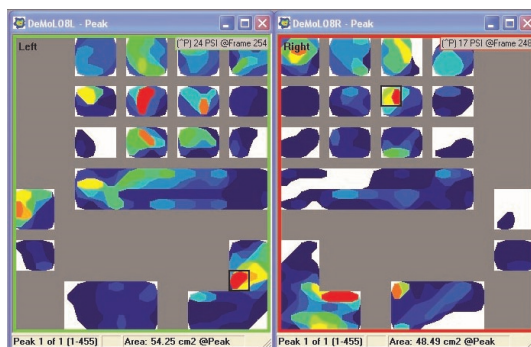
Descripción: Es una herramienta de mapeo de presiones que cuantifica y analiza las fuerzas estáticas y dinámicas ejercidas por la mano y los dedos mientras se sostienen, mueven o levantan objetos. Utilizado para evaluar el diseño de distintos productos, con la finalidad de mejorar su funcionalidad y

2.1. GUANTES PARA LA MEDICIÓN DE FUERZAS

ergonomía, mediante la medición de la cantidad de fuerza empleada para manipular un determinado objeto (agarrar, abrir, apretar, cerrar un contenedor, por ejemplo).

Especificaciones: 18 sensores táctiles de alta definición son adheridos, ya sea directamente en cada mano o sobre guantes, son posicionados en las secciones más importantes de los dedos y la palma. El *software* despliega una interfaz de presiones, donde se muestra exactamente dónde se hayan los picos de presión y cuánta fuerza es aplicada en las diferentes regiones de la mano (fig. 2.1a).

Aplicaciones: Evaluar la comodidad de un producto para mejorar la productividad de trabajos manuales. En deportistas ayuda en la enseñanza de técnicas para mejorar el rendimiento, pues se muestra cómo la presión de agarre de la herramientas o equipos deportivos se modifica durante su desempeño (fig. 2.1b).



(a) *Display* con las 18 regiones de presión de cada mano.



(b) Guante TEKSCAN™ utilizado en la ciencia del deporte.

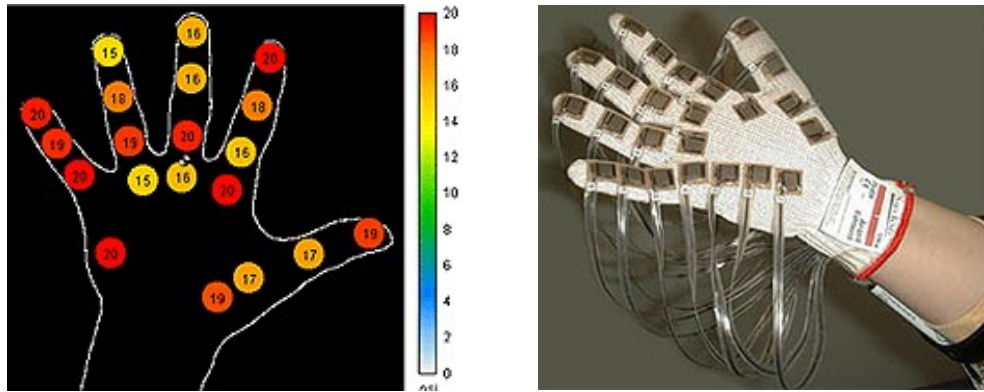
Figura 2.1: TEKSCAN™ Grip System. [9]

2.1.2. Glove Pressure Mapping System™ (GPMS) [10]

Descripción: El guante GPMS™ es un sistema de adquisición de datos de la fuerza ejercida por la mano que consiste en múltiples sensores adheridos a un guante, o directamente sobre un objeto. La ubicación de los sensores puede modificarse fácilmente por el usuario para incorporar distintas configuraciones (fig. 2.2b).

Especificaciones: el guante está incorporado por 20 sensores, los cuales soportan hasta 100 psi cada uno, cubiertos de una película de teflón para una mayor durabilidad. La conexión se hace de manera alámbrica vía puerto USB. El coeficiente de error en las mediciones menores al 10%. Cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario (fig. 2.2a)

Aplicaciones: El GPMS™ tiene varias aplicaciones en el campo de la ergonomía, incluyendo el análisis del agarre en herramientas manuales, asimismo para optimizar su diseño y calidad. También es utilizado en aplicaciones clínicas.



(a) Interfaz gráfica mostrando los 20 sensores.

(b) Configuración de la posición de los sensores.

Figura 2.2: Glove Pressure Mapping System™ por NexGen Ergonomics, Inc. [10]

2.1.3. ergoGLOVE™ [11]

Descripción: Es un sistema multisensorial de medición de fuerzas localizadas entre mano/dedos y superficies externas como herramientas o máquinas. Gracias a una comunicación inalámbrica, es posible el libre movimiento de la mano con la mínima interferencia durante el desempeño de la prueba (fig. 2.3a). Puede ser utilizado como un sistema de pruebas independiente o simultáneamente con otros sensores de HOGGAN Scientific, LLC.

Especificaciones: Su software despliega gráficas en tiempo real de los datos adquiridos por cada uno de los 16 sensores FSR (fig. 2.3b); además, la información de cada prueba es guardada en archivos con formato .csv (*comma separated value*) para ser utilizados en análisis posteriores.



(a) ergoGlove™.

(b) Sensores FSR utilizados en el guante.

Figura 2.3: ergoGlove™ por HOGGAN Scientific, LLC. [11]

Aplicaciones: El ergoGLOVE™ reúne datos fiables bajo condiciones reales de trabajo. Es utilizado en disciplinas donde la precisión de este tipo de mediciones es vital; como, por ejemplo, en rigurosas evaluaciones musculoesqueléti-

2.1. GUANTES PARA LA MEDICIÓN DE FUERZAS

cas que ofrecen resultados para la recuperación del paciente. También encuentra aplicaciones en campos como medicina del deporte, la industria aeroespacial y automovilística o en investigaciones académicas.

2.1.4. FingerTPS™ [12]

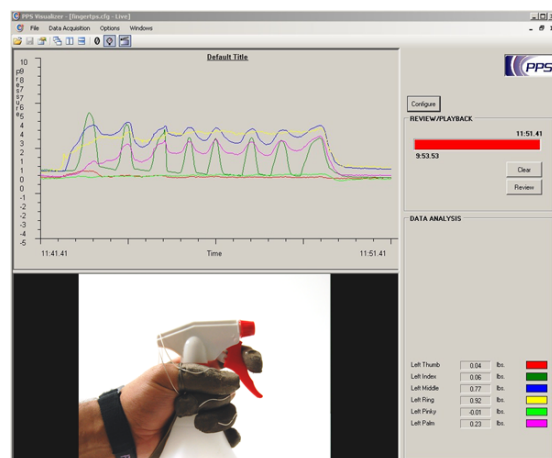
Descripción: Consiste en un arreglo de sensores capacitivos que permite hacer un mapeo de la distribución de presiones de contacto en la punta de los dedos y la palma al manipular objetos con las manos. La ventaja de utilizar sensores capacitivos es que, a diferencia de las tecnologías que utilizan sensores resistivos, es que estos ofrecen una mayor resolución y estabilidad, son más fáciles de calibrar, tienen repetibilidad en las mediciones, y son menos susceptibles al desgaste que los sensores resistivos. El dispositivo no es en sí un guante, sino una variedad de forros individuales para cada dedo (hechos a partir de un material elástico), lo que da la versatilidad de poder colocar estos forros únicamente en los dedos que se van a estudiar para una determinada prueba (fig. 2.4a).

Especificaciones: Los sensores se conectan a un acondicionador de señales que permite el acoplamiento de hasta 6 sensores. Utiliza el sistema Chamaleon, un *software* de adquisición y visualización de datos, que puede grabar y reproducir videos de los resultados de cada prueba para un análisis más profundo y despliega gráficas en tiempo real de la fuerza registrada por cada sensor (fig. 2.4b); durante la calibración se selecciona la cantidad y el posicionamiento de los sensores en cada mano y la unidad que se desea utilizar, ya sea *kilogramo*, *gramo*, *libra-fuerza* o *newton*.

Aplicaciones: Puede ser utilizado en procedimientos clínicos como entrenamiento y evaluación de la efectividad de alguna actividad en concreto o mapeos de presiones corporales; para saber si alguna fruta está en buen estado y lo suficientemente madura para ser comida con solo apretarla; o para evaluar la interacción del usuario con herramientas, equipos deportivos y mejorar el diseño de los mismos.



(a) FingerTPS™.



(b) Chemaleon *software*.

Figura 2.4: FingerTPS™ por Pressure Profile Systems, Inc. [12]

2.2. Dispositivos para medir los movimientos de la mano

Los sistemas desarrollados para rastrear los movimientos de las manos, a diferencia de los dispositivos para la medición de fuerza mencionados anteriormente, no están confinados forzosamente a ser implementados a un guante para lograr su objetivo pues, dependiendo de la tecnología que utilicen, los sensores empleados pueden no ser de contacto, sino ópticos. Enseguida, se mencionan algunos de los dispositivos desarrollados para el seguimiento posicional de la mano y los dedos más notables.

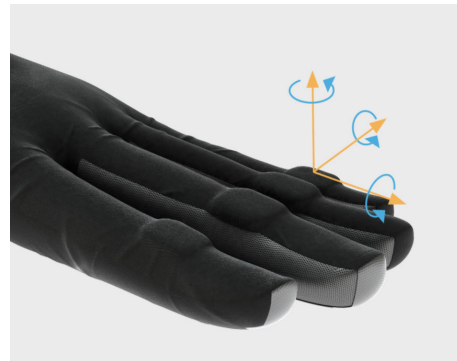
2.2.1. Avatar VRTM [13]

Descripción: Avatar VRTM es un guante compuesto por diferentes elementos los cuales, controlados por un circuito electrónico embebido, conforman un sistema de seguimiento de la parte superior del cuerpo, detectando con gran exactitud los movimientos del pecho, los brazos y las manos. En conjunto con el guante, bandas de seguimiento, colocadas en el pecho y antebrazos del usuario, son utilizadas como puntos de referencia relativos respecto a la posición del usuario, determinada por el sistema de seguimiento de un visor de realidad virtual (HMD, por sus siglas en inglés) (fig. 2.5a).

Especificaciones: Cuenta con 10 sensores, uno en la punta de cada dedo y los 5 restantes cubren la palma de la mano. Además, 7 sensores IMU distribuidos en el guante permiten un seguimiento completo del movimiento de los dedos, a diferencia de los sistemas que emplean sensores de flexión los cuales solo permiten un grado de libertad (fig. 2.5b). Material conductivo en la punta de los dedos índice, medio, pulgar y en la palma permite el reconocimiento preciso de gestos para realizar acciones específicas predefinidas. Una vez instalado el *software*, el dispositivo Avatar VRTM puede conectarse a una computadora ya sea vía USB o Bluetooth. Asimismo, posee un sistema háptico de retroalimentación que, con arreglos de actuadores vibratorios, da la sensación realista de tacto.



(a) Avatar VRTM y bandas de seguimiento.



(b) Posicionamiento de los sensores IMU.

Figura 2.5: Avatar VRTM por NeuroDigital Technologies, S.L. [13]

Aplicaciones: Su principal aplicación yace en el terreno de la realidad virtual, pues la combinación de poder ‘tocar’ objetos virtuales sumado a la poderosa tecnología de seguimiento del Avatar VRTM, provoca una sensación realista de inmersión deseada en videojuegos o en cualquier ambiente virtual.

2.2.2. Leap MotionTM [14]

Descripción: Considerado uno de los sistemas más avanzados para el reconocimiento de los movimientos de las manos, Leap MotionTM cuenta con una tecnología rápida, precisa y poderosa que te permite. Es un dispositivo en el que se utilizan las manos al descubierto, sin necesidad de colocar sensores o marcadores, al momento de interactuar dentro la realidad virtual y aumentada (fig. 3.7a). Para una experiencia más completa dentro de un ambiente virtual, es decir una inmersión más convincente y plena, se puede utilizar junto con un visor de realidad virtual, para así lograr que lo real se combine con un mundo virtual en una misma experiencia (fig. 3.7b).

Especificaciones: El principio de funcionamiento del Leap MotionTM está basado en un par de cámaras con sensores sensibles a la luz infrarroja (longitud de onda de 850nm), los 3 LED que conforman el dispositivo se encargan de iluminar la zona de cobertura y cuando la luz que incide en las manos del usuario es reflejada hacia las lentes biconvexas de las dos cámaras; de la imagen capturada, por medio de un mallado de pixeles activos, se obtienen los parámetros de profundidad a partir de la distorsión de este mallado calculando la posición de las manos mediante algoritmos de visión estereoscópica (la integración de la imagen de cada lente en una sola imagen tridimensional). No presenta problemas con los cambios de iluminación; una alta velocidad en la captura de imágenes hace posible que el seguimiento y reproducción de los movimientos de las manos sean suavizados, dando una apariencia de movimiento orgánico y natural; además no se produce el fenómeno que ocurre cuando una celda se satura de luz y hace que las celdas aledañas también se saturen, conocido como el efecto *blooming*. La interacción es sumamente intuitiva, además de contar con videos interactivos para demostrar su funcionamiento. [15]



(a) Funcionamiento del Leap MotionTM. [14]



(b) Leap MotionTM incorporado a un HMD. [15]

Figura 2.6: Leap MotionTM.

Aplicaciones: Utilizado en un sinnúmero de aplicaciones, algunos ejemplos son: simulaciones para entrenamiento o entretenimiento, diseño (automotriz, arquitectónico, de interiores), prototipado de modelos 3D, robótica, animación, terapia y rehabilitación en pacientes, dibujos en 3D, escáner de la anatomía humana y animal, o el despliegue y control de menús para cualquier tipo de necesidad.

2.2.3. Virtual Motion Glove™ [16]

Descripción: VMG™ es un guante de realidad virtual capaz de registrar de manera detallada los movimientos de los dedos y de la mano, permitiendo que los usuarios interactúen con entornos virtuales en tiempo real. Todos los modelos cuentan con una batería de alta duración y la conexión puede ser tanto alámbrico por puerto USB o inalámbrica vía Bluetooth.

Especificaciones: Dependiendo del modelo, los guantes pueden contar hasta con 30 mediciones de ángulos en las articulaciones altamente precisos: 1 o 2 sensores de flexión por dedo, 5 sensores de presión (1 en la punta de cada dedo), 4 sensores de abducción-aducción de los dedos, sensores de flexión en el arco de la palma y para el cruce del pulgar, sensores IMU para determinar orientación de la palma y muñeca. Incluso, los modelos más avanzados, cuentan con actuadores de retroalimentación háptica que vibran, al interactuar con el entorno virtual. Los sensores, de alta precisión, son de flexión y presión, por lo que se evita la interferencia magnética (fig. 2.7).

Aplicaciones: Con una calibración y control del software intuitivo, los Virtual Motion Gloves™ son guantes de recopilación de movimientos multipropósito, teniendo sus principales aplicaciones en la animación, robótica y aplicaciones médicas.



Figura 2.7: Guante y software del VMG™ por Virtual Motion Labs®. [16]

2.2.4. CyberGlove™ [17]

Descripción: Es un guante instrumentado para la captura de datos del movimiento de las manos y los dedos (fig. 2.8a). Tiene la capacidad de añadir sistemas de retroalimentación para dar la sensación de tacto, ya sea a través

2.2. DISPOSITIVOS PARA MEDIR LOS MOVIMIENTOS DE LA MANO

de estimulaciones por medio de vibraciones o bien, a partir de un exoesqueleto que consta de 5 actuadores a modo de tendones que son utilizados para evitar la penetración de objetos virtuales sólidos u objetos reales manipulados robóticamente por telecontrol y así poder sentir su forma y tamaño.

Especificaciones: Ofrece la información de los ángulos de 22 articulaciones medidas a partir de sensores resistivos de flexión: 3 por cada dedo, 4 para la abducción, más sensores para el pulgar, el arco de la palma y otros tantos para la aducción y abducción de la muñeca. El *software* muestra en tipo real, una mano virtual que reproduce los movimientos realizados (fig. 2.8b). El guante está hecho de una tela elástica para ajustarse a distintos tamaños de manos, además las puntas de los dedos abiertas para permitir libremente la escritura y el poder agarrar objetos. La conectividad puede ser alámbrica o inalámbrica.

Aplicaciones: El CyberGlove™ ha sido usado en una amplia variedad de aplicaciones como, por ejemplo, evaluación de prototipos digitales, biomecánica en realidad virtual, animación, control robótico (fig. 2.8c), entrenamiento médico e incluso para el reconocimiento del lenguaje de señas.



Figura 2.8: CyberGlove™ por CyberGlove Systems, Inc. [17]

2.3. Otros proyectos relevantes

2.3.1. 5DT Data GloveTM [18]

Diseñado para satisfacer las rigurosas capturas de movimiento que necesita la animación profesional, ya que su alta calidad y velocidad de datos permite que se ejecuten animaciones realistas en tiempo real. El método para la determinación de la curvatura del dobléz de cada dedo es determinada por sensores de fibra óptica totalmente cerrados. Una de sus más grandes ventajas es la autocalibración, de sus hasta 14 sensores por guante (izquierdo y derecho), que realiza el software para delimitar los umbrales de abducción/aducción de los dedos. La interfaz del sistema se puede comunicar vía cable USB o inalámbricamente vía Bluetooth. Cuenta con batería de gran duración y el guante se ajusta a varios tamaños de mano debido a su tela elástica (fig. 2.9a).

2.3.2. Enable Talk [19]

Presentado por primera vez en 2012, fue el proyecto que ganó la competencia de Microsoft Imagine Cup, consiste en un par de guantes instrumentados, junto con un dispositivo móvil y su respectiva aplicación, para lograr un sistema que es capaz de reconocer y traducir el lenguaje de señas. Esto se logra gracias al reconocimiento de los patrones y las secuencias recopilados a partir de la información dada por los sensores de flexión, sensores de contacto y giroscopios que conforman al guante. Con ayuda de la aplicación y conectado por Bluetooth, el sistema traduce el lenguaje de señas a texto y luego en palabras habladas. Fue creado con el fin de acortar la brecha comunicativa que tiene la gente con algún problema de habla o de audición y se ve en la necesidad de emplear lenguaje de señas para poder expresarse, pues muy pocos son los que lo entienden, haciendo que ellos estén de alguna forma socialmente aislados (fig. 2.9b).

2.3.3. Sensor de Presión Flexible [20]

A diferencia de los sensores de presión convencionales, los cuales solo pueden hacer mediciones sobre superficies más o menos planas, este sensor que puede emplearse sobre superficies redondas, de formas irregulares o incluso en movimiento. Hecho de un material transparente, orgánico y muy delgado, el sensor está estructurado por una malla de transistores que permiten que se mida simultáneamente la presión en 144 puntos de un objeto. El principal propósito de este sensor tan fino es el poder incorporarse a los guantes de goma y emplearse en la exploración mamaria para detectar posibles tumores; aunque también sería una herramienta útil en otros campos como la medición de presión en un vaso sanguíneo, en dispositivos wearables e incluso en el campo del deporte, para saber si la fuerza al agarrar una raqueta, por ejemplo, es la adecuada (fig. 2.9c).

2.3.4. Antilatency™ [21]

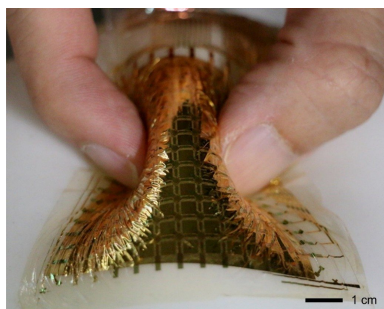
Es un sistema de seguimiento posicional que utiliza marcadores infrarrojos en barras de referencia colocadas en el piso, creando un patrón para determinar la posición dentro del entorno. El *hardware* ALT es pequeño, pero extremadamente efectivo: funciona bajo prácticamente cualquier condición de iluminación, abarca un rango de visión de 240° y la transferencia de datos es de forma inalámbrica. Gracias a que cuenta con un diseño modular, es compatible con la mayoría de *hardware* de visores existentes en el mercado (Oculus Rift, Samsung Gear VR, HTC Vive™, entre otros) y debido a que no utiliza cámaras, es una solución más barata, comparada con otras tecnologías de seguimiento posicional. Existe la posibilidad de que múltiples usuarios se encuentren a la vez dentro de la misma zona de seguimiento; además, el sistema puede rastrear no solo usuarios, sino objetos o partes específicas del cuerpo, permitiendo la inmersión de objetos del mundo real en un ambiente virtual (fig. 2.9d).



(a) Data Glove™ por 5DT, Inc. [18]



(b) Enable Talk, guante para traducir lenguaje de señas. [19]



(c) Sensor de flexión sensible, una posibilidad para detectar tumores malignos. [20]



(d) Sistema de seguimineto posicional Antilatency™ por grupo OpenXR Khronos. [21]

Figura 2.9: Proyectos relevantes.

Capítulo 3

Especificaciones y diseño conceptual

3.1. Características del guante

En el capítulo anterior se presentaron algunos de los dispositivos que existen en el mercado capaces de medir las diferentes fuerzas ejercidas por la mano y otros hechos para el seguimiento de su posición y movimientos. Pues bien, el guante que se diseñó tiene como propósito incorporar ambas funciones, esto con el objetivo de crear una herramienta que permita recopilar información de la interacción que se tiene al agarrar un objeto para así evaluar la comodidad del diseño y, por tanto, de la ergonomía de los productos, para posteriormente poder mejorarla.

Asimismo, es importante mencionar que muchas personas sostienen de diferentes maneras un mismo objeto las cuales no siempre son la forma óptima. A partir de los resultados que se puedan obtener con el guante diseñado, se busca hallar la mejor forma para sostener objetos de uso cotidiano.

De esta forma, con la optimización del diseño de productos comerciales, mediante el estudio de los diferentes movimientos de las manos, así como de las fuerzas ejercidas para sostenerlos, se pueden reducir esfuerzos innecesarios cuya repetición prolongada podrían provocar fatigas y dolores o, en el peor de los casos, lesiones, solamente por sujetar incorrectamente los objetos.

Para los sensores que se utilizaron en el guante, tanto de fuerza como de movimiento, se buscaban ciertas características físicas, así como de la señal de salida con que se harían las respectivas lecturas. A continuación, se muestran las características que eran deseables para la selección de los sensores:

los sensores no deben de interferir con los movimientos de la mano

- Físicas {
- **Tamaño:** dimensiones reducidas, no sobrepasar las dimensiones de la mano
 - **Peso:** ligeros, que el movimiento de la mano no requiera un esfuerzo adicional
 - **Durabilidad:** resistentes al desgaste por el uso, tiempo de vida útil
 - **Invasibilidad:** que no cause incomodidades ni entorpecimientos al usuario
 - **Implementación:** cantidad de componentes para ser implementado en el sistema

con la señal obtenida debe ser posible imitar los movimientos de la mano

- de Señal {
- **Procesamiento:** acondicionamiento de la señal para reproducir la interacción
 - **Respuesta:** velocidad de respuesta rápida, frecuencia de muestreo
 - **Resolución:** apreciación de cambios ante estímulos pequeños
 - **Confiabilidad:** misma respuesta con diferentes usuarios
 - **Repetibilidad:** misma respuesta ante un mismo estímulo
 - **Precisión:** valores estables ante estímulos constantes
 - **Interferencias:** no susceptible a perturbaciones que afecten a la señal

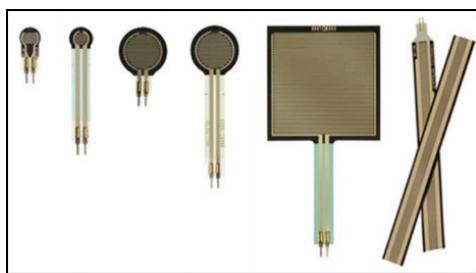
Ahora, una vez que se han establecieron las especificaciones con las que el guante debía cumplir, se analizaron las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías existentes para la medición de fuerza y de movimiento, respectivamente. Posteriormente, se elaboró una matriz de selección donde se comparan los conceptos que podrían dar una posible solución a las necesidades del guante, al final se eligió al componente que cumpliría satisfactoriamente la mayoría de los criterios evaluados.

3.2. Sensores de fuerza

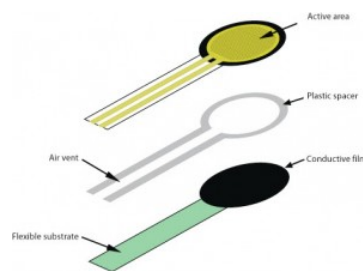
3.2.1. Sensores resistivos de fuerza [22]

Es un componente pasivo que actúa como un resistor de valor variable, cuya resistencia se reduce en respuesta a un aumento de la fuerza aplicada y viceversa. Consiste en dos membranas separadas por un pequeño espacio de aire gracias a una capa intermedia en los bordes de las otras dos; una de las membranas tiene una serie de electrodos que, cuando se presiona el sensor, hacen contacto con la superficie semiconductora de la otra membrana, provocando que la resistencia disminuya cuanta más fuerza se ejerza sobre el sensor (fig. 3.1b).

Sus dimensiones reducidas lo hacen fácil de incorporar a interfaces táctiles: es extremadamente delgado, ligero, y dependiendo del modelo el tamaño y geometría del pad, así como la longitud de la cola pueden variar (fig. 3.1a). Sus mediciones son bastante estables, pues cuando la presión ejercida sobre ella es constante, el valor de la resistencia se mantiene fijo; además estas mediciones son repetibles y de respuesta inmediata, lo cual hace de él un componente confiable.



(a) Distintos tamaños y geometrías de un FSR.



(b) Capas de un sensor resistivo FSR.

Figura 3.1: FSR (*force sensing resistor*). [23]

Ventajas: Son fiables, tamaño reducido, fáciles de implementar.

Desventajas: A pesar de ser flexibles, para trabajar correctamente deben de hacerlo sobre una superficie plana.

3.2.2. Galgas extensiométricas [24]

Las galgas extensiométricas son un tipo de transductores pasivos, es decir que convierten un estímulo en algún tipo de señal, en este caso convierten una deformación o desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Es un dispositivo delgado que está hecho a partir de dos capas de recubrimiento que en su interior albergan una lámina metálica conductora, cuya resistencia cambia a razón a la deformación longitudinal que sufra la galga: cuando se comprime (los canales conductores se vuelven más cortos y anchos), el valor de su resistencia se reduce; cuando se estira, la resistencia aumenta. Por tanto, la deformación de la galga permite calcular fácilmente el valor de resistencia, pues corresponde a cambios lineales. El cambio de la resistencia de la galga extensiométrica ΔR se describe como un valor proporcional al valor nominal de la resistencia de la galga R_0 , el factor de sensibilidad de la galga k (definido por el material de la lámina conductora) y la deformación del objeto ϵ (parámetro el cual será positivo cuando la galga esté en tensión o negativo si está a compresión) (ec. 3.1).

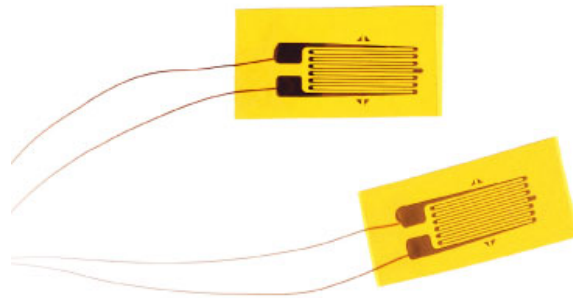


Figura 3.2: Galgas extensiométricas. [25]

$$\Delta R = R_0 * k * \epsilon \quad (3.1)$$

Ventajas: Son pequeñas, la naturaleza de las galgas extensiométricas permite cambios en el valor de la resistencia bajo estímulos por pequeños que sean, dando como resultado un sensor extremadamente preciso, exacto y de una resolución muy alta.

Desventajas: El proceso de manufactura es muy elaborado y por tanto, el precio de las galgas extensiométricas es elevado. Al ser tan sensibles, se ven afectadas por vibraciones. El esfuerzo aplicado debe de ser longitudinal al sensor. La resistencia de la galga puede cambiar por efecto térmico, lo que puede derivar en error en la medición. Si se somete a esfuerzos constantes y excesivos, se corre el riesgo de sobrepasar el punto de fluencia del material y deformarlo permanentemente.

3.2.3. Sensores capacitivos [24]

Este tipo de sensores utilizan la propiedad eléctrica de los capacitores la cual es la capacidad de almacenar una carga eléctrica, la capacitancia C dentro de dos placas paralelas depende de la distancia d entre ellas, y es directamente proporcional al área transversal A de las placas y a la constante de permitividad eléctrica ϵ_0 (ec. 3.2). Al aplicar fuerza sobre los sensores capacitivos, hace que las placas se encuentren más cercanas entre sí, originando un correspondiente cambio en la capacitancia: cuanto más se reduzca la distancia entre las placas, la capacitancia será mayor. Este principio aplica al transductor: una fuerza aplicada a un diafragma dieléctrico cambia la distancia entre este y la placa estática, el cambio resultante en la capacitancia es medible y por tanto, se vuelve posible conocer la fuerza aplicada; una vez se retira la fuerza ejercida, el diafragma hace las veces de resorte y devuelve a las placas a su posición inicial.

$$C = \epsilon_0 * \frac{A}{d} \quad (3.2)$$

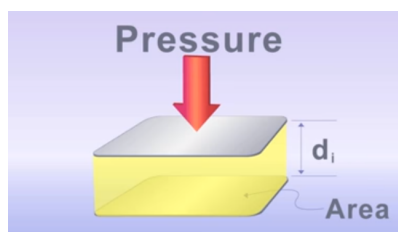


Figura 3.3: Principio de funcionamiento del sensor capacitivo. [12]

Ventajas: A diferencia de los sensores resistivos, los sensores capacitivos tienen una mayor resolución y estabilidad y debido al material con el que están hechos son menos propensos al desgaste. Se pueden hacer arreglos de sensores capacitivos para dar mayor resolución y exactitud al lugar donde es aplicada la fuerza.

Desventajas: Son sensibles a variaciones térmicas, la señal recibida suele ser grande y compleja, lo que hace necesario una etapa de procesamiento adicional.

3.2.4. Piezoeléctricos [26]

Los materiales piezoeléctricos son aquellos que, como el cuarzo, tienen la propiedad de producir una fuerza electromotriz, o bien, una diferencia de potencial o voltaje, cuando están expuestos a un esfuerzo mecánico, ya sea de tensión o de compresión. De esta forma se pueden medir no solo fuerzas, sino también aceleraciones y pulsos.

Ventajas: Alta sensibilidad, gran rigidez mecánica (por lo que no sufre deformaciones plásticas), la cantidad de carga es proporcional a la magnitud de la fuerza aplicada y esta es independiente del tamaño y forma del elemento piezoeléctrico; el voltaje que produce no se ve afectado por interferencia de campos electromagnéticos. No necesita de una fuente de alimentación externa.

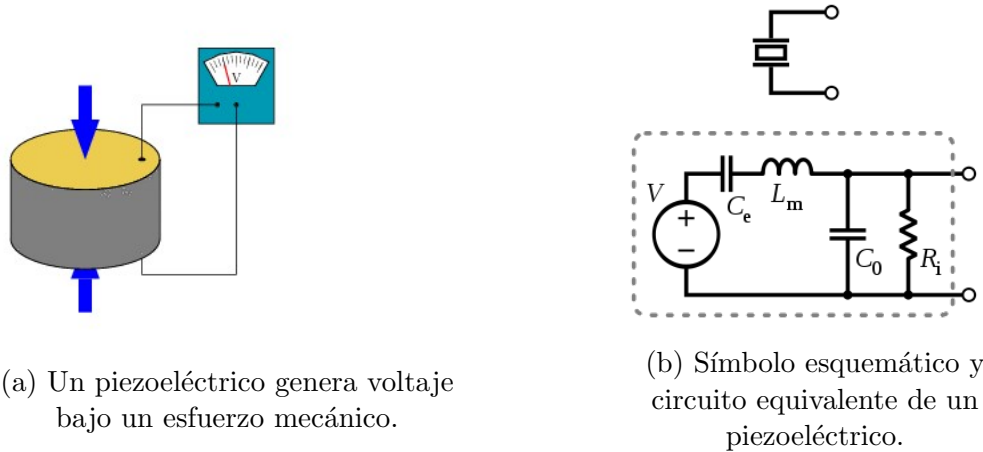


Figura 3.4: Piezoeléctrico como sensor de fuerza. [27]

Desventajas: La desventaja principal de éste es que no puede medir condiciones estáticas: una fuerza estática (sin importar si su magnitud es grande o pequeña) se traduciría en una deriva en la medición del voltaje generado que aumenta cuanto más tiempo transcurra. La impedancia de salida de los materiales piezoeléctricos es alta, por lo que para medir la señal generado hay que emplear amplificadores. Además, las variaciones de temperatura del cristal también afectan el voltaje de salida.

3.3. Sensores de movimiento

3.3.1. LED infrarrojo [28]

Su principio de funcionamiento es el siguiente: la luz emitida por un LED infrarrojo es recibida por un fotodiodo, y esta luz recibida puede ser traducida en una señal. Para el caso del guante, para poder medir los ángulos de los dedos de la mano, ambos elementos, emisor y receptor, estarían confinados dentro de un mismo elemento conector (como podría ser, tubos de fibra óptica); así, al flexionar los dedos, variaría la geometría del elemento conector y, de la misma manera, la cantidad de luz percibida por el receptor. Modulando esta variación de luz en el fotodiodo, se puede caracterizar la señal para obtener los distintos ángulos en que se flexionan los dedos.

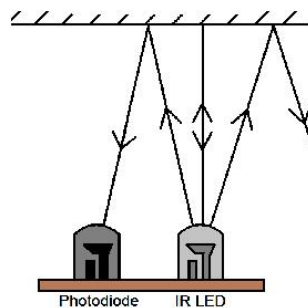


Figura 3.5: Principio de funcionamiento del LED infrarrojo - fotodiodo. [28]

Ventajas: Fácil instrumentación, es una solución barata. Al tratarse de luz, la conmutación de la señal en el receptor es inmediata.

Desventajas: Se necesitaría un par emisor-receptor por cada ángulo de articulación en los dedos. La exactitud y repetibilidad de la señal estaría comprometida directamente con la integridad del tubo conector, pues cualquier deformación (ya sea por la flexión de los dedos o por algún factor externo) daría como resultado cambios en la medición.

3.3.2. *Motion capture* [29]

Utilizado principalmente para realizar animaciones en la industria cinematográfica y de los videojuegos, la tecnología *motion capture*, transfiere movimientos reales a un cuerpo digital. El *motion capture* es un sistema que consiste en el seguimiento posicional, mediante cámaras fijas, de pequeños marcadores colocados en lugares específicos, que bien pueden ser ora LED parpadeantes, ora inertes como bolas blancas o simplemente puntos pintados. Las cámaras fijas se encargan de rastrear las posiciones de los marcadores, y al juntar la información recopilada por cada una de las cámaras, es posible crear un modelo 3D que reproduzca fielmente los movimientos del cuerpo real; pues con las diferentes perspectivas que se obtienen de las cámaras, se infiere la posición en el espacio de cada uno de los marcadores.

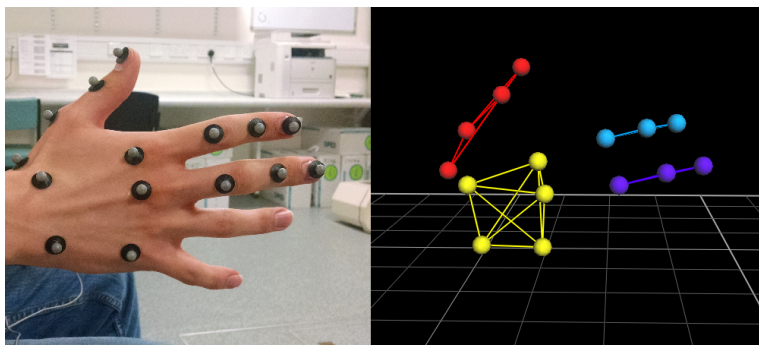


Figura 3.6: Marcadores colocados en la mano y su representación virtual. [30]

Ventajas: La posibilidad de resultados rápidos y en tiempo real, además de la poder imitar movimientos complejos dando a la animación la apariencia de una interacción realista.

Desventajas: Es una tecnología cara. La necesidad de crear algoritmos complejos para la correcta identificación y fluidez de los movimientos ejecutados.

3.3.3. *Sistemas ópticos sin marcadores* [29]

Existen dos métodos para los sistemas de rastreo óptico que no utilizan marcadores. El primero de ellos, consiste en la emisión de un haz de luz (generalmente de luz infrarroja) y un conjunto de cámaras que se encargan de captar la luz que es reflejada por los objetos al incidir sobre su superficie y así, después de una serie de cálculos, se determina su forma y su posición. Por otro lado, para el segundo método,

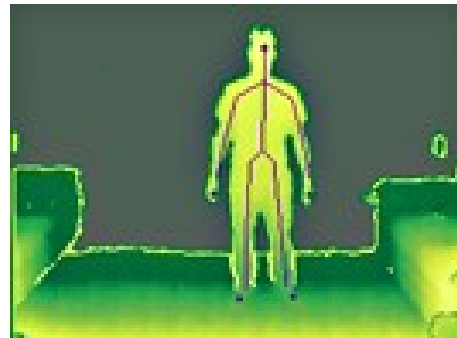
al programa se le “enseña” a reconocer los patrones de formas o figuras que debe de identificar, de esta forma la cámara captura los movimientos y posición del objeto identificado dentro de un área de lectura; a este tipo de sistema suele agregársele sensores de profundidad para poder ubicar con mayor exactitud a los objetos dentro un plano espacial.

Ventajas: No hay la necesidad de colocar marcadores o sensores de ningún tipo sobre el objeto que se desea seguir.

Desventajas: Se requiere de un sistema más robusto cuanto más sutiles son los movimientos que se quieren detectar, esto es, mayor número de cámaras y un software más potente para el procesamiento de la información. Los sistemas pueden verse afectados por cambios de iluminación o saturación de luz.



(a) Imagen capturada por una cámara infrarroja. [15]



(b) Reconocimiento de cuerpo por sensor Kinect™. [31]

Figura 3.7: Métodos de sistema ópticos sin marcadores.

3.3.4. Sensores de seguimineto acústico [29]

Su funcionamiento es similar al del sistema óptico sin marcadores de cámara infrarrojo: se basa en el poder captar el rebote de pulsos emitidos a alta frecuencia (generalmente ultrasónicos) sobre la superficie del objeto a identificar. De hecho, se basa en el mismo principio de la ecolocalización, que es el que utilizan algunos de los mamíferos marinos (los llamdos cetáceos) para orientarse dentro del océano o los murciélagos para volar y encontrar comida en la oscuridad: gracias al eco que producen los objetos que están a su alrededor.

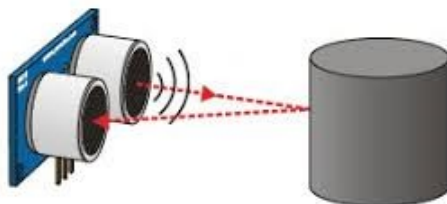


Figura 3.8: Sensor ultrasónico. [32]

Ventajas: Con algunos sensores ultrasónicos existe la posibilidad de poder inquirir, no solo la posición del objeto, sino también su orientación.

Desventajas: Los sensores ultrasónicos no son capaces de trabajar con movimiento bruscos. La respuesta en tiempo real podría verse afectada por un ligero retraso debido a la pequeña fracción de tiempo que tarda la onda sonora en ser emitida, rebotada y finalmente recibida. Se pueden sufrir de reflexiones acústicas si alrededor se encuentran otras superficies reflectantes acústicamente duras.

3.3.5. Sensores resistivos de flexión [33]

Al igual que los sensores resistivos de fuerza, se trata de componentes pasivos cuyo valor de resistencia eléctrica varía dependiendo de las condiciones de flexión en que se encuentre, es decir, si se encuentra recto o curvado. Está conformado por dos membranas, una de ellas (la superior) contiene partículas conductivas que dan cierto valor de resistencia al sensor; cuando el sensor se dobla, hace que las partículas conductivas se alejen entre sí, provocando que el valor de la resistencia se incremente; una vez el sensor resistivo regresa a su posición original, así también lo hace el valor de la resistencia.

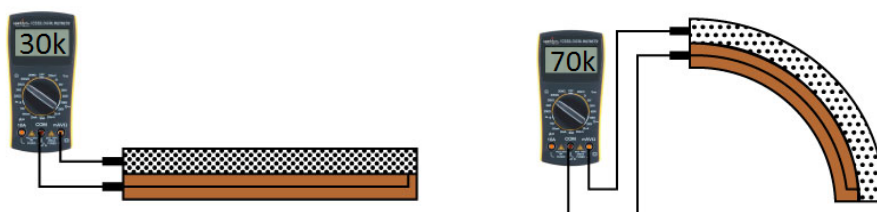


Figura 3.9: Esquema del funcionamiento de un *flex sensor*. [33]

Ventajas: Tratándose de sensores prácticamente planos y de longitud que varía dependiendo del modelo, son muy versátiles para la medición de ángulos específicos. Son muy ligeros y se trata de una solución barata.

Desventajas: Con este tipo de sensores no se puede determinar la posición que se ocupa en el espacio, solamente se puede cuantificar el cambio de ángulo de un objeto respecto a otro unidos mediante una junta rotacional. Con este sensor se puede registrar solo un grado de libertad, lo que significa, el cambio de ángulo alrededor de un único eje.

3.3.6. Sensores IMU [34]

Un sensor IMU (Unidad de Medición Inercial, por sus siglas en inglés), trabaja con 3 giroscopios que se encargan de medir su orientación en el espacio (*pitch*, *roll*, *yaw*) y 3 acelerómetros que, como su nombre lo dice, miden la aceleración en tres ejes, con lo que se puede precisar en qué dirección el sensor se está moviendo y la magnitud del movimiento, su velocidad y aceleración.

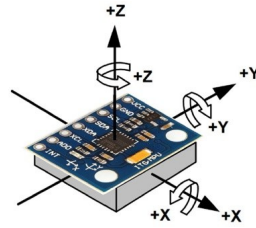


Figura 3.10: Sensor IMU y sus 6 GDL. [34]

Ventajas: Los IMU entregan 6 grados de libertad, lo que hacen de él un sensor muy útil cuando se quiere determinar la posición de algún objeto. Se puede calcular la posición relativa que se tiene respecto a otros sensores IMU.

Desventajas: Los errores que puedan entregar las mediciones del sensor son acumulativos, pues la medición de posición/orientación la hace respecto a la medición anterior, por lo que si el error no se corrige, la medición final derivaría en un error mayor.

3.4. Selección de conceptos

La selección de conceptos es el proceso de evaluación de cada tipo de sensor respecto a las necesidades del proyecto, se comparan entre sí y se consideran los puntos fuertes y débiles de cada posible solución. Al no poder dar una cuantificación precisa de los datos de especificación, el criterio bajo el que se objetivó la selección fue ponderando la importancia relativa que tienen unos respecto a otros. Para este caso en particular, el desarrollador fue quien realizó la evaluación de cada sensor como solución específica para el diseño del guante.

Criterio de Selección		Sensores de Fuerza							
		FSR		Galgas Extensiométricas		Sensores Capacitivos		Piezoeléctricos	
físico	tamaño (dimensiones)	▲	1	▲	1	▲	1	▲	1
	peso	▲	1	▲	1	▲	1	▲	1
	durabilidad	▲	1	▲	1	▲	1	▲	1
	invasividad	▲	1	▲	1	▲	1	■	0
	facilidad de implementación	▲	1	▼	-1	■	0	■	0
de señal	procesamiento de señal	▲	1	▲	1	■	0	▼	-1
	velocidad de respuesta	▲	1	▲	1	▲	1	▲	1
	resolución	■	0	▲	1	▲	1	▲	1
	confiabilidad	■	0	▲	1	▲	1	▲	1
	repetibilidad en mediciones	▲	1	▲	1	▲	1	▲	1
	precisión	▲	1	▲	1	▲	1	▲	1
	susceptibilidad a interferencias	▲	1	■	0	■	0	■	0
precio	▲	1	▼	-1	■	0	▼	-1	
evaluación		10		7		8		5	

Cuadro 3.1: Selección de sensor de fuerza.

3.4. SELECCIÓN DE CONCEPTOS

Criterio de Selección	Sensores de Movimiento									
	LED infrarrojo	Motion Capture	Sistemas Ópticos sin Marcadores	Seguimiento Acústico	Sensores Resistivos de Flexión	Sensores IMU				
físicas										
tamaño (dimensiones)	1	1	1	1	1	0				
peso	1	1	1	1	1	1				
durabilidad	1	1	1	1	1	1				
invasividad	1	0	1	1	1	0				
facilidad de implementación	0	-1	-1	0	1	1				
de señal										
procesamiento de señal	-1	-1	-1	-1	1	0				
velocidad de respuesta	1	1	1	0	1	1				
resolución	0	0	0	-1	0	1				
confiabilidad	0	1	1	0	0	1				
repetibilidad en mediciones	0	0	0	1	1	1				
precisión	0	0	0	0	1	1				
susceptibilidad a interferencias	-1	1	1	1	1	0				
precio	1	-1	-1	-1	1	0				
evaluación	3	2	3	2	10	8				

Cuadro 3.2: Selección de sensor de movimiento.

Otro factor que también se tomó a consideración dentro de la selección de conceptos, fue el precio de los sensores, pues el prototipo no debe de ser solo funcional sino también lo más económico posible, es decir, que con los sensores seleccionados el prototipo fuera menos costoso de producir a que si se hiciera con otro tipo de sensores.

Como se puede observar cuadro 3.1, el sensor que obtuvo un mayor puntaje dentro de la evaluación para sensores de fuerza fue el FSR, pues a pesar de no mostrar la mejor resolución o la mejor confiabilidad (ambos parámetros importantes para reproducir fielmente la fuerza ejercida por los dedos y mano), en cambio cuenta con otros criterios igual de importantes a su favor que los otros sensores no tienen. Ejemplo de esto es la facilidad de implementación, que en el caso específico de las galgas extensiométricas, al tener que aplicársele la fuerza longitudinalmente, implicaría que el sensor se tuviera colocar perpendicularmente al dedo, obstruyendo considerablemente la prensión de los objetos, razón por la que las galgas fueron descartadas inmediatamente. En el caso de los sensores capacitivos y los materiales piezoeléctricos, la mayor complicación que se tenía con ellos era que, a pesar de existir la tecnología de ambos sensores, hubiese sido necesario el desarrollo de los sensores como tal para ser utilizadas dentro de este proyecto en concreto.

Por otro lado, para los sensores que se encargarían de captar el movimiento de los dedos, aunque los criterios de selección fueron los mismos, las consideraciones fueron diferentes, como se puede apreciar en el cuadro 3.2. En lo que respecta al *motion capture*, los sistemas ópticos sin marcadores y los de seguimiento acústico, son tecnologías que, en productos ya comercializados, trabajan excepcionalmente bien, pero que, si se quieren desarrollar por cuenta propia, los criterios de señal como resolución, procesamiento, precisión, repetibilidad, dependerían directamente de la robustez de *hardware* y *software* al igual que de los algoritmos cuya complejidad se incrementaría cuanto mejor se quisieran reproducir los movimientos de la mano. El mayor problema que se tenía con la utilización de LED infrarrojos era que esta solución era muy susceptible a dañarse y, por tanto, de entregar información errónea. Los sensores que resultaron mejor evaluados en este campo fueron los sensores resistivos de flexión y los sensores IMU; la deficiencia que tenían los primeros respecto a los segundos, era que solo permiten la medición de un grado de libertad, mientras que los sensores IMU son capaces de entregar posición y orientación absoluta y relativa, pero puesto que no era necesario conocer la posición absoluta de cada parte de la mano, sino solamente los ángulos de flexión en cada articulación, además de ser una solución mucho más barata, se optó por escoger para el guante a los sensores resistivos de flexión.

Capítulo 4

Diseño del prototipo y de la interfaz

4.1. Definición de sistemas y subsistemas

El proceso del diseño inició con el análisis del guante como sistema, donde se tendría una entrada (interacción mano-objeto) con la cual, pasando por uno o varios subsistemas, se conseguiría una salida deseada (información para análisis ergonómicos, a la vez que observaba una reproducción de la interacción en tiempo real). Se llegó a la solución de que los subsistemas que conformarían al guante serían: postura y fuerzas durante la interacción, control de la información, visualización.

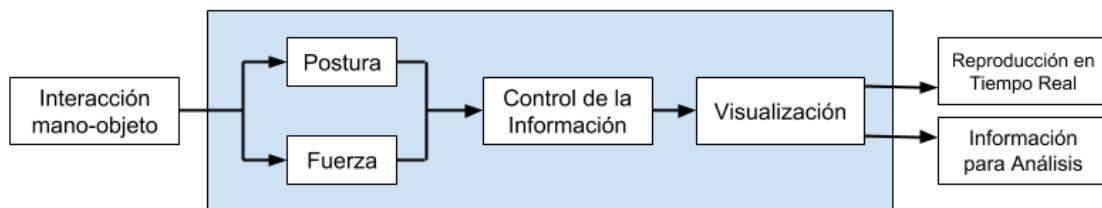


Figura 4.1: Diagrama funcional del guante como sistema.

■ Postura y fuerza

Puesto que la postura y la fuerza de la mano era los valores que se querían conocer, se colocarían sensores para cada caso; *flex sensors* y FSR, respectivamente. Una vez que alguna de las condiciones de postura o fuerza se alterara, el sensor correspondiente presentaría un cambio en el valor de su resistencia, cambios medidos en todo momento por un ArduinoTM, dando como resultado una señal que se acondicionaría mediante funciones algebraicas para obtener como resultado los ángulos de flexión de los dedos y la magnitud de las presiones.

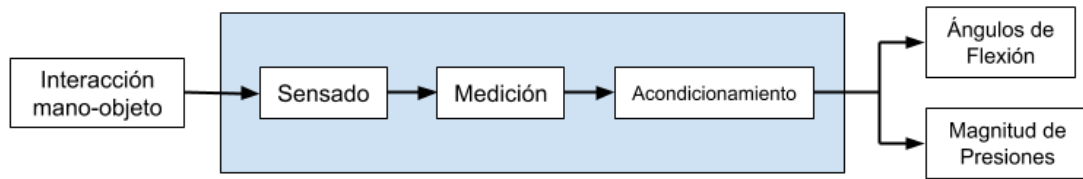


Figura 4.2: Diagrama funcional de la medición de postura y fuerza como subsistemas.

■ **Control de la información**

El subsistema de ‘control de la información’ procesaría los ángulos de flexión y la magnitud de las presiones mediante el manejo de archivos: todos estos datos procesados, se irían guardando en archivos con extensión .csv para poder ser utilizados posteriormente.

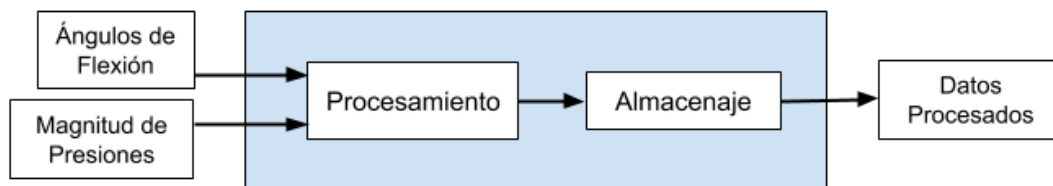


Figura 4.3: Diagrama funcional del control de la información como subsistema.

■ **Visualización**

Con el subsistema de ‘visualización’, se hace posible observar la interacción mano-objeto mediante una mano virtual que muestra los movimientos y fuerzas de la mano en tiempo real. Por otro lado, se establecería comunicación entre distintos programas para poder hacer la manipulación de datos necesaria para, de esta forma, conseguir información visual para el análisis ergonómico, ya fuera con la reproducción de la interacción a modo de video, o bien, con el despliegue de gráficas comparativas.

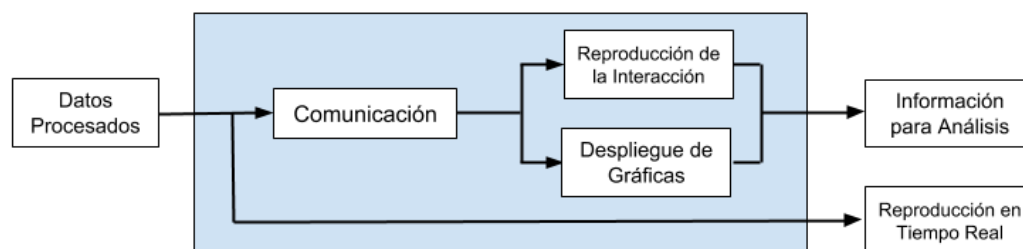


Figura 4.4: Diagrama funcional de la visualización de la información como subsistema.

4.2. Selección de movimientos

Una vez que se fue consciente de las capacidades y limitaciones de los movimientos de la mano y de los dedos¹, se discriminó cuáles de ellos serían medidos por el guante y de cuáles era posible prescindir. La decisión de que un tipo de movimiento o fuerza fuera considerada o no para el diseño del guante fue tomada bajo varios aspectos: importancia del movimiento o fuerza para el agarre, interferencia con la fluidez natural de los movimientos o modificación de la presión de la mano surgida por la presencia del sensor, e independencia del movimiento.

Los movimientos más significativos para la presión de los objetos son los de la flexión-extensión, es decir, apertura y cierre de los dedos, con los cuales se logra una pinza. No sucede así con los movimientos de aducción-abducción (cuando se separan unos de otros), aunque no despreciables, aunque no despreciables, no son los movimientos que tienen la mayor incidencia durante la presión de algún objeto. Tampoco ocurre con los movimientos de rotación de los dedos, los cuales realmente no son tan significativos pues estos surgen como respuestas involuntarias de la mano al adaptarse a la forma del objeto que se está sujetando. Ejemplo de esto son las manos robóticas, donde generalmente no se tienen considerados los grados de libertad recién mencionados.

También se consideró pertinente el que una vez el sensor estuviera acoplado al guante, este no obstruyera a la realización de ninguno de los movimientos. En el caso de haber querido medir la aducción-abducción con *flex sensors*, hubiera presentado obstáculos en la naturalidad de movimiento al momento de flexionar los dedos, por esta razón para el guante se dejó de lado la medición de la aducción-abducción de los dedos.

Se entiende por independencia de movimiento a la autonomía que un movimiento pueda tener respecto a otro, es decir, que uno y otro se ejecuten por cuenta propia. El caso más evidente de esto es el del meñique: salvo en muy pocas personas, el meñique no puede moverse por sí solo, sino que todos sus movimientos de flexión-extensión están sujetos a los movimientos que haga el dedo anular; no obstante, no funciona así a la inversa, pues el dedo anular puede flexionarse y extenderse por sí mismo². Lo mismo ocurre con la flexión de la articulación interfalángica entre la falange distal y media: su movimiento solo ocurre cuando la articulación interfalángica entre la falange media y proximal se flexiona, mientras que este último sí es capaz de hacer su respectivo movimiento independientemente. Por estas razones, para los movimientos de flexión-extensión de los dedos trifalángicos, se tomaron en cuenta los realizados por los dedos índice, medio y anular, solamente en las articulaciones metacarpolángicas y las articulaciones interfalángicas entre las falanges proximales y sus respectivas falanges medias.

Cabe mencionar que, conociendo la variedad de movimientos que el pulgar es capaz de realizar, por simplicidad, se consideró que sus movimientos son iguales que los del resto de los dedos, utilizando para la aducción-extensión y oposición únicamente un sensor, como si se tratara de un solo movimiento. Además, no se tomaron

¹Antes mencionado en el subcapítulo 2.3. *Fisiología de la mano* (Vid. pág. 9).

²Como se menciona en el subcapítulo 2.3., la principal utilidad del meñique es darle a la mano mayor capacidad de expansión (Vid. pág. 11).

4.3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES

en cuenta ninguno de los movimientos realizados por la muñeca, principalmente porque va más allá y excede los alcances de este proyecto, donde se plantea la medición de ángulos y presiones en los dedos.

En cuanto a la selección de fuerzas se refiere, la consideración más determinante fue seleccionar la zona de la mano con que se hacen la mayoría de las sujeciones, esto es, con la punta de los dedos. Asumiendo que este tipo de prensiones son de pulgar y 3 dedos, se omitieron la medición de presiones en las zonas de la palma.

Por lo tanto, la selección de movimientos y fuerzas se puede resumir en la siguiente tabla:

Parte que realiza el movimiento	MOVIMIENTO		FUERZA	
Mano	flexión-extensión	✓	palma	✗
	abducción-exrtensión	✗	base de los dedos (unión de las falanges con los metacarpos)	✗
	pronación-supinación	✗		
Dedos (trifalángicos)	flexión-extensión	✓	falange distal (yema)	✓
	aducción-abducción	✗	falange proximal	✗
	pronación-supinación	✗	falange media	✗
Pulgar	aducción-extensión	✗	falange distal (yema)	✓
	aducción	✗		
	flexión	✓	falange proximal	✗
	oposición	✓		

Cuadro 4.1: Tabla de selección de movimientos y fuerzas.

4.3. Implementación de los sensores

Para este modelo funcional de guante para estudios ergonómicos, se utilizó un guante comercial de algodón; se escogió que fuese un guante para la mano derecha, pues es la mano dominante en la mayoría de las personas. El guante se seleccionó de talla mediana con el único objetivo de adaptarse a las medidas antropométricas del desarrollador, pues el proyecto se plantea como un dispositivo con la posibilidad de adaptarse a la mano de cualquier usuario, independientemente de su tamaño. De esta forma, sin necesidad de un tercero para hacer las pruebas, se podrían hacer modificaciones a las condiciones de los sensores y de los códigos con la intención de lograr una recopilación más fiel de los movimientos y fuerzas reales.

Los sensores que se utilizaron fueron: para el movimiento de los dedos los *Short Flex/Bend Sensor* de la compañía Adafruit con dimensiones 77.57 mm de largo, 6.41 mm de ancho, 0.48 mm de grosor y 0.27 g de peso; para la fuerza de presión se utilizaron *Force-Sensing Resistors* circulares de cola corta de 0.25 in de diámetro y 0.1 g de peso, de la compañía Pololu.

La implementación de los sensores consistió en pequeñas bolsas cosidas al guante, a modo de comportamientos, donde se introdujeron los sensores para que se mantu-

vieran en el lugar específico donde debían permanecer; ya fuera, en la punta de los dedos o en el dorso de los mismos. Para el caso de los *flex sensors*, cabe mencionar, que estos sensores resistivos solamente funcionan cuando se curvan en una dirección, pues hacerlo en el otro sentido causaría cambios no confiables en la medición de la resistencia; así, se tuvo la precaución de colocarlos de modo que el sentido en que debía doblarse el sensor correspondiera a la flexión de los dedos.

Para hacer posible la interacción de la mano virtual mediante el guante, antes que nada, se debían leer correctamente las señales de todos y cada uno de los sensores implementados. Para utilizar la resistencia variable de un FSR y de un *flex sensor* como sensores, estos se debe de conectar a modo de un divisor de tensión (fig. 4.5), es decir en serie con una resistencia de valor fijo R_1 , donde la diferencia de potencial del sensor V_{out} sería una fracción del voltaje de entrada V_{in} proporcional al valor resistivo del sensor R_2 (ec. 4.1).

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

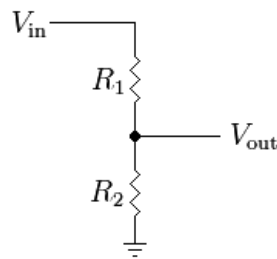
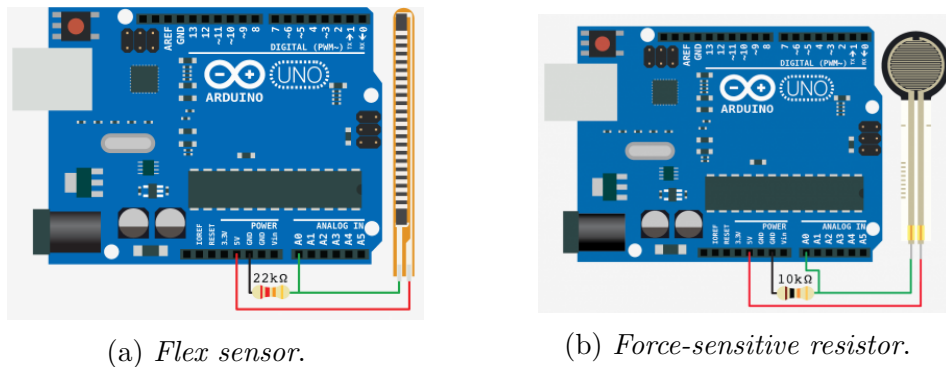


Figura 4.5: Diagrama de un divisor de tensión. [35]

Para la lectura de los sensores, estos fueron conectados a la tarjeta de desarrollo ArduinoTM; debido a que el modelo ArduinoTM MEGA tiene mayor cantidad de pines analógicos (16) que el ArduinoTM UNO (6), el primero fue el que se seleccionó para ser utilizado en el proyecto, porque con cuantas más entradas se contara sería posible colocar más sensores. Cada sensor fue conectado a modo de divisor de tensión (como se describió anteriormente) con una resistencia de $330 \text{ K}\Omega$, y el pin de la diferencia de potencial del sensor V_{out} se conectó directamente a un pin analógico, el cual se programaría como entrada, para así recibir los datos –en de forma de



(a) *Flex sensor*.

(b) *Force-sensitive resistor*.

Figura 4.6: Esquema de conexión de los sensores a un ArduinoTM. [36]

4.3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES

voltaje de los sensores. El microcontrolador ATmega2560 del Arduino™ permite que la lectura de los sensores se haga a una velocidad de muestreo de 9600 Hz (una muestra cada 4 ms) para entradas analógicas [37] suficientemente rápido como para que los datos recopilados reflejen los movimientos con fluidez.

El ADC (convertidor analógico-digital, por sus siglas en inglés) con que cuenta el microcontrolador se encarga de procesar las entradas analógicas; cuenta con 10 bits de resolución (pues una señal analógica no es nada más que una medición digital codificada con cierto número de bits), permitiendo un total de 1024 niveles digitales, esto es, una resolución de 1/1024.

Como se mencionó en ‘Especificaciones y diseño conceptual’³: para los *flex sensors*, a mayor flexión, las partículas conductoras del sensor se alejan entre sí, aumentando el valor de la resistencia del sensor. Entonces, cuanto más se flexiona un dedo, haciendo el ángulo de la articulación mayor, más grande será el incremento del V_{out} que entra al pin analógico. Teniendo en cuenta esto, la caracterización de estos sensores, es decir, el determinar su comportamiento y adecuar su señal a información útil para ser traducida en movimientos de la mano virtual, se hizo relacionando los ángulos mínimos (reposo) y máximos de cada dedo con los mínimos y máximos valores analógicos del Arduino™ e interpolando los valores intermedios, considerando como si su comportamiento fuese lineal, así se obtendrían los ángulos de flexión de los dedos. Estos valores límites se muestran en el cuadro 4.2.

DEDO	FALANGE	Ángulo de Flexión [°]		Arduino [bits]	
		mínimo (reposo)	máximo	mínimo	máximo
Índice	media y distal	0	90	755	920
	proximal	0	100	815	850
Medio	media y distal	0	90	975	945
	proximal	0	100	765	860
Anular	media y distal	0	90	735	820
	proximal	0	100	755	820
Pulgar	distal	0	90	910	950
	proximal	15	110	780	830

Cuadro 4.2: Tabla de caracterización de los *flex sensor* para cada dedo.

Por otro lado, igualmente mencionado en el capítulo de ‘Especificaciones y diseño conceptual’⁴, las superficies conductoras de un FSR se hallarán en contacto cuando se ejerza presión en el sensor, de modo que la resistencia eléctrica del sensor decrece. Por lo que, de acuerdo a la ecuación 4.1, el valor de la resistencia del FSR es inversamente proporcional a la fuerza aplicada. De la misma manera en que se caracterizaron los *flex sensor*, el valor de la señal de los FSR se volvió utilizable teniendo los umbrales mínimo y máximo de la señal analógica entregada por el Arduino™, así como los correspondientes a la fuerza en el sensor, que se consideraron respectivamente de 0 y 2.5 Kg (el umbral superior se obtuvo con una báscula de cocina: la fuerza máxima

³Sección 5. del subcapítulo 4.3. *Sensores resistivos de flexión* (Vid. pág. 33).

⁴Sección 1. del subcapítulo 4.2. *Sensores resistivos de fuerza* (Vid. pág. 27).

sería aquella en la que el valor analógico registrado por el ArduinoTM dejara de incrementar, aunque así lo hiciera la presión ejercida sobre el sensor), y finalmente se hace una interpolación lineal para obtener los valores intermedios. En este caso, se supusieron todos los sensores de fuerza como iguales y se utilizaron los mismos valores para interpolar (cuadro 4.3).

Fuerza de Presión [Kg]		Arduino [bits]	
mínimo	máximo	mínimo	máximo
0	2.5	1023	450

Cuadro 4.3: Tabla de caracterización de los FSR.

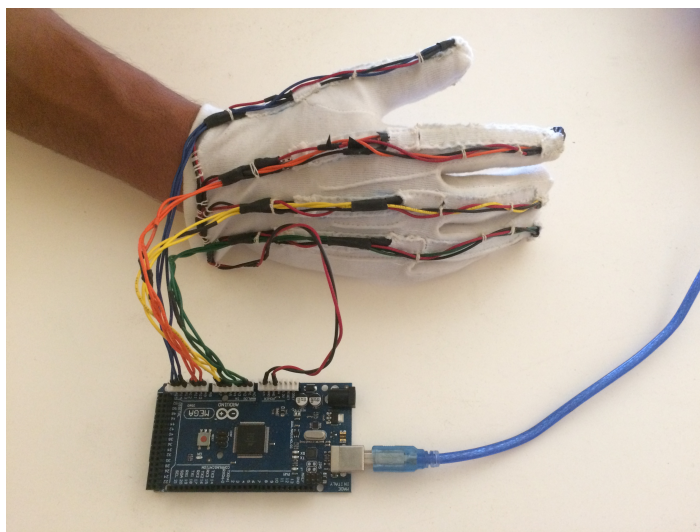


Figura 4.7: Prototipo funcional con los sensores implementados y conectados al ArduinoTM.

4.4. Desarrollo de la simulación

La simulación fue hecha en Unity [38], un *software* de desarrollo de videojuegos usado para generar ambientes virtuales de gran calidad en 3D y 2D, utilizado generalmente como motor de videojuegos, simulaciones, VR/AR y otros tipos de contenidos interactivos como diseños arquitectónicos e ingenieriles, y animaciones tridimensionales en tiempo real. También se desarrolló el modelo de la mano virtual, este se realizó en un *software* dedicado a la renderización, simulación, modelado y animación 3D; aunque, tal vez, no se cumpla con las medidas antropométricas correctas, el objetivo de la mano virtual era el servir justamente como modelo de la mano real y representar sus movimientos.

Del código de Unity se estableció la comunicación serial para poder recibir la información que el ArduinoTM estaba recibiendo de los sensores, estos datos eran asignados a nuevas variables dentro del mismo Unity y comparadas entre sí para que la mano virtual reprodujera los mismos movimientos que la mano real. Con la intención de lograr una reproducción más fiel, se hicieron varias pruebas donde los valores de comparación y las condiciones de movimientos fueron cambiados y al final

4.4. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN

se optó por seleccionar aquellos con los que la mano virtual imitara de la manera más exacta los movimientos de la mano real. Así, mientras los ángulos de flexión están representados por el movimiento simultáneo de la mano virtual y la real, las fuerzas ejercidas se representan por cápsulas en los extremos de cada dedo, las cuales cambian gradualmente de color según la magnitud de la fuerza (hasta un máximo de 2.5 Kg); desde verde hasta rojo, pasando por tonalidades de amarillo, naranja y violeta.



Figura 4.8: Visualización de la interacción y sus valores para cada dedo.

Cabe mencionar que, debido a la dependencia de ciertos movimientos de la mano⁵, y asimismo de la omisión de la implementación de sensores en el guante para medirlos, los cambios de posición de estas partes de la mano virtual se vincularon a aquellas de cuyo movimiento dependen. Así, el meñique de la mano virtual se movería a la par del dedo anular y la falange distal de cada dedo rotaría con una inclinación respecto a la falange media igual a la rotación de la falange media respecto a la falange proximal.



Figura 4.9: Demostración de la mano virtual imitando los movimientos de la mano real.

⁵Antes mencionado en el subcapítulo 4.2. *Selección de movimientos* (Vid. pág. 39).

La finalidad de haber trabajado con una simulación, más allá de ser un ambiente gráfico donde el usuario pueda controlar la mano virtual, era visualizar la interacción de la mano con un objeto al momento de agarrarlo. Por eso, para relacionar los valores medidos con la manipulación del objeto, en la pantalla de la simulación se muestran las posiciones y fuerzas (en ángulos y kilogramos, respectivamente) en tiempo real, valores agrupados por cada dedo para una mejor síntesis de la información, además de un temporizador para así poder ubicar una determinada posición en el tiempo.

4.5. Procesamiento de datos y despliegue de la información

Para la finalidad del proyecto, el control de la mano virtual dentro de la simulación no era suficiente para alcanzar información tangible, el procesamiento de datos fue necesario. Como se ha venido mencionando, las variables que fueron tomadas en cuenta fueron los ángulos de rotación [$^{\circ}$] y fuerza [kg] de cada dedo, además del tiempo [t] para medir la duración de estos cambios y su secuencia.

Los valores de estas variables se transformaban en tipos de datos ‘*string*’, de modo que una misma cadena contuviera los datos de todas las variables en un mismo instante. Cada cadena que se obtenía durante la simulación es guardada en archivos de Excel con formato .csv (*comma-separated value*), formato apropiado para utilizar la información para los análisis posteriores, pues cada cadena es asignada a una fila distinta y cada valor a una columna.

Es en el código de Unity donde se encuentran el conjunto de instrucciones que se encargan de la manipulación de los archivos de la hoja de cálculo (abrir, guardar y cerrar archivos) cada vez que se corre la simulación.

El despliegue de gráficas se hizo mediante un sistema de cómputo numérico: de cualquier experimento se pueden mostrar gráficas comparativas de los ángulos de flexión y fuerzas de los dedos a través del tiempo. Con la información provista por estas gráficas es posible hacer análisis entre distintos sujetos de prueba o diferentes objetos que se hayan manipulado. Lo único que se requiere es ingresar el nombre del archivo del que se desea hacer las gráficas, así como la carpeta en que se encuentra guardado, y el código se encarga de abrir el archivo, leer y finalmente extraer los datos para hacer las gráficas, no sin antes verificar la existencia de dicho archivo. El despliegue de las gráficas se hace de la siguiente manera: una por los valores de cada dedo, que son la rotación de las dos falanges y la fuerza; y otra gráfica extra para la comparación entre sí de las fuerzas en las yemas de los dedos.

4.6. Mejoras al ambiente virtual

A pesar de que el objetivo principal de la simulación era obtener los valores de la interacción, mostrarlos y reproducirlos, se optó también por hacer un programa más robusto para que así se tuviera un ambiente más intuitivo y amigable con el

usuario, además de que su código fuera a prueba de errores –o excepciones– durante el funcionamiento del programa, es decir, que fuera un programa más completo. Se les llama mejoras, no en el sentido de que el programa fuera deficiente o que tuviera errores funcionales que debieran ser corregidos, sino mejoras que permiten un mayor aprovechamiento del dispositivo y de los datos que ofrece, así como de la manipulación que se hace con ellos. A partir de ahora, para términos prácticos, se comenzará a llamar 'programa' a toda la parte del proyecto que fue hecha en Unity, mientras que 'simulación' corresponderá únicamente a la parte del programa que se encarga de la manipulación de la mano virtual, y 'reproducción' a la parte del programa que se encarga de realizar nuevamente los movimientos de interacciones ya hechas.

Lo primero que se buscó hacer fue el poder visualizar una interacción previamente ejecutada, en otras palabras, el poder verla a modo de video. Si los valores se habían podido guardar en archivos, de lo que se trataba ahora era hacer el procedimiento a la inversa: extraer los datos de los archivos y traducirlos en los movimientos de los dedos y el cambio de colores en las cápsulas. Pues de esta forma se estaría obteniendo información visual para los análisis posteriores que conllevaría el estudio ergonómico de un objeto.

Se hizo la adición de un menú, que estaría al inicio del programa, previo a la simulación, donde se mostrarían las opciones que se podrían ejecutar en el programa, ya fuera guardar o cargar datos. Donde la primera correspondería a correr la simulación para manipular un objeto y así guardar los datos en un nuevo archivo, mientras que la otra opción se encargaría de hacer posible la reproducción de una prueba anteriormente realizada y guardada. Al iniciar el programa, se ha hecho que el modelo de la mano virtual aparezca en la pantalla girando, esto con la finalidad de que el usuario se percate de que el programa se encuentra corriendo.



Figura 4.10: Vista del menú del programa con la opción 'GUARDAR' seleccionada.

Para ambas opciones se colocaron componentes de interacción: en la opción 'GUARDAR' se puso un *input field* (campo de entrada), donde se puede escribir un texto editable para asignar un nombre al archivo que se creará con los datos de la prueba; por otro lado, en la opción 'CARGAR', se dispuso de un *dropdown*, es decir, una lista desplegable para permitirle al usuario escoger una opción dentro

de las posibles en la lista, en este caso la lista se conforma por los nombres de los archivos creados desde la opción ‘GUADAR’. Igualmente, se dispuso de un botón ‘OK’ el cual permitiría entrar a la simulación o a la reproducción, según fuese el caso; sin embargo, este botón permanecería inhabilitado siempre y cuando no se haya puesto un nombre o se haya seleccionado un archivo, respectivamente, haciendo posible algún cambio en la selección en caso de ser necesario (fig. 4.10).

Adicionalmente, se implementaron un par de mejoras más para el manejo de archivos. Una de ellas fue la incorporación de la opción ‘ELIMINAR’ para poder borrar algún archivo desde el programa y sin necesidad de ir a la dirección de la carpeta. Y la otra ofrece la posibilidad de poder seleccionar la carpeta para guardar/cargar archivos escribiendo la dirección completa de dicha carpeta en un *input field* (fig. 4.11). Esta dirección se mantendría inmutable aunque se detuviera el programa y se tuviera que correr de nuevo: la dirección escrita se conservaría como la carpeta predeterminada.



Figura 4.11: Campo de entrada para escribir la ubicación de la carpeta donde se hará el manejo de archivos.

Para el caso de que se quisiera guardar un nuevo archivo con el nombre de uno ya existente, se lanzaba la excepción donde Unity cargaba una escena o pantalla de error con la leyenda “Ya existe un archivo con ese nombre. Cambie el nombre del archivo o elimine el archivo existente desde la opción ‘CARGAR’.”, de modo que no se sobrescriban los datos del archivo existente. Sin embargo, si el usuario deseaba, aun así, colocar ese nombre al archivo, se tiene la posibilidad de eliminar el archivo existente e ingresar nuevamente el nombre deseado. Puesto que la única función de esta pantalla es mostrarle al usuario que no es posible tener dos archivos con un mismo nombre a la vez, se cuenta con un botón cuya tarea es devolver al usuario a la pantalla donde se muestra el menú (fig. 4.12).

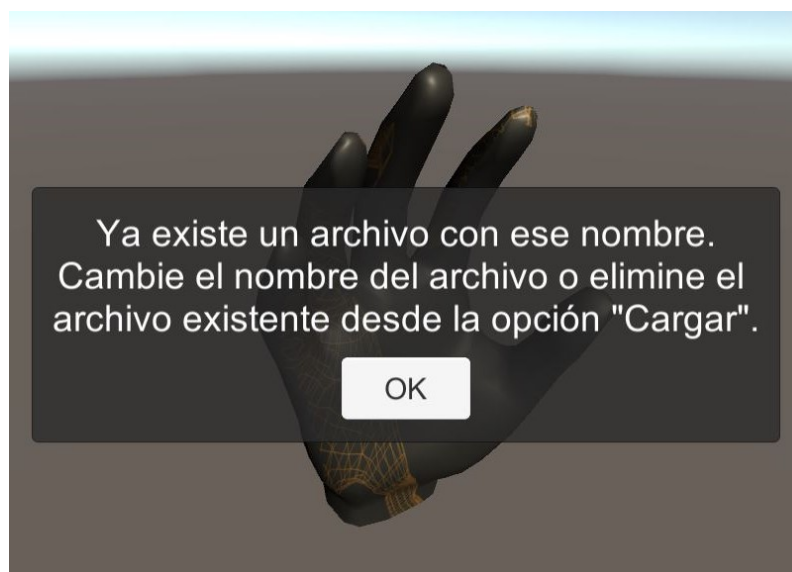


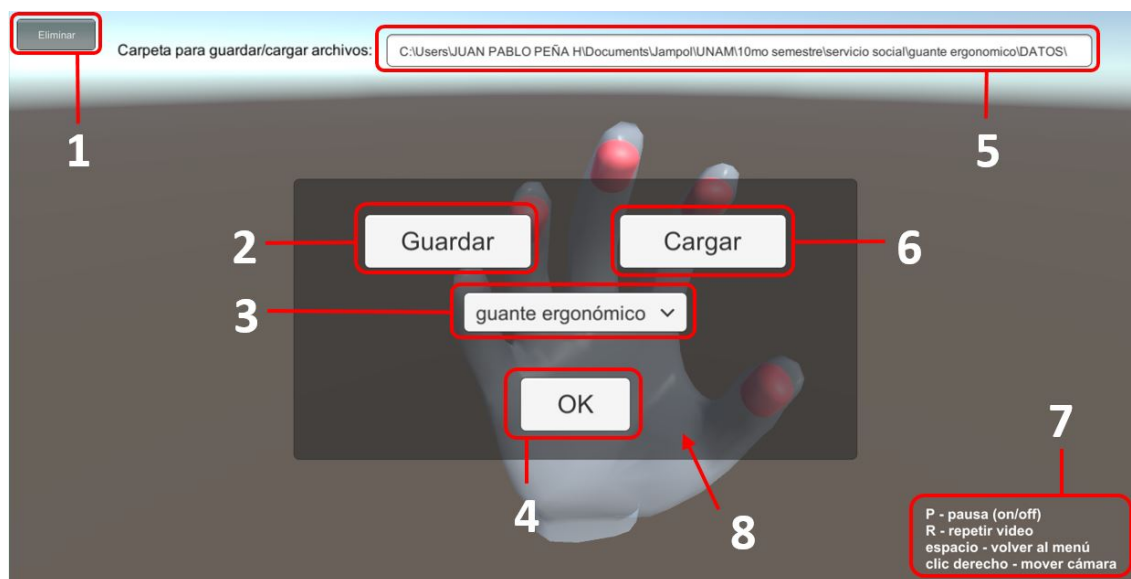
Figura 4.12: Pantalla de error disparada por la excepción de nombre de archivo existente.

No es solamente desde la pantalla de error desde donde el usuario puede regresar al menú principal del programa. Para darle más versatilidad y rapidez al uso del programa, sin necesidad de parar y tener que volver a correr el programa, esta opción también se ha colocado en la simulación ('GUARDAR') y la reproducción ('CARGAR').

Eventualmente, se necesita del ArduinoTM y del guante instrumentado para que desde la simulación se ingresen los datos que son guardados en archivos .csv. Sin embargo, se puede correr la opción 'CARGAR' sin necesidad de que el Arduino esté conectado a la computadora, así es posible hacer la reproducción de algún archivo guardado y visualizar la interacción sin correr el riesgo de que el programa colapse por la excepción de no haber podido establecer la comunicación vía Puerto Serial durante la ejecución del programa.

Finalmente, se agregaron comandos adicionales que manipularían tanto el ambiente de la simulación como el de la reproducción; fueron implementados teniendo en mente que con ellos se complementaría el funcionamiento del programa, es decir, que fuera más completo y de alguna manera ayudara al usuario a manipular el ambiente virtual como un todo. Al presionar la tecla correspondiente se ejecutan estos comandos y su función es la siguiente:

- **P** – sirve para el encendido y apagado del modo PAUSA; según sea el caso, pausa la simulación y, por tanto, la lectura de datos, o pausa la reproducción.
- **R** – utilizado solamente dentro de la opción 'CARGAR', este comando se encarga de reproducir nuevamente el video de los movimientos desde el inicio, sin importar si la reproducción actual haya llegado a su fin o no.
- **'espacio'** – al presionar la tecla 'espacio' hace que se regrese al inicio del programa, esto es, donde se encuentra el menú, se encuentre en la simulación, o bien, en el modo reproducción.
- **'clic derecho'** – al mover el *mouse* sosteniendo el 'clic derecho' se puede rotar la cámara para poder apreciar desde cualquier punto cómo fueron los movimientos y las fuerzas de los dedos durante la interacción.



(a) Pantalla del menú de programa.

a.1. Botón para eliminar archivos (visible únicamente cuando está seleccionada la opción 'CARGAR').

a.2. Botón 'GUARDAR', se utiliza para iniciar una prueba nueva, crea un archivo.

a.3. *Dropdown* con las posibles opciones para reproducir (opción 'CARGAR') o *Input Field* para escribir el nombre del archivo que se creará (opción 'GUARDAR').

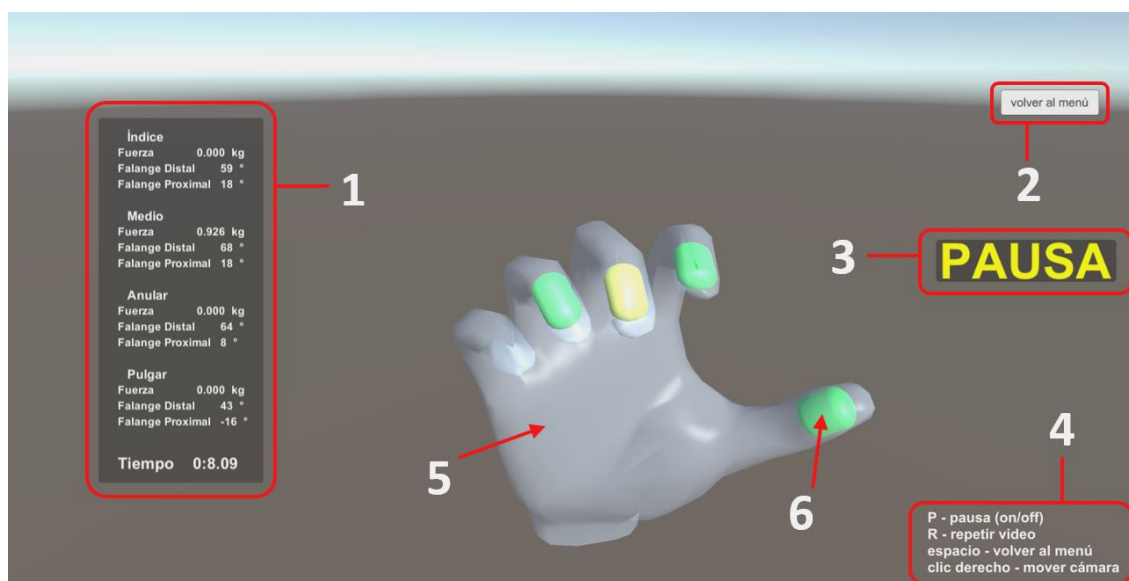
a.4. Botón para comenzar la simulación o le reproducción, según sea el caso.

a.5. Dirección de la ubicación de la carpeta donde se manipularán los archivos.

a.6. Botón 'CARGAR', se utiliza para visualizar pruebas previamente hechas.

a.7. Instrucciones y acciones de los comandos adicionales.

a.8. Mano virtual que gira en el fondo para que el usuario se percate de que el programa se encuentra corriendo.



(b) Pantalla que se visualiza durante la simulación y reproducción.

b.1. Cuadro donde se muestra en tiempo real los valores de fuerza y ángulos de cada dedo.

b.2. Botón para regresar al menú del inicio del programa (también se puede hacer con la tecla 'espacio').

b.3. Señalamiento que indica que la simulación o la reproducción se encuentra en modo PAUSA.

b.4. Instrucciones y acciones de los comandos adicionales.

b.5. Mano virtual que imita los movimientos de la mano real o reproduce los movimientos guardados en archivos .csv, según sea el caso.

b.6. Cápsulas que cambian de color de acuerdo a la fuerza ejercida (de verde a rojo).

Capítulo 5

Experimentación y resultados

5.1. Procedimientos de experimentación

Al inicio, se ha hablado de que la ergonomía y la comodidad al usar un objeto están estrechamente relacionadas entre sí y que estas características, si bien no pueden medirse directamente, se pueden identificar al definir la tendencia que tenga determinado objeto a ser asido de la misma manera y con una distribución de fuerzas similar entre distintos usuarios, es decir, que al agarrar un objeto exista repetibilidad de posiciones y fuerzas de los dedos a pesar de las diferencias antropométricas que pueda haber entre los posibles consumidores del producto; de modo que lo que se busca es que esta repetibilidad esté predispuesta por el diseño del objeto en cuestión.

Para establecer, con ayuda del prototipo funcional desarrollado, qué tan fácil es determinar la repetitividad que tiene un objeto de ser tomado de la misma manera, y por tanto qué tan ergonómico es, se diseñó una prueba donde se utilizarían objetos que cumplan un mismo propósito, pero cuyas dimensiones y formas son distintos entre sí, con la finalidad de comparar los resultados mostrados por las gráficas y comprobar si su agarre se mantiene constante. La comparación de las gráficas consistiría en hacer un análisis de su comportamiento a través del tiempo, donde el comportamiento ideal sería aquel que mantuviera amplitudes y frecuencias regulares durante toda la prueba tanto en ángulos como en fuerzas.

Los objetos que se utilizaron para llevar a cabo los experimentos fueron cuatro tipos distintos de ratones comerciales. La prueba consistió en recorrer con el cursor del ratón, sobre la pantalla, una trayectoria sinusoidal -de 3 periodos-, con marcas que se hallan a intervalos regulares -12 marcas en total por cada periodo-, las cuales dependiendo del color (verde o rojo), indicaban que se debía de hacer clic con el botón izquierdo o derecho del ratón. Se seleccionó la forma de una senoide por el simple hecho de que presenta movimientos alternados hacia arriba y hacia abajo y un desplazamiento constante hacia la derecha; estos cambios de dirección representarían posibles variaciones en el agarre del objeto. Es importante mencionar que esta prueba se seleccionó debido a que la manipulación del ratón muchas veces se hace solamente con la yema de los dedos, incluyendo los clics, por lo que los sensores implementados en el guante bastarían para identificar cambios en la manipulación del objeto.

Cabe resaltar que la finalidad de las pruebas no era conocer qué tan rápido se podían ejecutar éstas o comparar el desempeño que se tenía con uno u otro dispositivo, sino cotejar si el agarre del ratón se veía perturbado durante la ejecución de la misma.

5.1. PROCEDIMIENTOS DE EXPERIMENTACIÓN

La fase de experimentación involucró a 2 sujetos masculinos, llamados Sujeto1 y Sujeto2, de 23 y 25 años respectivamente, los cuales compartían una antropometría de mano similares, adecuadas para el tamaño del guante. Cada uno de los ratones utilizados cuenta con una particularidad que lo hace característico, ofreciendo cierta ventaja en el mercado respecto a los demás (fig. 5.1). Durante las pruebas, se cercioró de que cada clic dado fuera registrado por el sensor correspondiente en el guante, esto con la finalidad de no perder información que sería útil para el análisis posterior que se haría con las gráficas comparativas; en caso de que alguno de los clics no fuera identificado, la prueba tenía que volver a hacerse.



(a) Ratón comercial común.



(b) Ratón *gamer*. Ventaja: ergonómico.



(c) Ratón plegable. Ventaja: portabilidad.



(d) Ratón mini. Ventaja: dimensiones reducidas.

Figura 5.1: Ratones utilizados en la experimentación.

5.2. Resultados

Es de primordial importancia hacer énfasis en que la finalidad de la experimentación que se llevó a cabo no fue el hacer un estudio ergonómico profundo de los dispositivos utilizados, sino el comprobar el funcionamiento del prototipo desarrollado y la efectividad del mismo a la hora de poder distinguir los movimientos de los dedos y las fuerzas ejercidas para poder manipular uno y otro dispositivo.

Queda claro que con la cantidad de sujetos implicados para hacer la experimentación, así como el número de objetos utilizados y de pruebas realizadas no se abarca a una población de datos lo suficientemente amplia como para obtener información estadística contundente. Esto sobrepasa los alcances del proyecto porque, como ya se ha mencionado, la mera finalidad del proyecto es poder estandarizar qué tan propenso es un objeto a ser sujeto de la misma manera por varios usuarios y en diferentes momentos.

Como era de esperarse, el desempeño de ambos sujetos, en lo que se refiere a la constancia de amplitud y de frecuencia en movimientos y presiones, es considerablemente mejor en las gráficas del ratón *gamer* (aquel que proclama ser ergonómico) y peor en las del ratón mini, teniendo en medio al ratón comercial común y al ratón plegable.

Se dice que estos resultados eran los esperados, pues el diseño del ratón *gamer* contempla el uso de toda la mano para su manipulación, incluyendo la palma, y contando con hendiduras donde debe colocarse cada dedo, ayudando a que cada parte de la mano permanezca en un mismo lugar en todo momento y fuerzas aplicadas estén distribuidas por toda la mano. Como se puede apreciar en (fig. 5.2), los cambios tanto en ángulos como en fuerza en los dedos índice y medio, surgen a intervalos constantes y con amplitudes muy similares entre sí, que corresponden a cada clic dado. En otras palabras, se podría decir que las ventajas en el agarre del ratón ergonómico se ven reflejadas, para este caso en particular, en que los valores de las gráficas de movimiento se mantienen dentro de un rango menor a los 30° y que cada periodo de clic dado por un mismo dedo, se encuentra a un intervalo regular respecto al clic anterior.

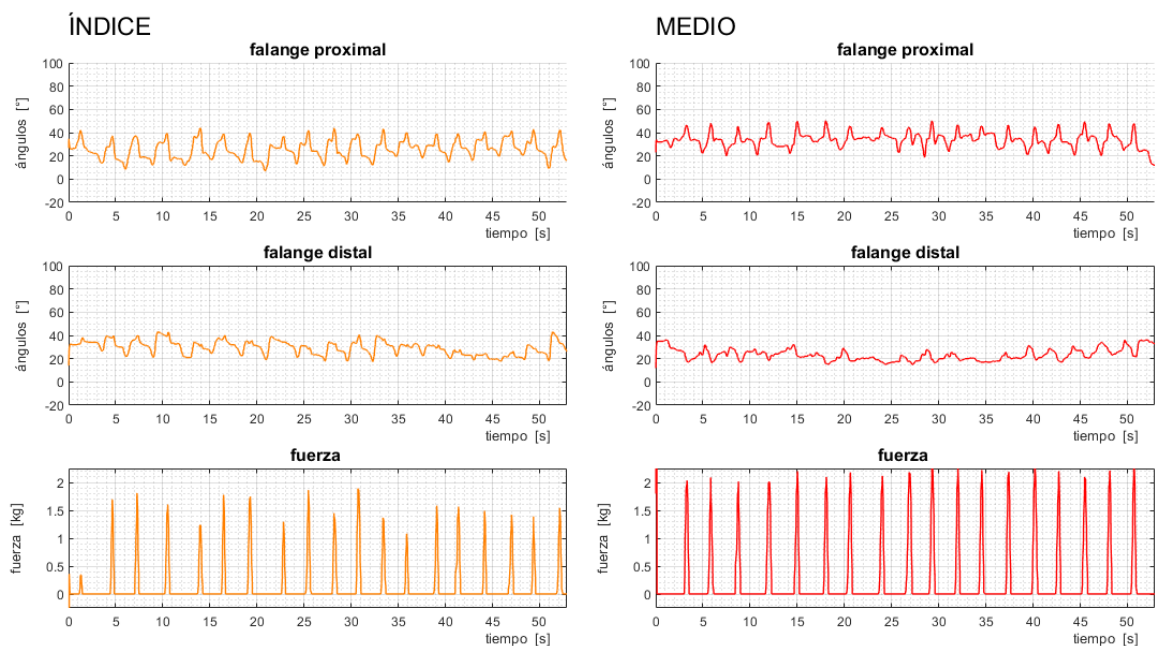


Figura 5.2: Prueba del Sujeto 2 con el raton *gamer*.

5.2. RESULTADOS

Por otro lado, en lo que respecta al ratón mini, se esperaban las variaciones más notorias, ya que su diseño, en aras de tener un producto con dimensiones reducidas cuya mayor ventaja es ser portátil, se sacrifica la comodidad con la que este puede ser utilizado. Como se puede observar en (fig. 5.3), las fuerzas de todos los dedos fueron sumamente inconsistentes a lo largo de la prueba, mostrando cambios en las fuerzas del agarre, es decir, variaciones en la amplitud de la fuerza ejercida por cada dedo, producto de que el sujeto no hallaba una forma específica en que el ratón le fuera completamente cómodo.

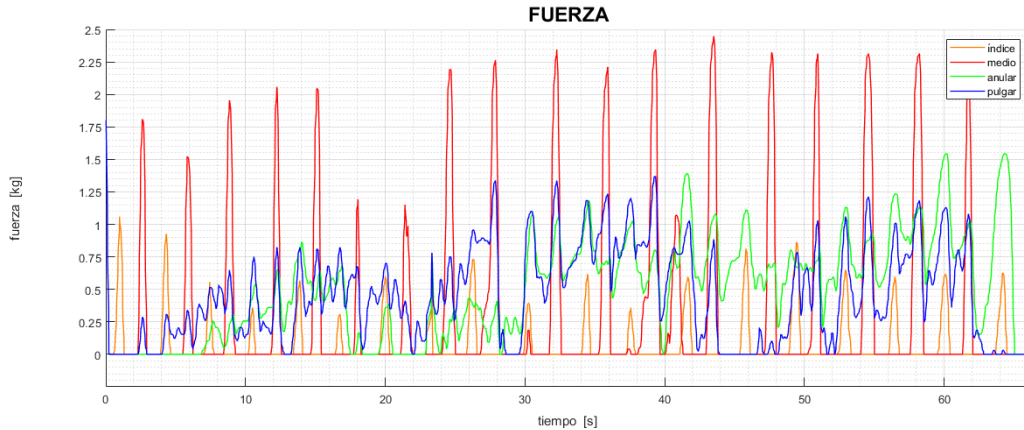


Figura 5.3: Prueba del Sujeto 1 con el raton mini.

Para los casos del ratón comercial común y del ratón plegable, no se tienen resultados tan constantes como se quisiera tener de un producto ergonómico, pues se pueden observar fluctuaciones que surgen a lo largo de la prueba, indicadores de modificaciones en el agarre durante la manipulación del ratón. Además, con los resultados, es posible hacer observaciones que sin el guante quedarían meramente en un plano cualitativo, como, por ejemplo: en el caso del ratón plegable, puesto que su principal característica es poder doblarse cuando no se utiliza, su diseño está comprometido bajo esta especificación en particular; así, hablando específicamente del ratón que se utilizó en las pruebas, no cuenta con soportes donde se puedan colocar los dedos pulgar o anular (al menos, las yemas), lo que se ve reflejado en sus respectivas gráficas, donde las fuerzas de estos dedos es nula o prácticamente nula.

Cabe resaltar que, para ambos sujetos, cada vez que en alguna de las pruebas se presentaba un aumento de la fuerza del pulgar, esta coincidía con los clics. Esta simultaneidad de aplicación de fuerzas se puede explicar por la misma sujeción del ratón, ya que se trata de fuerzas opuestas (considerando la posición del pulgar respecto al resto de los dedos): al hacer clic, ya sea con el índice o el medio, el pulgar ejerce una fuerza opuesta como reacción a la primera, con el fin de que el ratón no se mueva y mantener el cursor en la posición deseada y hacer la selección correcta en la pantalla. Con lo mencionado no se pretende sugerir algún cambio en el diseño de los ratones, más bien es para dejar en claro que el guante instrumentado es capaz de recopilar y arrojar información que no es percibida de primera impresión.

Al observar las gráficas¹, se puede apreciar que, en todas las pruebas, la fuerza ejercida por el dedo medio al dar clic es mayor respecto a la del dedo índice. Esto podría proponer que al hacer clic derecho (el correspondiente al dedo medio), siempre se hace con una mayor

¹En el *Apéndice A* se presentan los datos obtenidos en las pruebas con los cuatro tipos de ratones (Vid. pág. 62).

presión, pero lo cierto es que esta diferencia en el registro de fuerzas se debe meramente a la posición en que se encuentra el sensor y el lugar del dedo donde se aplica la fuerza. Mientras, por un lado, los sensores se colocaron en la yema de los dedos, por otro, no es exactamente con el centro de la yema con la que se toman los objetos, sino que todas las partes del dedo colaboran con la sujeción.

5.3. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se puede considerar todo aquello que haría falta para que el guante instrumentado dé más información a los estudios ergonómicos que se deseen realizar. Por ejemplo, para la ciencia del deporte, el guante instrumentado podría utilizarse en el caso particular del béisbol: con él, se podría ayudar a la enseñanza de técnicas para realizar distintos tipos de lanzamientos. El planteamiento consistiría en analizar qué información da el dispositivo desarrollado con distintas formas de sujetar la pelota de béisbol de acuerdo al tipo de lanzamiento.

En el beisbol, para ejecutar uno u otro de los distintos lanzamientos que se pueden realizar, importan las posiciones de los dedos, así como con qué dedo se hace más presión. Se llevó a cabo un pequeño análisis con 4 de los principales tipos de lanzamientos que un pítcher puede efectuar: recta, cambio, slider y curva (fig. 5.4).

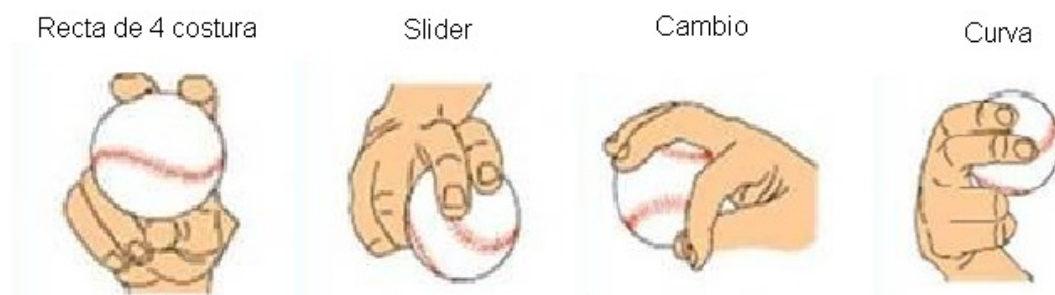
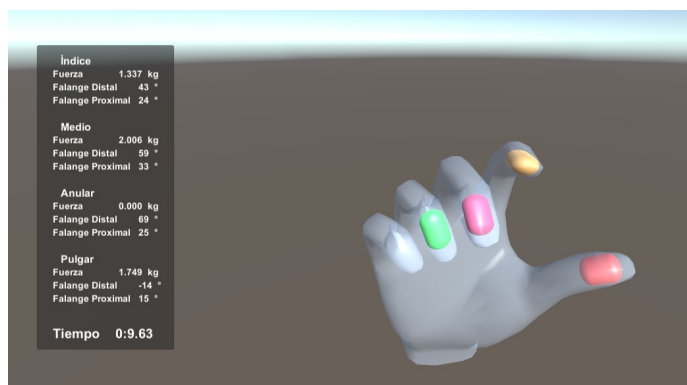


Figura 5.4: Agarre de distintos lanzamientos de beisbol. [39]

Al observar la imagen (fig. 5.4), es evidente que al guante le harían falta otros sensores que ayudarían a distinguir con mayor precisión el tipo de lanzamiento, como son el poder medir la aducción-abducción de los dedos (separación uno de otros), que son sensores que se omitieron; también sería importante conocer la posición y movimientos de la muñeca. Valdría la pena mencionar que otra posible mejora que se le puede hacer al prototipo está en el material del que está hecho el guante: pues el algodón podría afectar el desempeño del lanzador a causa de que el coeficiente de fricción de la tela es diferente al de la piel; e incluso el algodón podría interferir con el acondicionamiento de la señal, debido a la electricidad estática generada por la fricción. Sin embargo, sí hay ciertas diferencias entre los lanzamientos analizados que se pueden identificar con la cantidad y la posición de sensores con que cuenta el guante, decir, tal y como está (fig. 5.5).

Esta información adicional en el guante ampliaría los campos de trabajo en que sus usos serían prácticos, como en el caso particular de la ciencia del deporte, el cual ayudaría en el desarrollo de deportistas y a mejorar su desempeño.

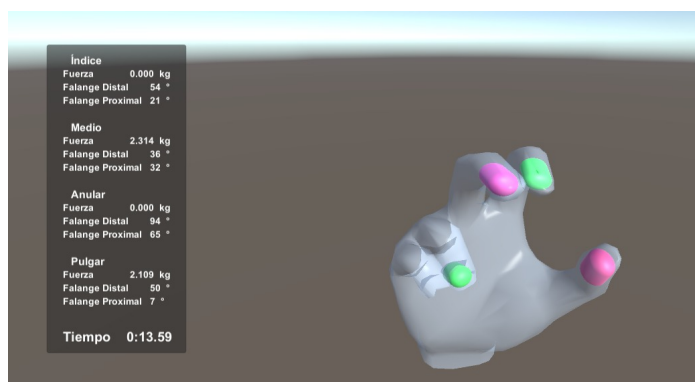
5.3. TRABAJO A FUTURO



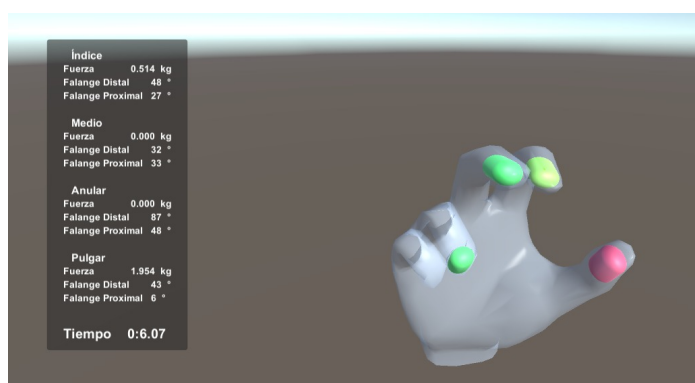
(a) Recta



(b) Cambio



(c) *Slider*



(d) Curva

Figura 5.5: Agarre de distintos lanzamientos de beisbol vistos con el guante y la simulación.

Conclusiones

El guante instrumentado como conjunto (prototipo y simulación) funciona correctamente y es capaz de entregar datos útiles para el estudio ergonómico de un objeto determinado. En esta etapa el dispositivo se encuentra en una primera fase donde el objetivo fue el realizar un prototipo funcional, es decir, un primer modelo que representase el potencial que del mismo proyecto se pueda desarrollar.

El enfoque del proyecto fue evaluar dos de los parámetros involucrados con la sujeción de objetos: posición y fuerza de los dedos; resolviendo el que la ergonomía de un objeto dejase de ser un aspecto meramente subjetivo, es decir, ir más allá de solo contar con perfiles curvos y surcos donde deben de colocarse los dedos y poder dar pruebas fehacientes de que algo realmente es ergonómico, analizando si existe una tendencia a sujetar un objeto de la misma manera por varios usuarios y en diferentes momentos.

Las limitaciones de medición que presenta el guante instrumentado se deben básicamente a la cantidad y tipo de sensores. Si bien el diseño de las pruebas se vio restringido a que esta fuera para un tipo específico de prensión (de pinza pulgar – 3 dedos) y que se pudo haber agregado un mayor número de sensores, cubriendo gran parte de los movimientos y fuerzas que realiza la mano humana al interactuar con los objetos, los sensores utilizados fueron suficientes para demostrar la funcionalidad del prototipo y representar una idea clara de lo que el proyecto pretende hacer. Por otro lado, aunque el haber usado otro tipo de sensores para instrumentar el guante hubiese podido ser útil, los sensores resistivos que se utilizaron en cada caso (FSR y *flex sensor*) demostraron ser altamente confiables para determinar fuerza y flexión respectivamente, entregando señales precisas para un correcto control de la información y procesamiento de datos, y por tanto, una reproducción más satisfactoria de la interacción de la mano real.

No se desecha la idea de que una combinación de sensores hubiese ayudado a generar un prototipo más robusto y completo, como el haber utilizado sensores IMU para calcular posición y orientación absoluta y relativa respecto a un punto (como puede ser la muñeca) o para medir la fuerza haber usado sensores capacitivos, los cuales presentan mayor resolución y estabilidad que los resistivos, por ejemplo. No obstante, hay que recordar que fueron varios los aspectos que se ponderaron para la selección de los sensores, entre ellos la facilidad de implementación y el precio. Se debe considerar que, de haber optado por alguno de los sensores recién mencionados, se hubiesen visto directamente comprometidos estos criterios de selección: pues los que existen en el mercado son muy voluminosos o no es tan fácil adaptarlos al uso para el que se necesitaban (afectando el criterio de facilidad de implementación); y puesto que lo que menos se quiere es interferir con la naturalidad de los movimiento de la mano, esto hubiese obligado a buscar sensores con especificaciones dimensionales particulares o, en el peor de los casos, a un desarrollo de nuevos sensores a pesar de tratarse de tecnologías existentes (haciendo que el proyecto fuese poco rentable). Por estas razones es que se decidió trabajar con los sensores resistivos.

Los resultados objetivos del desempeño del prototipo (control de la simulación, procesamiento de datos, visualización e información para análisis) mostraron en las gráficas comportamientos más estables y sin grandes variaciones el rango de su amplitud cuanto más adaptado está el objeto para ser manipulado por una mano humana. Por otra parte, los resultados subjetivos siguen perteneciendo a la opinión del usuario, pues están relacionados directamente con la percepción de cada persona de lo que es cómodo, útil y fácil de usar, y aún deben ser tomados en cuenta, junto con los resultados que se logren obtener con ayuda del guante, para ofrecer más información para los estudios ergonómicos y así tener un panorama completo de lo que es o no funcional en el diseño del objeto.

Se debe de recocer que el prototipo tiene ciertas limitaciones que no permitirían hacer estudios ergonómicos profundos, limitaciones que se plantean mejorar como trabajo a futuro. En primer lugar, se podría mencionar que la posición de los sensores no coincide con el lugar del dedo donde se aplica la fuerza para sujetar un objeto, pues esta no se hace exactamente con el centro de la yema de los dedos, sino que todas las partes del dedo colaboran en la sujeción. En paralelo con lo anterior, es la cantidad de sensores con que cuenta el guante, ya que al no poder poner sensores en todas las zonas de la mano que se involucran en la sujeción, se tuvo que acotar las partes donde se colocarían sensores. En segundo lugar, el tipo de sensores utilizados tienen sus limitaciones: los *flex sensor*, están restringidos a medir únicamente un grado de libertad, que en este caso es el ángulo rotación en la flexión de los dedos, pero no se pueden calcular posiciones en el espacio; los FSR, por otro lado, funcionan muy bien sobre superficies planas, característica que no se ajusta a la forma de los dedos, además de que solo son capaces de medir fuerzas normales, pero no tangenciales. Asimismo, se debe de resaltar que existe una inevitable interposición por parte de los sensores de fuerza con el agarre directo mano-objeto, porque al no poderse medir la fuerza de presión indirectamente, es necesario colocar sensores sobre la mano para hacer posible la medición de la fuerza durante la interacción. Por último, se puede sugerir un cambio en el tipo de material del que está hecho el guante, pues el bajo coeficiente de fricción de la tela da una sensación diferente de agarre al que se tiene con la mano desnuda; otra razón para esto sería tener en cuenta que la fricción del algodón podría generar inferencias causadas por la estática.

Finalmente, para concluir, se puede decir que, a pesar de que existen investigaciones o productos comerciales que se encargan de medir ya sea la fuerza de los dedos o los ángulos en sus articulaciones, no hay proyecto alguno que conjunte la medición de ambos parámetros, además de que el enfoque que se les da, muchas veces no está dirigido hacia la ergonomía, sino al entretenimiento, algún tipo de entrenamiento, fines médicos o industriales. Por lo que esta área es una oportunidad de investigación que tiene mucho potencial y evidentemente crecerá a la par de los avances tecnológicos en informática, instrumentación y materiales, haciendo que guantes de este tipo sean más baratos, más versátiles y más potentes.

Bibliografía

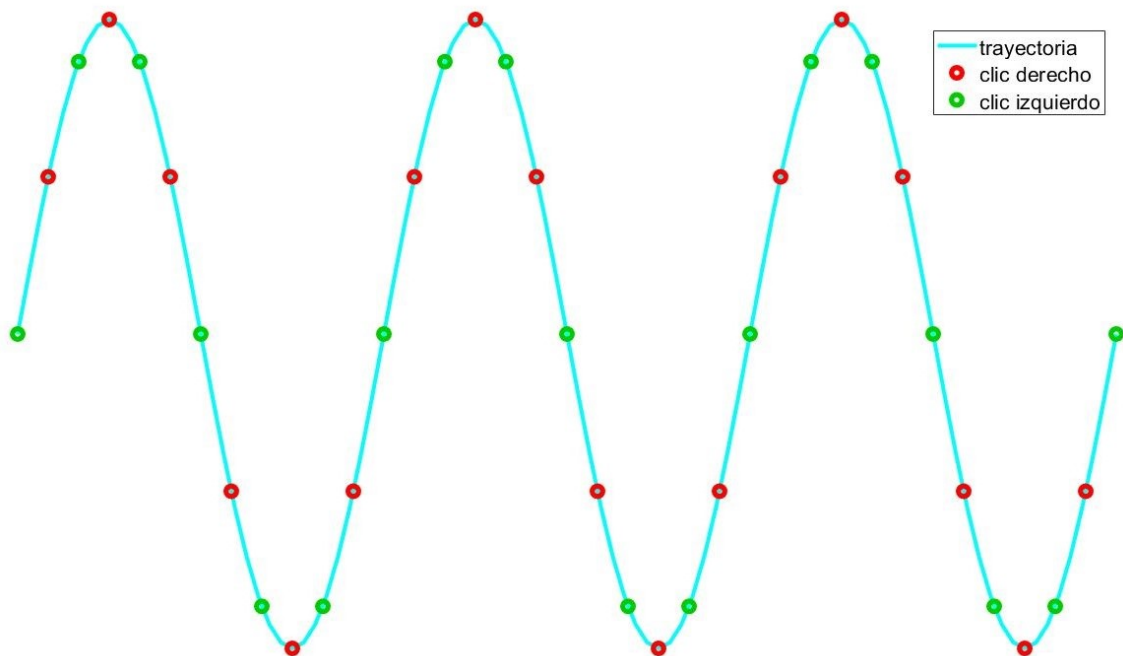
- [1] IEA. *International Ergonomics Association*. 2019
[Online] Disponible: <https://www.iea.cc/index.php>
(Vid. pág. 3).
- [2] Joachim Vedder Wolfgang Laurig. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. 4^{ta}ed. Vol. 1 Herramientas y Enfoque. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2001 (vid. pág. 3).
- [3] Pedro R. Mondelo et al. *Ergonomía 1, Fundamentos*. 3^{ra}ed. Edicions UPC, 1999 (vid. pág. 3).
- [4] Andrés Ganica G. J. Alberto Cruz G. *Ergonomía Aplicada*. 4^{ta}ed. ECOE ediciones, 2010 (vid. pág. 3).
- [5] Gustavo Rosál López Daniel Iglesias Pastrana. *Guía de Buenas Prácticas Ergonómicas*. distribuido por la FADE (Federación Asturiana de Empresarios). 2009 (vid. pág. 3).
- [6] André Delmas Henry Rouviere. *Anatomía Humana, Descriptiva, Topográfica Y Funcional*. 11^{va}ed. Vol. III. Masson, 2005 (vid. págs. 9-14).
- [7] Briana Osorio. “Dispositivo para traducción de Lenguaje de Señas a Texto y Voz”. Tesis de mtría. Universidad de Sonora, mar. de 2016 (vid. pág. 15).
- [8] Juan Fernando García Mejía. “Diseño e Implementación de un Sistema de Posición de los Dedos de la Mano con Aplicaciones en el Tratamiento de Trastornos de Procesamiento Auditivo-Visual”. Tesis de mtría. Universidad Autónoma del Estado de México, ene. de 2016 (vid. pág. 15).
- [9] Inc Tekscan. *Grip System, Tactile Grip Force Pressure Measurement*. 2018
[Online] Disponible:
<https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/grip-system?tab=description>
(Vid. págs. 15, 16).
- [10] NexGen Ergonomics Inc. *Glove Pressure Mapping System*. 2016
[Online] Disponible: <http://www.nexgenergo.com/ergonomics/nexglove.html>
(Vid. págs. 16, 17).
- [11] Hoggan Scientific. *ergoGLOVE*. 2017 [Online] Disponible:
<https://hogganscientific.com/product/ergopak-ergoglove-ergonomic-fsr-sensor-system/>
(Vid. pág. 17).
- [12] Pressure Profile Systems. *Finger TPS*. 2010
[Online] Disponible: <https://pressureprofile.com/>
(Vid. págs. 18, 28).

- [13] NeuroDigital Technologies. *Avatar VR*. 2018
[Online] Disponible: <https://www.neurodigital.es/avatarvr/>
(Vid. pág. 19).
- [14] Leap Motion Inc. *Leap Motion*. 2018
[Online] Disponible: <https://www.leapmotion.com/>
(Vid. pág. 20).
- [15] Jordi Belda. *Leap Motion (II): principio de funcionamiento*. 2015
[Online] Disponible:
<http://blog.showleap.com/2015/05/leap-motion-ii-principio-de-funcionamiento/>
(Vid. págs. 20, 31).
- [16] Virtual Motion Labs. *VMG Data Gloves*. 2018
[Online] Disponible: <https://www.virtualmotionlabs.com/>
(Vid. pág. 21).
- [17] CyberGlove Systems. *CyberGlove*. 2017
[Online] Disponible: <http://www.cyberglovesystems.com/>
(Vid. págs. 21, 22).
- [18] Fifth Dimension Technologies. *Data Glove*. 2018
[Online] Disponible: <http://www.5dt.com/data-gloves/>
(Vid. págs. 23, 24).
- [19] Anton Stepanov. *Enable Talk*. 2012 [Online] Disponible: <http://enabletalk.com/>
(Vid. págs. 23, 24).
- [20] Takao Someya Sungwon Lee. “A transparent bending-insensitive pressure sensor”. En: *Nature Nanotechnology* (ene. de 2016) (vid. págs. 23, 24).
- [21] OpenXR Khronos group. *Antilatency positional tracking system*. 2017
[Online] Disponible: <https://antilatency.com/>
(Vid. pág. 24).
- [22] lady ada. *Force Sensitive Resistor (FSR)*. Adafruit Industries. Ago. de 2018
[Online] Disponible:
<https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/force-sensitive-resistor-fsr.pdf>
(Vid. pág. 26).
- [23] *Know all about Force Sensing Resistor Technology*. blog. Elprocus, 2013
[Online] Disponible: <https://www.elprocus.com/force-sensing-resistor-technology/>
(Vid. pág. 26).
- [24] Albert D. Helfrick William D. Cooper. *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición*. Pearson, Prentice Hall, 1991 (vid. págs. 27, 28).
- [25] *Strain Gauge*. Omega, 2003
[Online] Disponible: <https://www.omega.co.uk/prodinfo/StrainGauges.html>
(Vid. pág. 27).
- [26] Ramón Pallás Areny. *Sensores y Acondicionadores de Señal*. 4^{ta}ed. Marcombo, 2007 (vid. pág. 28).
- [27] Wikipedia. *Sensor Piezoeléctrico*. 2018
[Online] Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_piezoel%C3%A9ctrico
(Vid. pág. 29).

- [28] Carmine Forino. *Detecting obstacle with IR Sensor*. 2018 [Online] Disponible: <https://www.playembedded.org/blog/detecting-obstacle-with-ir-sensor-and-arduino/> (Vid. pág. 29).
- [29] Windsor B Kitagawa M. *Motion Capture*. 2015 [Online] Disponible: <https://coatayork1.wordpress.com/> (Vid. págs. 30, 31).
- [30] Dimitra Blana. *Hand motion capture*. blog. Medium, abr. de 2018 [Online] Disponible: <https://medium.com/the-quest-for-a-life-like-prosthetic-hand/hand-motion-capture-e7dd2c2205d7> (Vid. pág. 30).
- [31] Microsoft. *Kinect Troubleshoot body tracking*. 2019 [Online] Disponible: <https://support.xbox.com/en-BZ/xbox-360/kinect/body-tracking-troubleshoot> (Vid. pág. 31).
- [32] Brayán Bermúdez. *Sensor Ultrasónico HC-SR04*. blog. PSoC Latinoamérica, nov. de 2016 [Online] Disponible: <https://blog.psoclatinoamerica.co/sensor-ultrasonido-hc-sr04-con-psoc5lp/> (Vid. pág. 31).
- [33] jimblom. *Flex Sensor Hookup Guide*. SparkFun Electronics. Ago. de 2009 [Online] Disponible: https://learn.sparkfun.com/tutorials/flex-sensor-hookup-guide?_ga (Vid. pág. 32).
- [34] Naylamp. *Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio*. blog. NAYLAMP Mechatronics, jul. de 2016 [Online] Disponible: https://naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html (Vid. págs. 32, 33).
- [35] Wikipedia. *Divisor de Tensión*. 2018 [Online] Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Divisor_de_tensi%C3%B3n (Vid. pág. 41).
- [36] *Sensing A Bend With A Flex Sensor + Arduino, Force-Sensitive Resistor + Arduino*. blog. bildr.org, nov. de 2012 [Online] Disponible: <http://bildr.org/> (Vid. pág. 41).
- [37] Luis Llamas. *Entradas Analógicas en Arduino*. blog. Sep. de 2014 [Online] Disponible: <https://www.luisllamas.es/entradas-analogicas-en-arduino/> (Vid. pág. 42).
- [38] Unity Technologies. *Unity*. 2018 [Online] Disponible: <https://unity3d.com/es> (vid. pág. 43).
- [39] Óscar González. *Lanzador (Pitcher)*. blog. Feb. de 2012 [Online] Disponible: <http://beisbolinformativo.blogspot.com/2012/02/lanzador-pitcher.html> (Vid. pág. 55).

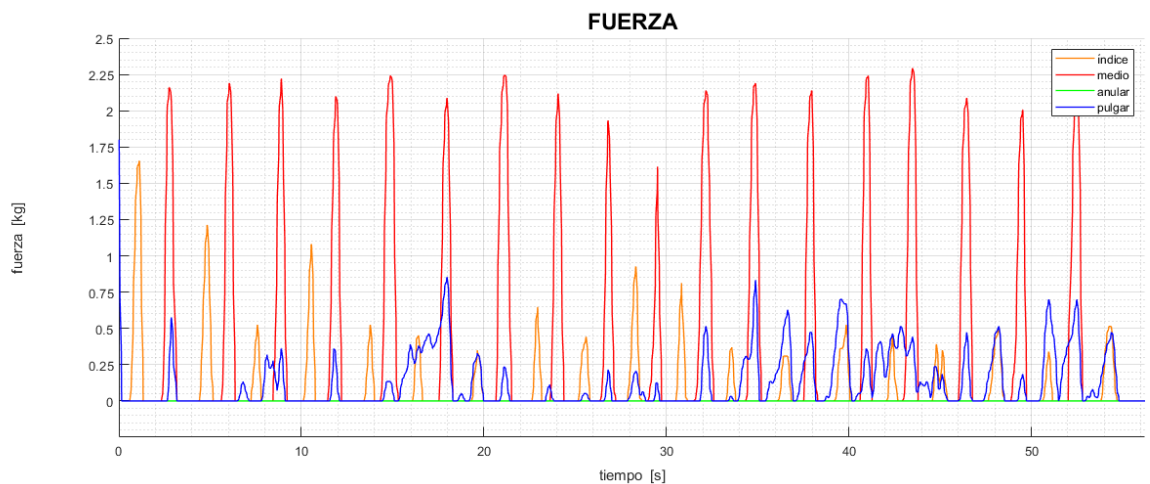
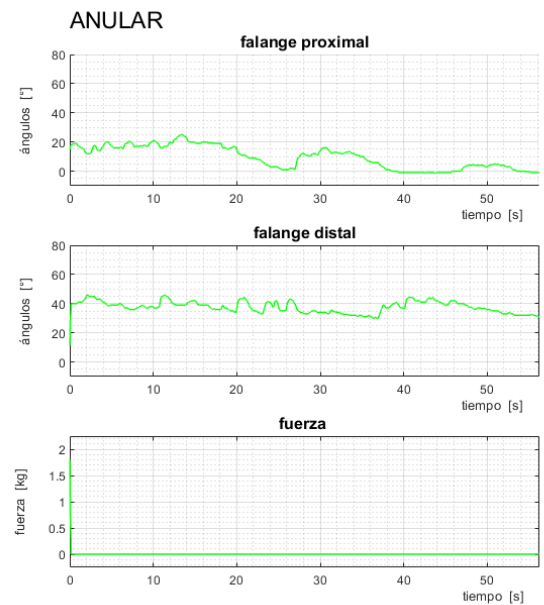
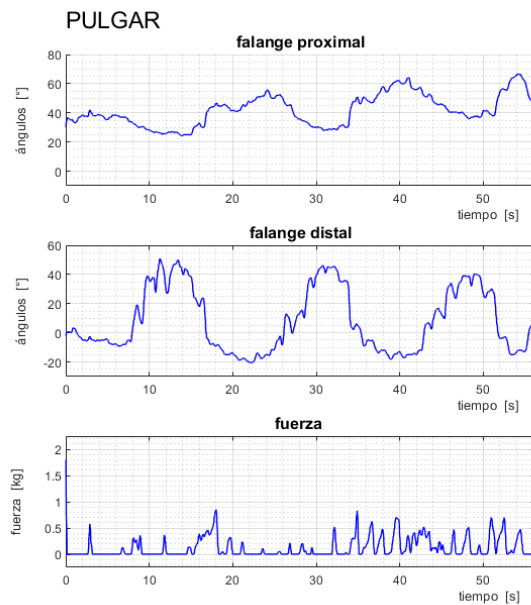
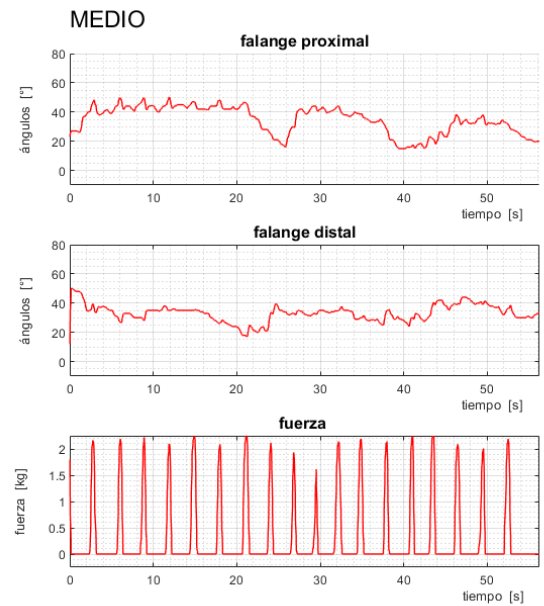
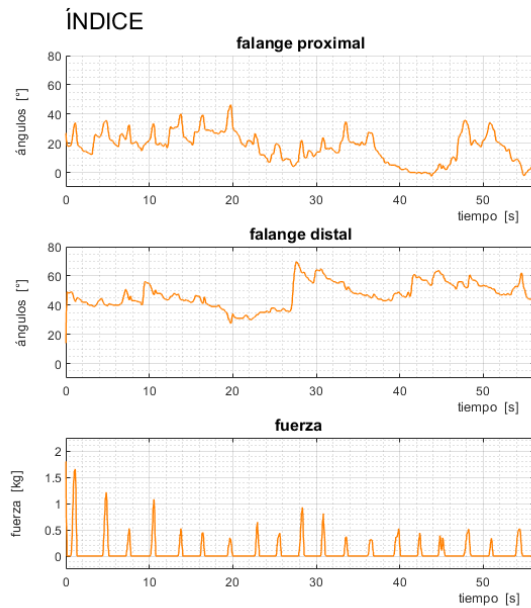
Apéndice A

Apéndice del Capítulo 5

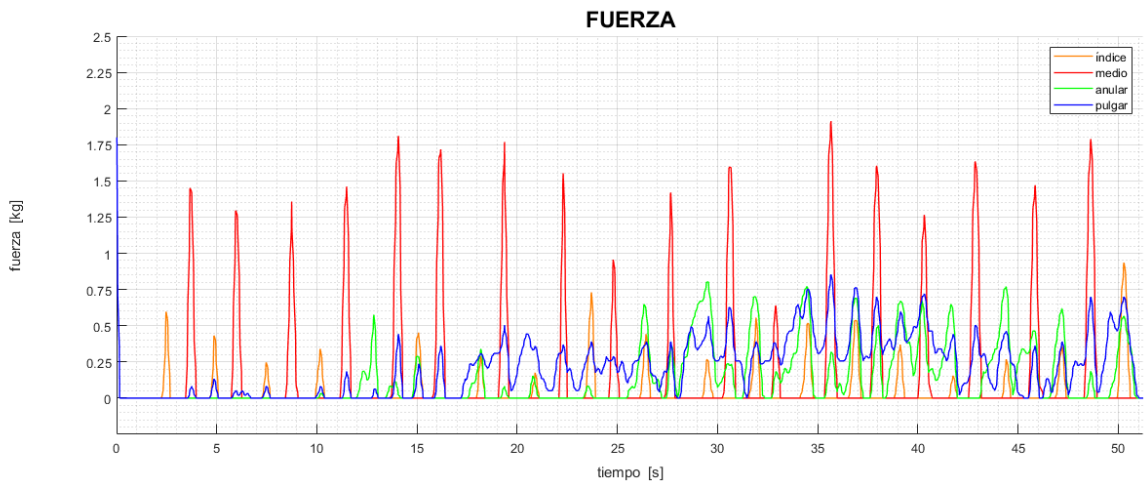
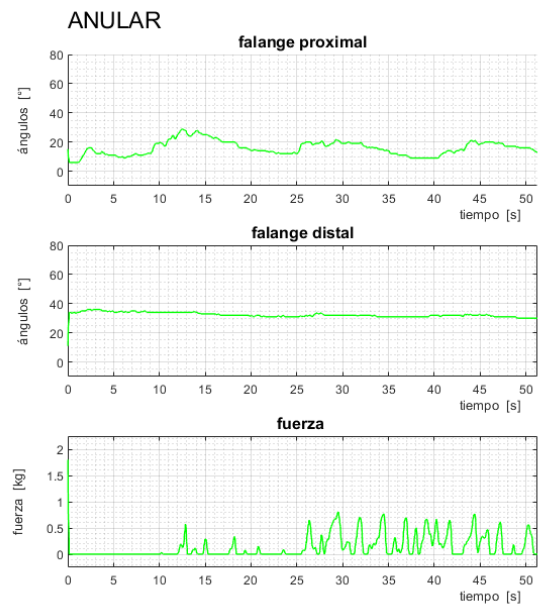
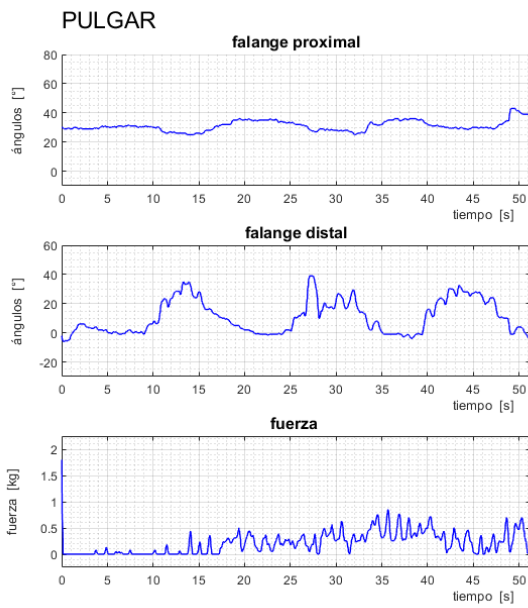
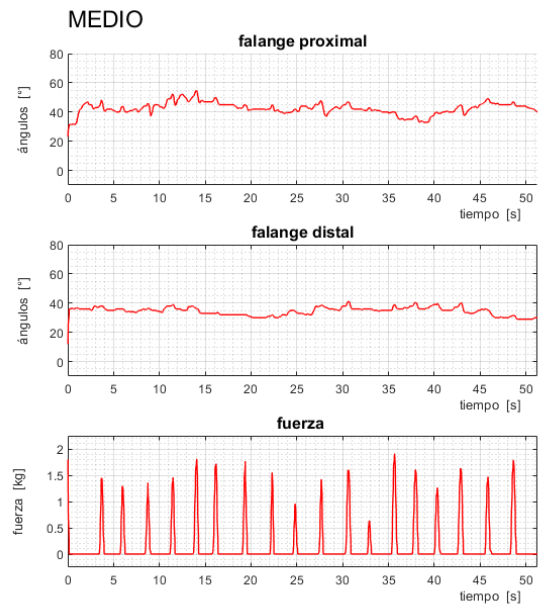
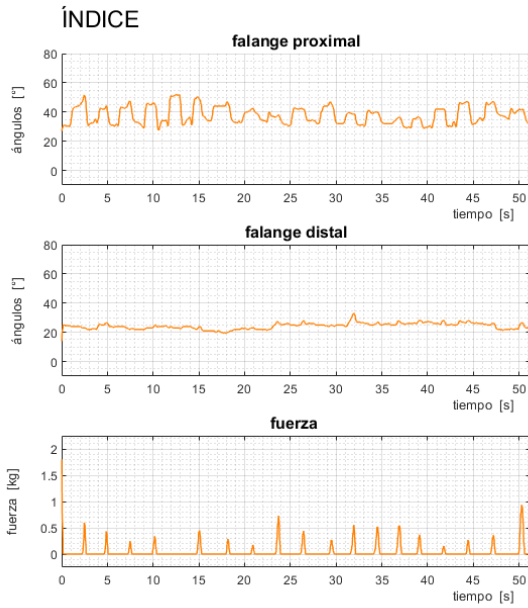


Trayectoria utilizada para la fase de experimentación.

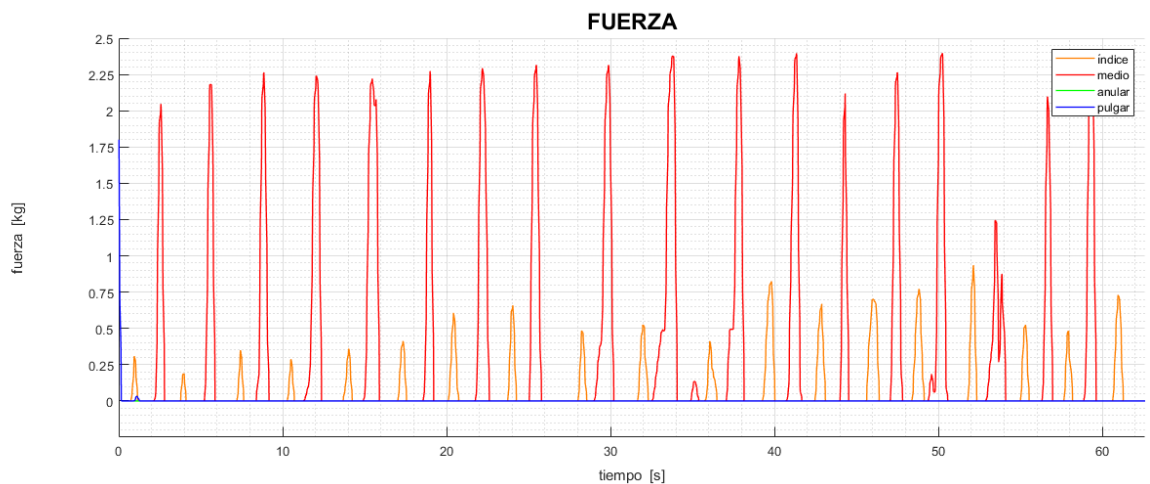
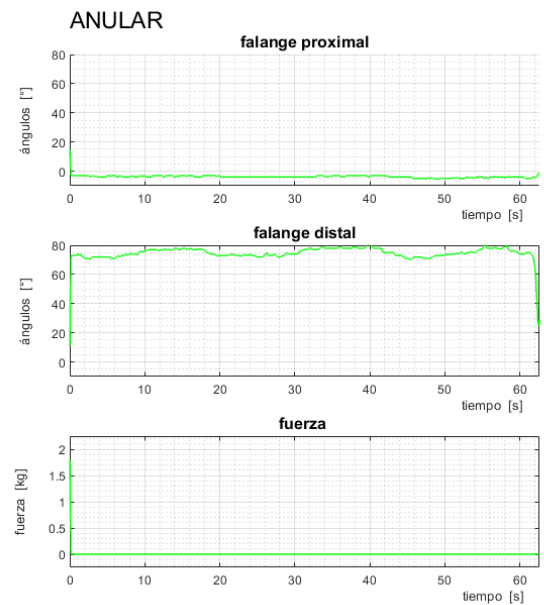
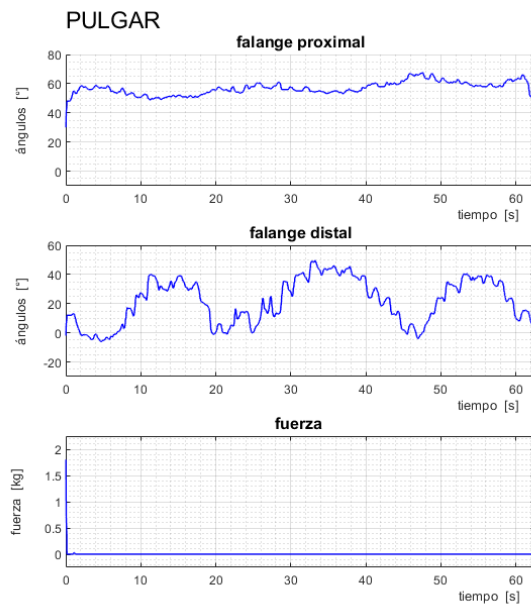
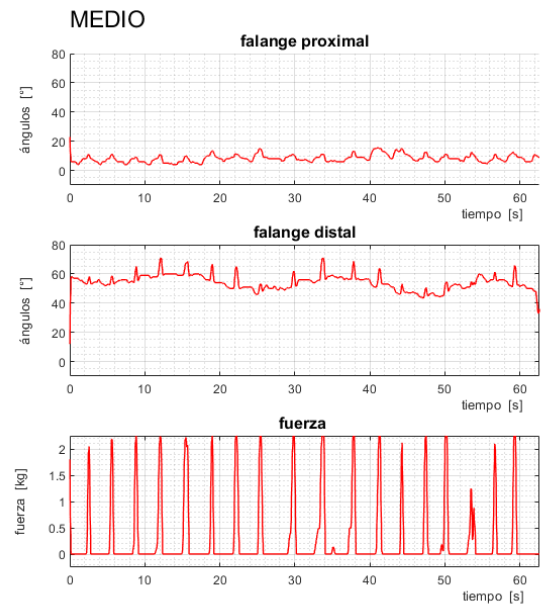
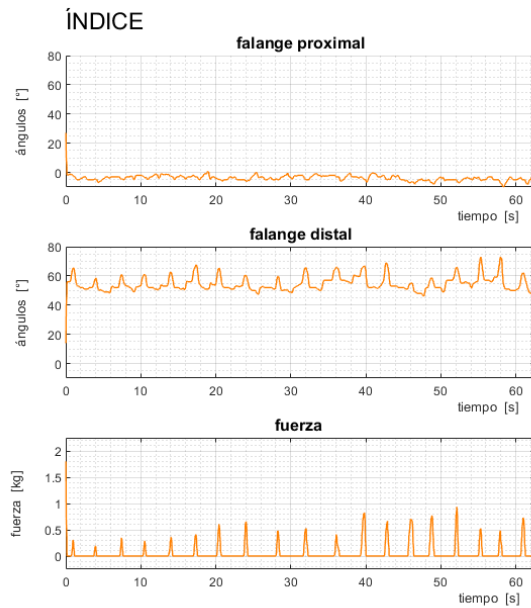
Sujeto 1 - ratón común



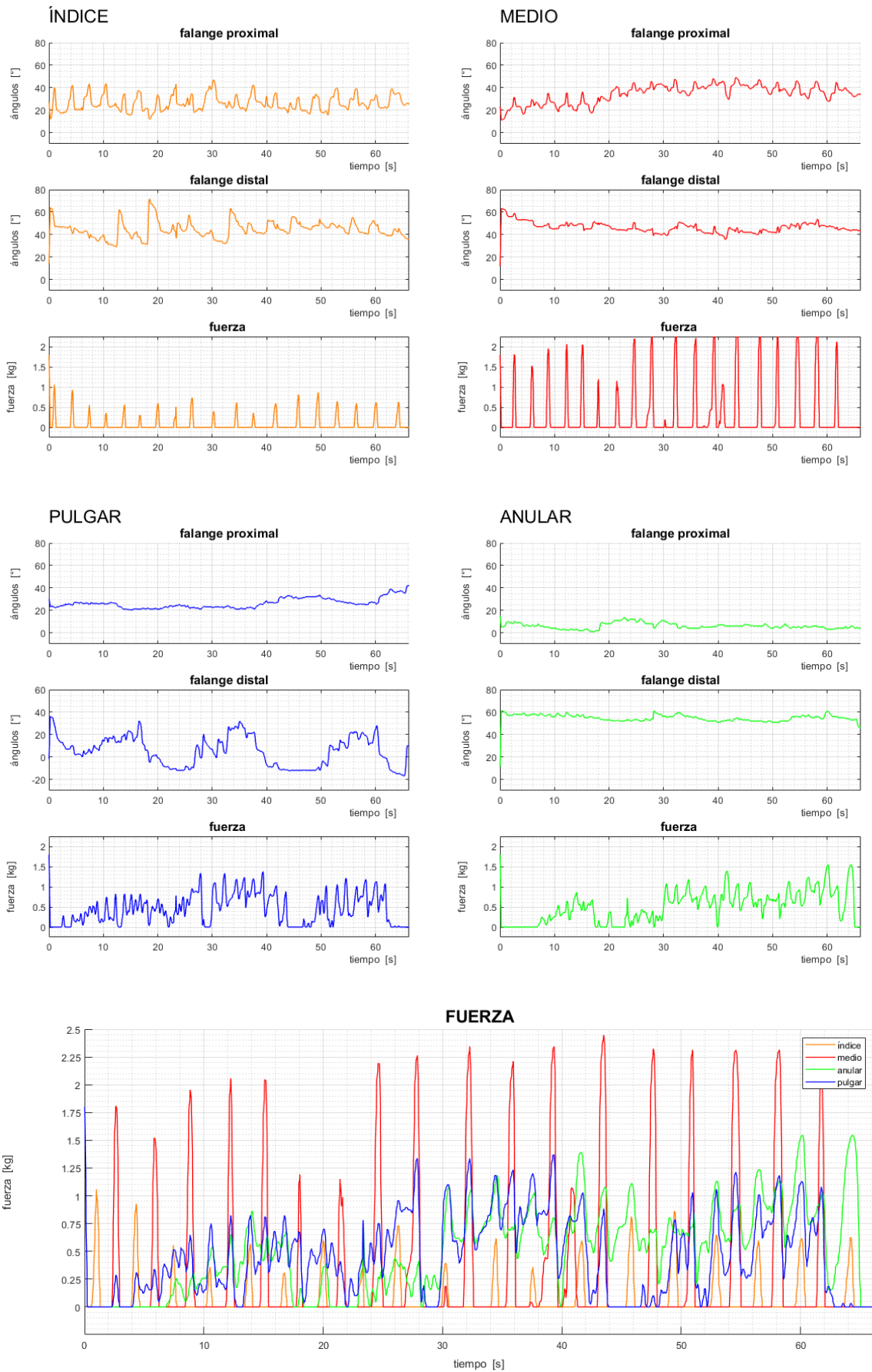
Sujeto 1 - ratón gamer



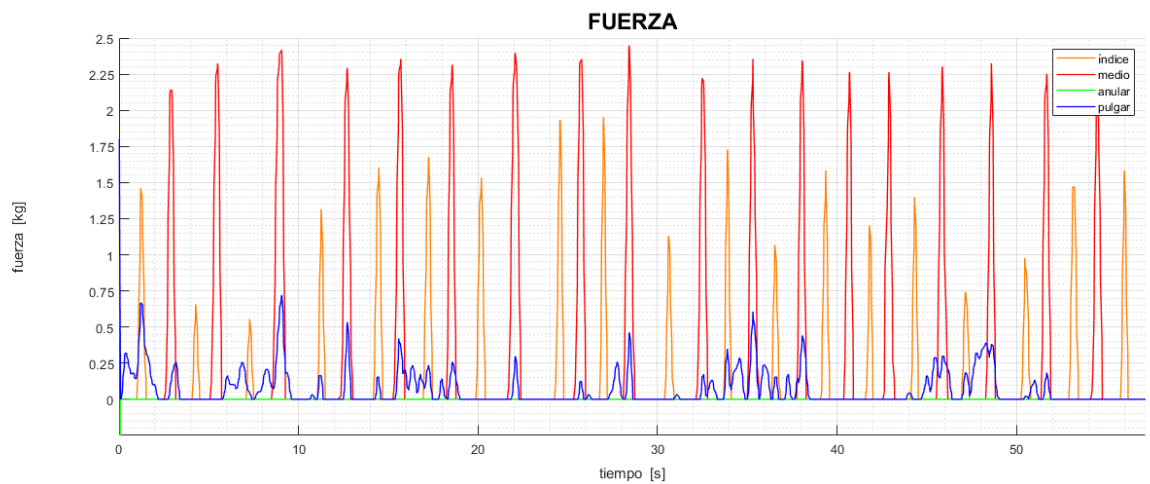
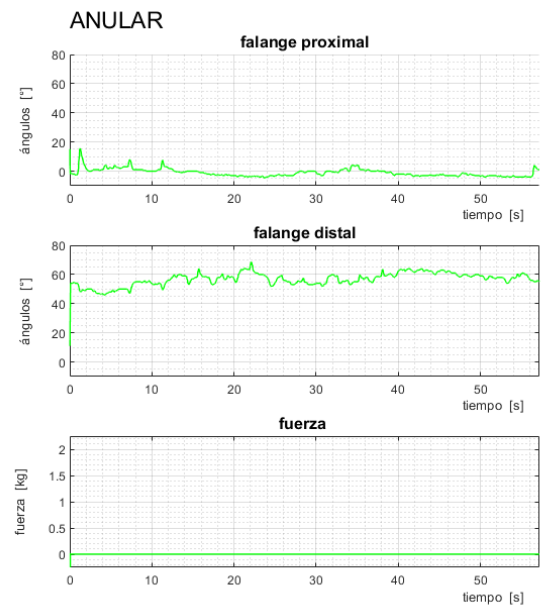
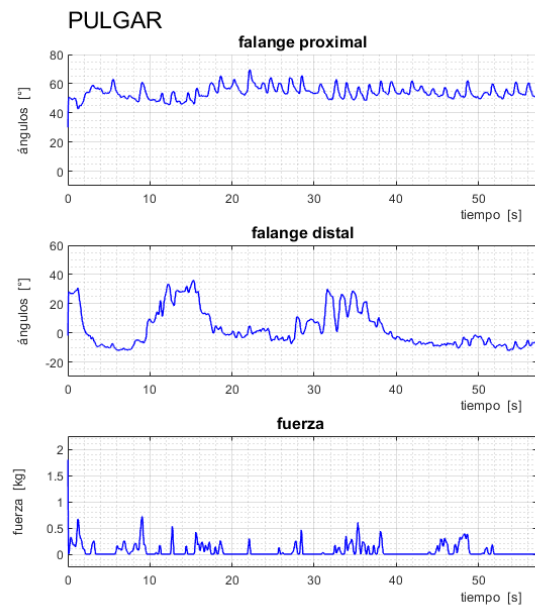
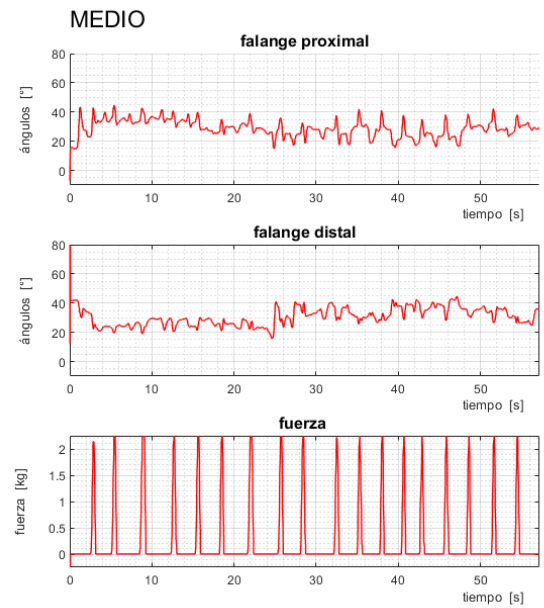
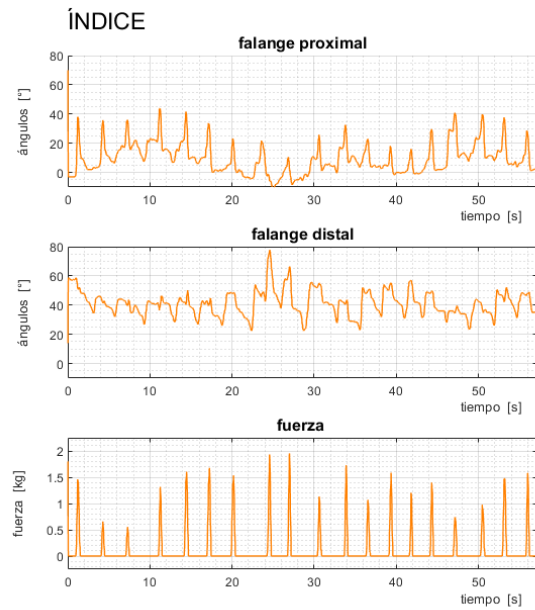
Sujeto 1 - ratón plegable



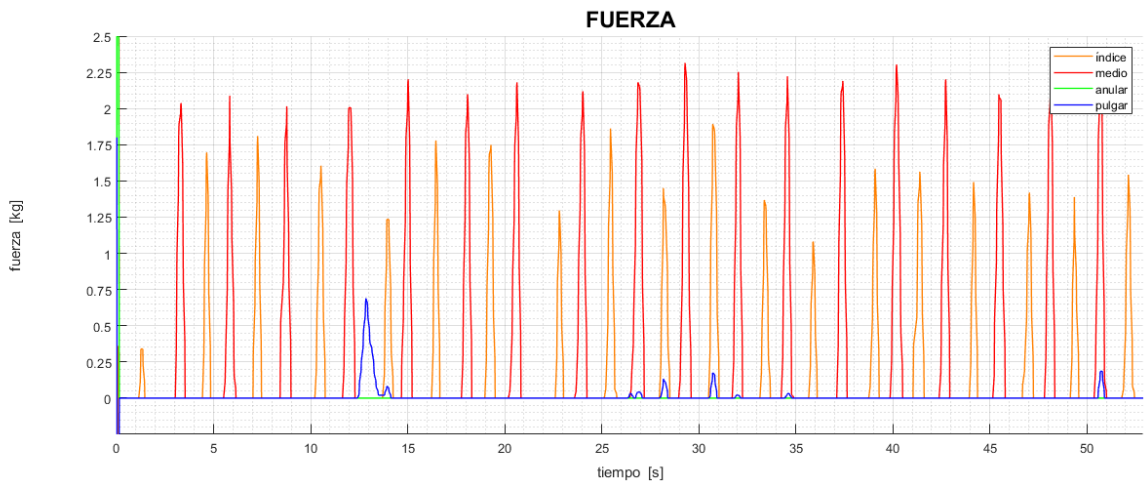
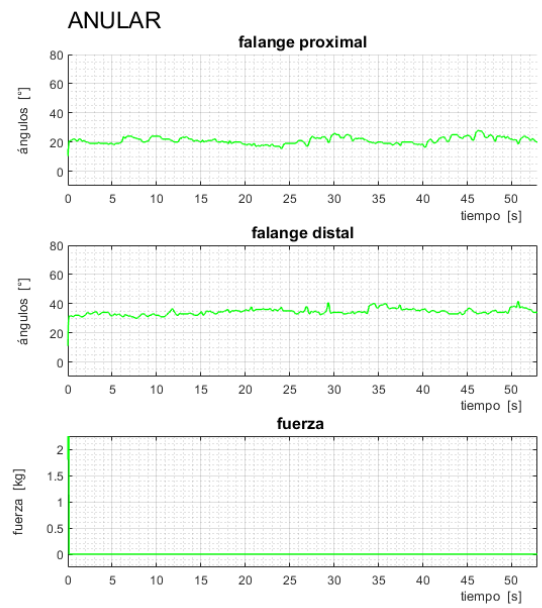
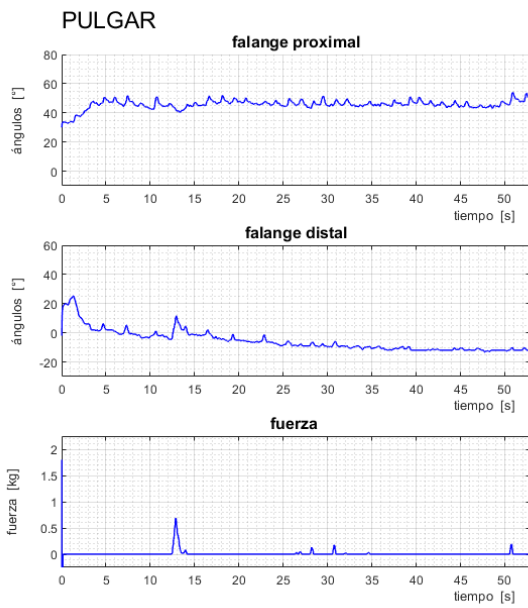
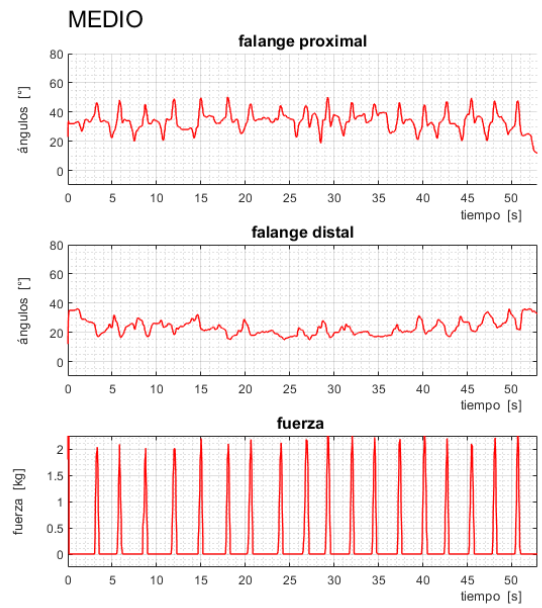
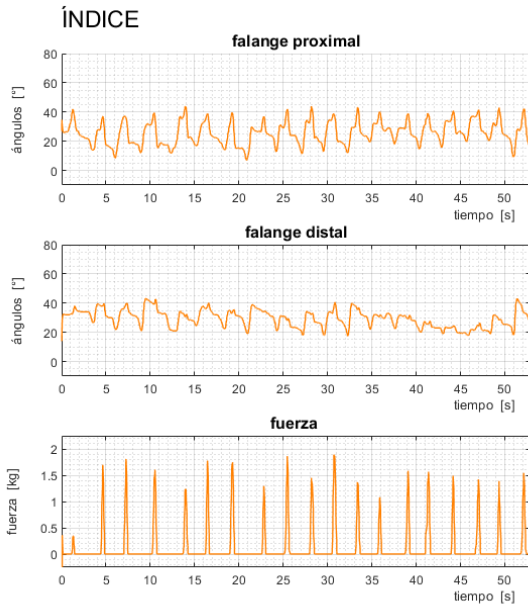
Sujeto 1 - ratón mini



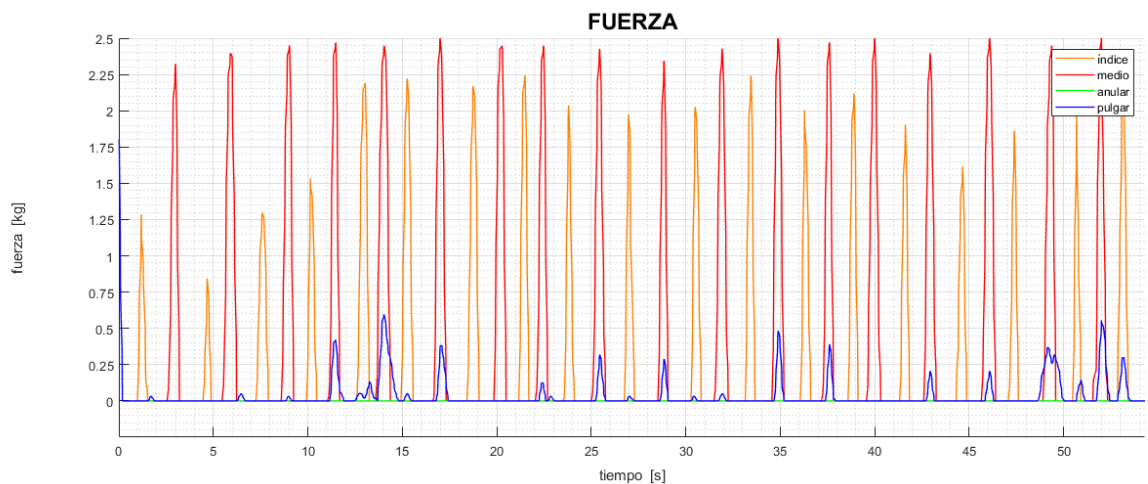
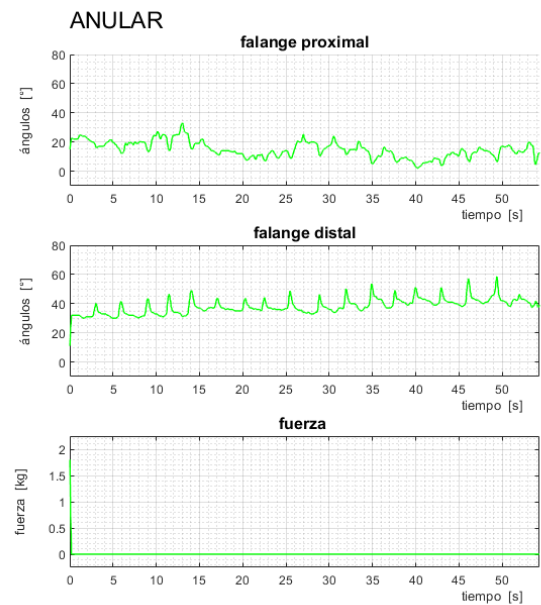
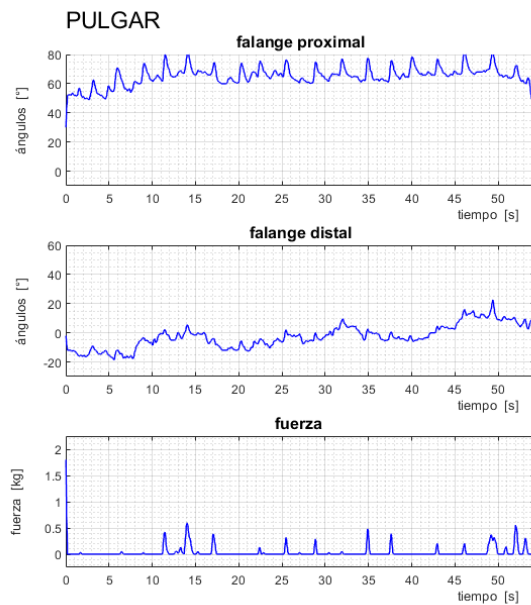
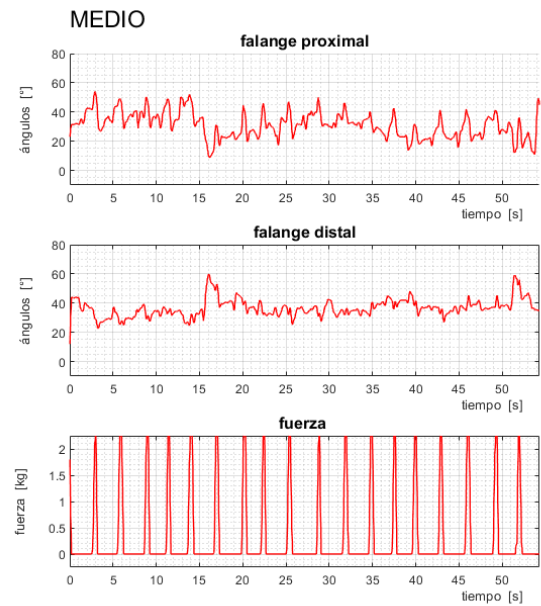
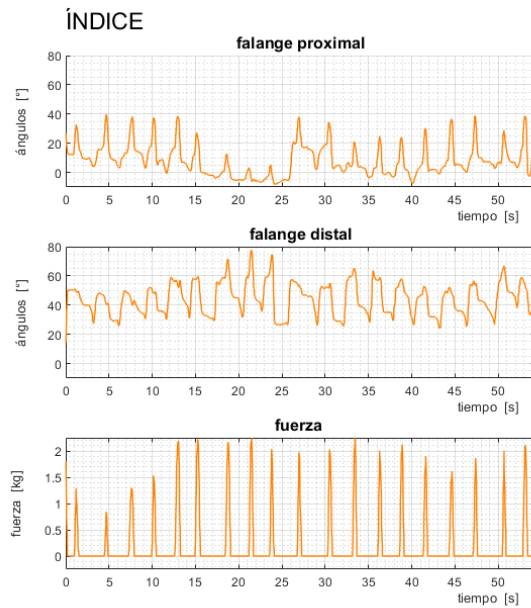
Sujeto 2 - ratón común



Sujeto 2 - ratón gamer



Sujeto 2 - ratón plegable



Sujeto 2 - ratón mini

