



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA LÚDICO PARA EJERCICIOS DE TERAPIA
DE LA ZONA CARPIANA Y FALANGES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA:

AMAURY PÉREZ TIRADO

DIRECTOR DE TESIS:

ING. LUIS YAIR BAUTISTA BLANCO



MEXICO, D.F.

NOVIEMBRE, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos

A mis padres y hermanos que pusieron su confianza en mí y me dieron su apoyo incondicional para cumplir mis objetivos a lo largo de toda la carrera.

A mis amigos de Xalapa con los que siempre pude contar, que hicieron que nunca me sintiera incompleto mientras estaba alejado de mi hogar y en cada visita que hacía.

A mis amigos cuyo vínculo fue creado a través de la carrera que me permitieron trabajar con ellos en equipo, donde compartimos frustraciones y diversión en los proyectos, y nos acompañamos mutuamente a lo largo de esta aventura.

A Luis Yair Bautista Blanco por todo su apoyo como un gran asesor y un buen amigo, cuyas aportaciones enriquecieron este trabajo, además de poner su confianza mi desempeño.

A todas las personas que me acompañaron durante la realización de este proyecto, que colaboraron de alguna forma y que me ayudaron a sentirme motivado a seguir trabajando.

Índice

Índice	1
Lista de Figuras	5
Lista de Tablas.....	9
1 Introducción	10
2 Antecedentes	12
2.1 La mano	12
2.1.1 Anatomía y fisiología de la mano.....	13
2.1.2 Patología de la mano	18
2.2 Conceptos básicos de Rehabilitación.....	19
2.2.1 Fisioterapia	19
2.2.2 Cinesiterapia	20
2.2.3 Goniometría aplicada a las ciencias médicas	21
2.3 Ejercicios Terapéuticos.....	22
2.3.1 Modelo de intervención.....	22
2.3.2 Elaboración de un plan de ejercicios terapéuticos.....	24
2.3.3 Aspectos funcionales de los ejercicios terapéuticos.....	26
2.4 Elementos lúdicos para Rehabilitación.....	27
2.4.1 Técnicas Lúdicas	28
2.4.2 Beneficios del Juego.....	29
2.4.3 Terapias basadas en interfaces humano computadora.....	30
2.4.4 Psicología de los juegos de video.....	32
3 Estado del arte	34
3.1 Mecanoterapia para miembro superior	34
3.2 Retroalimentación en la mecanoterapia.....	39

3.3	Patentes sobre rehabilitación de la mano.....	44
4	Objetivo.....	47
4.1	Objetivos específicos.....	47
5	Justificación.....	48
6	Problemática.....	49
7	Metodología de diseño.....	50
8	Diseño conceptual.....	51
8.1	Necesidades.....	51
8.2	Requerimientos.....	51
8.3	Especificaciones.....	52
8.4	Concepto.....	54
8.5	Sistemas involucrados.....	56
8.6	Relación entre las especificaciones y los sistemas involucrados.....	58
8.7	Carta morfológica.....	60
8.8	Elecciones independientes.....	62
8.8.1	Elección del Sistema de procesamiento.....	62
8.8.2	Elección del Sistema Lúdico.....	63
8.8.3	Elección del Sistema Control.....	63
8.8.4	Elección del sistema de Almacenamiento.....	64
8.8.5	Sistema de Interfaz.....	64
8.9	Soluciones propuestas.....	65
8.9.1	Solución 1: Motor DC. Cable con Poleas– Encoder – Estructura fija – Comunicación USB – Regulador toma corriente.....	66
8.9.2	Solución 2: Motor DC, Cable con Poleas – Sensor de flexión/ IMU—Móvil – Comunicación USB -- Regulador toma corriente.....	67

8.9.3	Solución 3 Motor DC, Piñón-Cremallera—Encoder/IMU – Móvil – Comunicación Bluetooth – Batería de litio.....	68
8.9.4	Solución 4: Motor DC, Piñón-Cremallera—Slider (Potenciómetro) – Estructura Fija – Comunicación USB – Regulador toma corriente.....	69
8.10	Solución elegida.....	70
8.10.1	Prueba de concepto.....	71
9	Diseño de configuración.....	73
9.1	Aspectos generales.....	73
9.1.1	Consideraciones físicas del paciente	74
9.2	Sistema de soporte	76
9.3	Sistema de ajuste.....	81
9.4	Sistema de Actuación.....	83
9.5	Sistema de Control.....	85
9.6	Sistema de Sensores.....	87
9.6.1	Sensor de flexión	87
9.6.2	IMU	89
9.7	Sistema de Procesamiento	91
9.8	Sistema de Comunicación.....	94
9.9	Sistema de Alimentación	96
9.10	Interfaz gráfica.....	96
9.10.1	Sistema de Almacenamiento	98
9.10.2	Desarrollo de juegos de video	99
9.10.3	Juego en 2D dinámica para ejercitar las falanges.....	100
9.10.4	Juego en 3D dinámica para ejercitar la muñeca	103
10	Resultados.....	106
10.1	Prueba de los elementos lúdicos	106

10.2	Prueba de análisis biomecánico de los ejercicios	108
10.3	Valores obtenidos en las especificaciones	110
10.4	Validación del modelo	112
10.5	Trabajo a futuro	114
11	Conclusión.....	116
12	Bibliografía.....	119

Lista de Figuras

Figura 2.1 Comparación de la mano humana con otros primates cercanos	12
Figura 2.2 Los huesos que componen a la mano	14
Figura 2.3 Articulación condílea que pertenece a la muñeca	14
Figura 2.4 Movimientos sobre la muñeca de pronación y supinación	15
Figura 2.5 Articulación del dedo pulgar en forma de silla de montar	15
Figura 2.6 Las falanges con su articulación en forma de polea.....	16
Figura 2.7 Algunos de las formas que puede adoptar la mano para sujetar un objeto.	16
Figura 2.8 Clasificación de los agarres según la forma y los elementos involucrados.	17
Figura 2.9 Ejemplo de cinesiterapia activa en la izquierda y pasiva en la derecha.....	21
Figura 2.10 Modelo de intervención con ejercicio terapéutico.	23
Figura 2.11 Modelo de tratamiento del paciente. [25]	25
Figura 2.12 Ejemplo de un juego serio como método de rehabilitación. [36]	31
Figura 3.1 Mesa de Kanavel con las pesas para los dedos, y los elementos rotatorios. [45]	34
Figura 3.2 Modelo del Hand Grip®, se puede observar el resorte torsional. [46]	35
Figura 3.3 Dispositivo FiddLink® en posición para girarlo. [47].....	35
Figura 3.4 Muestra de uno de los ejercicios con Power-Web® [49]	36
Figura 3.5 Visualización del ejercicio de Handmaster® [50]	37
Figura 3.6 Muestra de cómo se emplea el Digi-Extend®. [51].....	37
Figura 3.7 Ejemplo del tamaño Gripmaster® en una mano. [53]	38
Figura 3.8 En el Varigrip® se puede observar en la parte inferior los tornillos de ajuste. [54]	38
Figura 3.9 Visualización del producto Xtensor® puesto en acción [56].....	39
Figura 3.10 Muestra del sistema Amadeo® con su interfaz y su aplicación sobre una mano. [57]	40

Figura 3.11 Componentes del Sistema Pablo®: el control y sus accesorios. [58]	40
Figura 3.12 Prueba con los brazos del sistema Diego® de Tyromotion. [59]	41
Figura 3.13 Armeo Boom® probado en una laptop. [60]	41
Figura 3.14 Ultra con uno de sus ejercicios para la mano. [61]	42
Figura 3.15 Muestra de la implementación del Hand Mentor. [62]	42
Figura 3.16 Visualización de uno de los ejercicios del Hand Tutor. [63]	43
Figura 3.17 Gloreha Glove® con su visualización 3D en una pantalla de computadora. [64]	43
Figura 3.18 Método y aparato para la rehabilitación del movimiento de masas-entregado. [65]	44
Figura 3.19 Extraído de Dispositivo de rehabilitación de dedo elástico tipo separable [66]	44
Figura 3.20 Guante inteligente multi-usuario [67]	45
Figura 3.21 Dispositivo vestibular de rehabilitación para la mano. [68].....	45
Figura 3.22 Guante de ejercicio o rehabilitación con pesas de dedo. [69]	46
Figura 8.1 Diagrama de caja negra con las entradas y las salidas correspondientes.	56
Figura 8.2 Relación entre los subsistemas en los que se divide el sistema.	57
Figura 8.3 Boceto de la solución 1.	66
Figura 8.4 Boceto de la solución 2.	67
Figura 8.5 Boceto de la solución 3.	68
Figura 8.6 Boceto de la solución 4.	69
Figura 9.1 Recorrido posible para una persona saludable en las falanges proximales. [24]	73
Figura 9.2 Recorrido en la muñeca con respecto a dos diferentes ejes. [24].....	74
Figura 9.3 Visualización de las articulaciones en la mano en la enfermedad. [70].....	74
Figura 9.4 Ejercicios de rango para la mano. [71].....	75
Figura 9.5 En (A) es un ejercicio de supinación con banda elástica y en (B), un ejercicio de desviación radial de la muñeca con plastilina	75

Figura 9.6 En (C) el ejercicio consiste en enrollar una toalla, mientras que en (D) consiste en flexionar las falanges proximales	76
Figura 9.7 Dibujo asistido por computadora del joystick y la estructura posterior.....	77
Figura 9.8 Muestra del desarrollo del molde para trabajar la espuma de poliuretano.....	78
Figura 9.9 Joystick recubierto con la imitación de piel y la polea contenida en su interior.	78
Figura 9.10 Estructura de soporte posterior con los hilos colocados.	79
Figura 9.11 CAD de la estructura compuesta por el joystick, la estructura posterior y la base esférica.....	79
Figura 9.12 Cálculos y visualización que se consideraron para la construcción de la base.	80
Figura 9.13 Visualización del límite angular de la base.....	80
Figura 9.14 Base para el elemento semiesférico en CAD.....	81
Figura 9.15 Guante comercial utilizado junto con los accesorios creados para adaptarse a los dedos.....	81
Figura 9.16 Colocación de los accesorios con el guante puesto.....	82
Figura 9.17 Accesorios conectados al sistema de actuación.....	82
Figura 9.18 Visualización del sistema de transmisión de motor con poleas.....	83
Figura 9.19 Análisis de fuerzas involucradas sobre la polea.....	83
Figura 9.20 Motorreductor metálico de la marca Pololu®.....	84
Figura 9.21 Circuito del driver para controlar dos motores DC.....	84
Figura 9.22 Potenciómetro de precisión de la marca Suntan®	85
Figura 9.23 Estructura para el motor y el potenciómetro acoplados.....	85
Figura 9.24 Estructura de las costillas con los motores acomodados en CAD.....	86
Figura 9.25 Sensor de flexión de la marca Sparkfun® modelo 2.2".....	87
Figura 9.26 Datos obtenidos de un cálculo aproximado de la simulación de un divisor de voltaje.....	88
Figura 9.27 Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor de flexión.....	88
Figura 9.28 Placa electrónica GY-80	89

Figura 9.29 Ángulos del acelerómetro	90
Figura 9.30 Ejemplificación de los ángulos Pitch, Roll y Yaw en un sistema coordinado. 91	
Figura 9.31 Diagrama de flujo principal para el procesamiento.	92
Figura 9.32 Diagramas de flujo de los submétodos incluidos para el sensor de flexión y la IMU.	93
Figura 9.33 Visualización del conector y cable de USB tipo B.	94
Figura 9.34 Conexión del cable USB en la estructura base del dispositivo.	94
Figura 9.35 Diseño del circuito impreso implementado.....	95
Figura 9.36 Circuito dentro de la estructura de esqueleto conectado.....	95
Figura 9.37 Circuito de LM7805.....	96
Figura 9.38 Diagrama del comportamiento que tiene la interfaz gráfica.	97
Figura 9.39 Se visualiza las ventanas de inicio de la interfaz.	97
Figura 9.40 Ejemplo de la visualización de la Ventana de Usuario.	98
Figura 9.41 Visualización de las burbujas de colisión en el juego Super Smash Brothers Melee	100
Figura 9.42 Ventana de control de la comunicación serial.....	101
Figura 9.43 Impresión de pantalla de la interfaz gráfica del juego en 2D.....	101
Figura 9.44 Captura de pantalla de la interfaz cuando aparece el objeto de la araña.	102
Figura 9.45 Diagrama del comportamiento de los objetos en el juego 2D.	102
Figura 9.46 Ventana previa al juego para preparación.	103
Figura 9.47 Captura de pantalla en el momento de memorizar.....	104
Figura 9.48 Captura de pantalla mientras el usuario mueve la esfera.	104
Figura 10.1 Pruebas de la interfaz completa con el dispositivo.	106
Figura 10.2 Posición inicial de la muñeca en el experimento de medición.....	108
Figura 10.3 Medida alcanzadas en el experimento de la extensión de los dedos.....	109
Figura 10.4 Medición de la abducción y aducción.	110

Lista de Tablas

Tabla 1 Necesidades y requerimientos	52
Tabla 2 Requerimientos y especificaciones del sistema.....	53
Tabla 3 Especificaciones con valores.....	54
Tabla 4 Relación entre las especificaciones y los subsistemas.	59
Tabla 5 Carta morfológica con todos los sistemas involucrados (1/2).....	60
Tabla 6 Carta morfológica con todos los subsistemas involucrados (2/2).	60
Tabla 7 Comparación entre los microcontroladores propuestos.	62
Tabla 8 Carta morfológica reducida para obtener posibles soluciones.	65
Tabla 9 Matriz de decisión entre las soluciones posibles.....	70
Tabla 10 Reglas heurísticas para el diseño de un control PID [81].....	86
Tabla 11 Comparación de las especificaciones deseadas y obtenidas.....	111

1 Introducción

Los ejercicios terapéuticos forman una gran parte dentro del área de la fisioterapia, ya que corresponden a la ejecución de movimientos mecánicos de las articulaciones, es crucial para los pacientes mantener una constancia para realizarlos, sin perder la motivación o la seguridad de lo que están haciendo.

El trabajo que se presenta a continuación expone el desarrollo del diseño, hasta un modelo funcional, de un sistema lúdico para realizar los ejercicios terapéuticos para la mano, tanto para las articulaciones de los dedos, como para la muñeca.

En el capítulo 2 se describe una recopilación de la información necesaria para darle contexto al proyecto presentado, se abarcan temas de anatomía y fisiología de la mano, sus funciones y como éstas se ven afectadas. Así mismo, se entregan las definiciones de la rehabilitación y las derivadas correspondientes hasta llegar a los ejercicios terapéuticos. Posteriormente se abarca los temas de gamificación desde un punto de vista general, y adentrándose al impacto que tiene sobre la rehabilitación al grado de entender la psicología que hay detrás de los juegos de video.

En el capítulo 3 se muestra la investigación realizada sobre el estado del arte, se incluyen herramientas mecánicas comunes para rehabilitación del miembro superior, dispositivos más especializados para la mano, que permiten una retroalimentación al usuario y algunas patentes que involucran aplicaciones para fisioterapia, tanto para los dedos, como para la muñeca.

En el capítulo 4 se presenta el objetivo que se tiene en el proyecto, así como la subdivisión en objetivos alcanzables que se presentarán a lo largo del documento. El capítulo 5 muestra la justificación del trabajo, lo que invita a la reflexión del alcance obtenible al realizar el desarrollo de un modelo funcional para ejercicios terapéuticos de la mano.

En el capítulo 6 es planteada la problemática en la que se centra el trabajo actual, destacando la información necesaria para implementar la metodología que se presenta en el capítulo 7.

A modo de seguir la metodología planteada, el capítulo 8 incluye la recopilación de necesidades a partir de la problemática, la traducción a requerimientos y especificaciones que permitirá restringir y centrar el desarrollo del concepto; el cual se desglosará en un sistema conformado por sub-funciones que serán analizadas, a manera de que permita establecer posibles tecnologías que puedan ser utilizadas para cumplir con su cometido. Algunas de las decisiones serán tomadas independientemente de la solución, la cual será

realizada a partir de la elección de diferentes configuraciones posibles, dando lugar a un resultado elegido que pueda demostrar el concepto.

Una vez que se tiene una solución elegida, en el capítulo 9, se exhiben un diseño de configuración que contiene los elementos involucrados en cada subsistema del modelo funcional, con la finalidad de demostrar su repetitividad y exponer el desarrollo que se realizó del mismo.

A partir del modelo completo, en el capítulo 10, se plantean pruebas para comprobar las especificaciones dadas inicialmente con el fin de cumplir con el concepto desarrollado, se realizan pruebas de medición angular, así como la comparación subjetiva de la psicología de los elementos lúdicos; se presentan los resultados que se tuvieron ante las pruebas realizadas, incluyendo un apartado sobre la validación del modelo funcional a través de la exposición del mismo ante un especialista de fisioterapia. Con la información recabada por los resultados se deja una serie de posibles trabajos a realizar en un futuro que generarán una iteración posterior del proyecto.

Finalmente el capítulo 12 presenta las conclusiones que se obtuvieron al realizar el proyecto, las cuales consideran: la investigación, la obtención del concepto, los resultados de las pruebas y la validación del modelo funcional.

2 Antecedentes

El proyecto está basado en las actividades de la terapia física para la mano. Los ejercicios terapéuticos tendrán como objetivo atender algunas de las alteraciones de movilidad que sufre la mano, por ello es importante reconocer la naturaleza de la mano y entender así sus anomalías. La aplicación de la tecnología en las áreas de rehabilitación permite utilizar medición de variables como una retroalimentación para el paciente, esto puede ser extrapolado a actividades más agradables y entretenidas que asemejan a los juegos que utilizan los movimientos como interfaz entre el usuario y la computadora. Así, por lo tanto, se estudia la mano desde su anatomía hasta alcanzar una vinculación con información respecto a terapia interactiva para la misma.

2.1 La mano

Los seres humanos tienen una gran complejidad anatómica comparada con otras especies del reino animal, resultado de la evolución. Se destaca: la bipedestación, el incremento del tamaño de la capacidad craneal y el pulgar oponible. [1]

El pulgar puede tocar la yema del resto de los dedos en la mano del hombre, lo que la convierte en una prensa, esta versatilidad es la que ha permitido una superioridad con otras especies de la familia de los primates (véase Figura 2.1); le facilita al ser humano la manipulación de toda clase de objetos, además de fabricar y utilizar herramientas. [1]

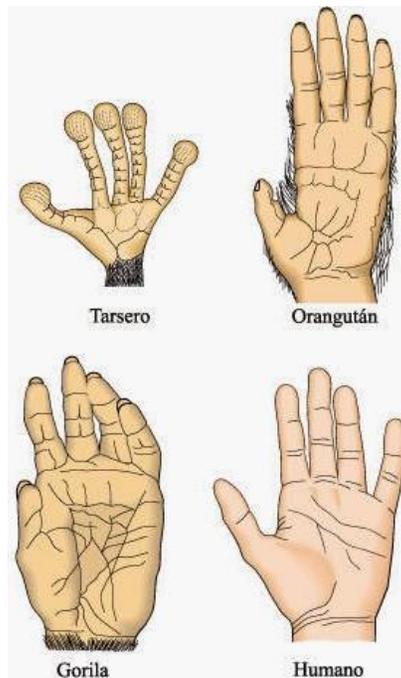


Figura 2.1 Comparación de la mano humana con otros primates cercanos. [1]

La mano forma parte del miembro superior que a su vez es un elemento más del aparato locomotor o sistema musculo esquelético, el cual está conformado por el sistema óseo y el sistema muscular. Los músculos son regulados por el sistema nervioso quien se encarga del control a través de los nervios. El sistema músculo esquelético, además de servir como soporte para el resto de los órganos, permite a las personas interactuar con el medio que los rodea a través del movimiento o locomoción del cuerpo. [2]

Los movimientos son realizados principalmente por las extremidades del cuerpo, superiores e inferiores. Los miembros superiores conforman la estructura que permite investigar y manipular directamente el entorno. La mano es una de las estructuras más completas en la naturaleza, es una de las partes más sensibles al tacto y gracias al pulgar oponible ha dotado a los seres humanos de la capacidad de utilizar múltiples herramientas. [3]

La mano permite explorar y conocer el mundo tangible que le rodea, desempeñan una función social en la comunicación a través de un lenguaje no verbal (gestos y señas). Desde un punto de vista histórico la mano ha sido un medio para saludar, con el fin de demostrar confianza o incluso salud e higiene. [4]

Es por lo mencionado anteriormente, que desde un punto de vista médico, es fundamental conservar la funcionalidad motriz de la mano para no interrumpir con sus actividades cotidianas, por lo cual es indispensable conocer la anatomía y fisiología de la mano con el fin de entender su funcionamiento y como esta movilidad puede ser entorpecida por alguna patología; y de esta forma ser conscientes de la prevención y tratamiento de las distintas enfermedades que pueden afectar a la mano.

2.1.1 Anatomía y fisiología de la mano

La mano forma parte de la extremidad superior, se encuentra a partir de la articulación de la muñeca. Se subdivide en tres partes: [5]

- Muñeca.
- Palma (Metacarpo).
- Dedos.

En la estructura ósea de la mano hay tres grupos de huesos: carpos, metacarpianos y falanges. La muñeca o carpo está constituida por 8 huesos (carpos). El metacarpo está constituido por cinco huesos metacarpianos, son ordenados del primer al quinto (I al V, véase Figura 2.2) metacarpiano a partir del pulgar. Las falanges son los huesos de la estructura de los dedos. El pulgar tiene sólo dos falanges proximal y distal, mientras que el resto de los dedos tiene tres: proximal, medial y distal. En la Figura 2.2 se puede apreciar la distribución de los huesos de la mano. [6]

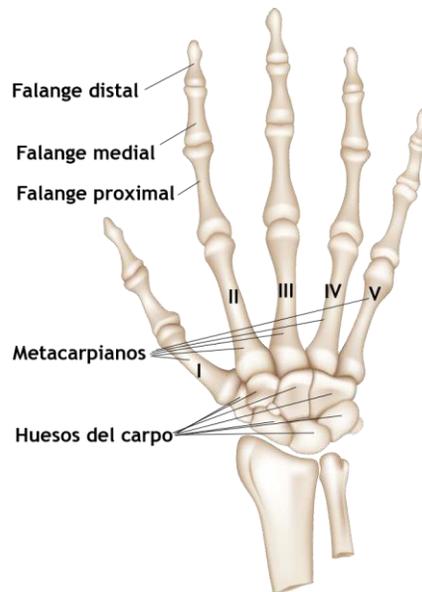


Figura 2.2 Los huesos que componen a la mano. [5]

Cada hueso presenta superficies articulares cubiertas de cartílago que permite la corta distancia de los huesos para mantener la armadura interna de la mano y a su vez permitir la capacidad de desplazamiento. [7]

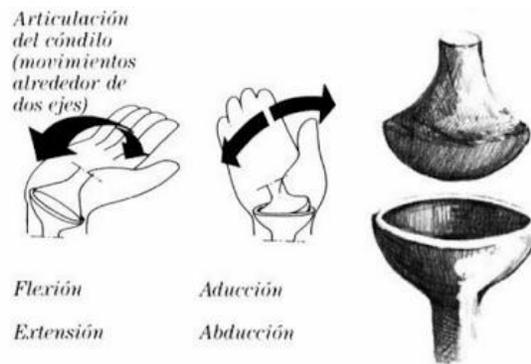


Figura 2.3 Articulación condílea que pertenece a la muñeca. [8]

La junta que pertenece a la muñeca es una articulación sinovial (móvil) y además condílea (como se muestra en la Figura 2.3) que se establece entre el extremo del hueso radio, el hueso cúbito, con los huesos de la primera fila de carpos; esta articulación permite que se realicen movimientos en dos ejes por lo cual la muñeca puede abducir, aducir, flexionar y extender en esta articulación. La pronación y la supinación de la mano (Figura 2.4) se producen completamente en el antebrazo, e implican la rotación del radio en el codo y el desplazamiento del extremo distal del radio sobre el cúbito. [5]



Figura 2.4 Movimientos sobre la muñeca de pronación y supinación. [9]

Entre el I metacarpiano y el trapecio se forma una articulación en silla de montar (como se muestra en la Figura 2.5) que le permite una mayor cantidad de movimientos al pulgar, respecto al resto de los dedos. Los movimientos que se pueden realizar en la primera articulación carpo-metacarpiana son: flexión, extensión, abducción, aducción, rotación y circunducción. [5]

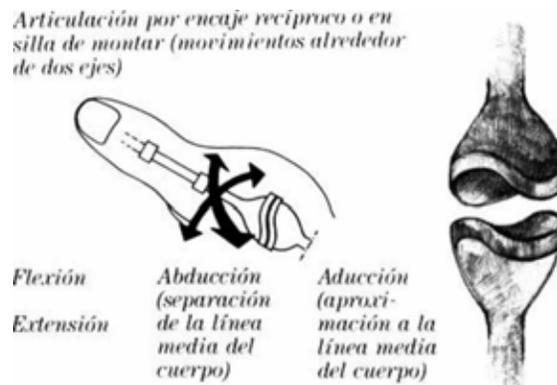


Figura 2.5 Articulación del dedo pulgar en forma de silla de montar. [8]

Las articulaciones entre los metacarpianos y las falanges proximales de los dedos son articulaciones condíleas, que permiten flexión, extensión, abducción, aducción, circunducción y una rotación limitada. Las articulaciones entre falanges son de tipo polea (como se muestra en la Figura 2.6) y permiten principalmente los movimientos de flexión y de extensión. [5]

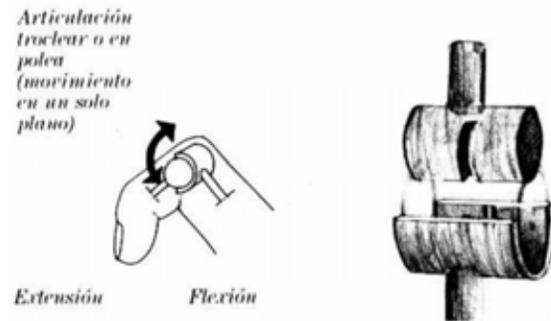


Figura 2.6 Las falanges con su articulación en forma de polea. [8]

Los encargados de realizar los movimientos anteriormente mencionados son los músculos intrínsecos y extrínsecos de la mano. Los músculos extrínsecos se originan en el antebrazo, se insertan en la mano y desempeñan una función de agarre potente (que se explicará más adelante). Los músculos intrínsecos se encuentran por completo en la mano y realizan principalmente movimientos de precisión entre los dedos y el pulgar (IDEM). La combinación de los músculos mencionados permiten realizar diversas posiciones como por ejemplo el agarre de empuñadora fuerte (Figura 2.7.a), el gancho de agarre (Figura 2.7.b) o la pinza de precisión (Figura 2.7.c). [6]

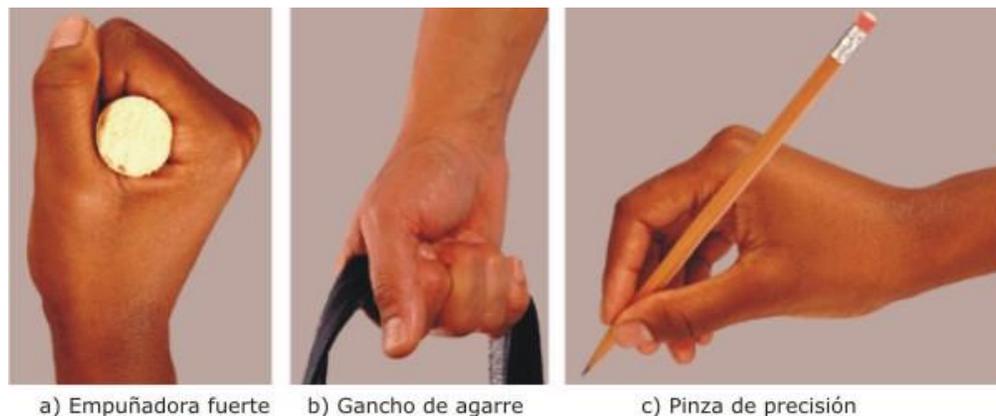


Figura 2.7 Algunos de las formas que puede adoptar la mano para sujetar un objeto. [10]

La mano está controlada por los nervios cubital, mediano y radial, todos ellos son responsables de la inervación (comunicación con los nervios) sensitiva cutánea y propioceptiva (conocimiento de su propia posición). El nervio cubital y el nervio mediano inervan todos los músculos intrínsecos de la mano, mientras que el nervio radial sólo inerva la piel de la zona dorso-lateral de la mano. [5]

La compleja organización anatómica y funcional de la mano converge en la prensión como principal función de la mano. La prensión depende de la integridad de la cadena cinética de huesos y articulaciones extendida desde la muñeca hasta las falanges distales. Los patrones

de función de prensa son movimientos en los que se agarra un objeto y éste se mantiene en parte o de forma completa dentro de la superficie de la mano, estos patrones se clasifican en: agarres de fuerza y agarres de precisión. [5]

Los agarres de fuerza son aquellos en los cuales los dedos están flexionados en las tres articulaciones, el objeto se encuentra entre los dedos y la palma, el pulgar se aduce y queda posicionado sobre la cara palmar del objeto, hay una ligera desviación cubital y se realiza una ligera dorsiflexión para aumentar la tensión de los tendones flexores. [6]

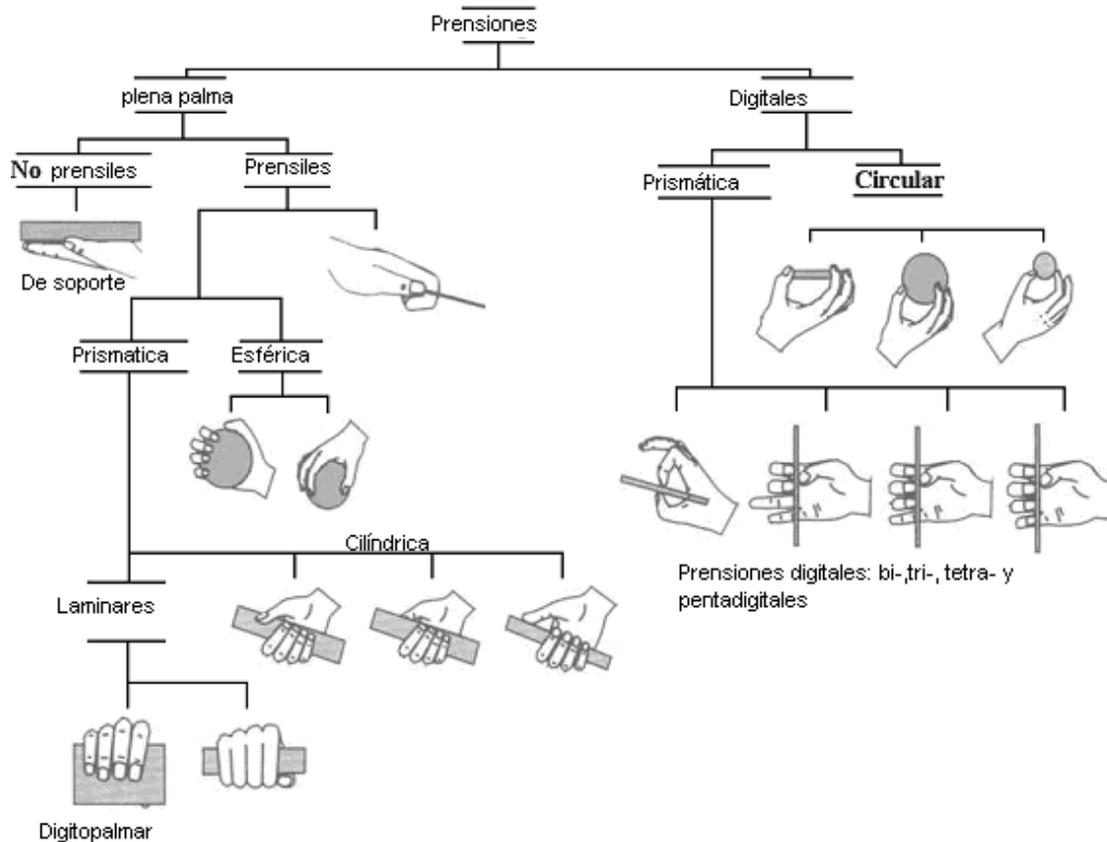


Figura 2.8 Clasificación de los agarres según la forma y los elementos involucrados. [11]

Los agarres de precisión son aquellos utilizados para la manipulación de objetos pequeños entre el pulgar y las caras flexoras de los dedos, la muñeca se posiciona en dorsiflexión, los dedos permanecen semi-flexionados y el pulgar se aduce y opone. Los agarres de precisión se clasifican de acuerdo a las partes de las falanges utilizadas para soportar el objeto que se está manipulando, por ejemplo: Pinza terminal, pinza palmar, pinza lateral, pinza pulpejo, pinza digito-palmar. En la Figura 2.8 se puede apreciar algunos de los agarres que se mencionaron y la diferencia entre los agarres de fuerza que utilizan la palma para ayudarse,

mientras que los de precisión involucran únicamente a los dedos (como en las prensiones digitales). [5]

La función principal de la mano, por lo tanto, es realizar agarres, tanto de precisión como de fuerza, esta implementación permite al ser humano utilizar su mano como una herramienta; esta utilidad necesaria para la vida cotidiana provoca la preocupación de los cuidados de la mano así como de estudiar sus patologías.

2.1.2 Patología de la mano

Cuando se hable de patología se debe considerar una pérdida de alguna funcionalidad del elemento anatómico. Si las personas sienten dolencia al realizar un movimiento o carecen de movilidad de la mano, ya sea en zona carpiana o en las falanges, se trata de alguna anomalía que debe ser estudiada y tratada.

Las patologías de la mano son muy variadas, abarcan alteraciones genéticas, lesiones traumáticas, degenerativas o tumorales; se consideran: [12]

- La mano traumática, que involucra las lesiones en el sistema óseo-articular o muscular, como consecuencia de la aplicación de una fuerza sobre el esqueleto, de forma directa o indirecta; por ejemplo, abarcan las luxaciones o fracturas óseas, también las roturas tendinosas o una tendinitis. [13]
- La mano parálitica, referida a las afecciones presentes cuando la inervación de la mano se ve afectada o interrumpida de alguna manera. Su origen se halla en lesiones del sistema nervioso central por alguna afección congénita. Otra enfermedad que involucra la inervación es el síndrome del túnel carpiano, la cual es una condición donde existe una compresión sobre el nervio medio que pasa a través de un espacio estrecho en la muñeca; dicho nervio, como se mencionó, proporciona funciones motoras y sensoriales al pulgar y a tres de los dedos por lo que provoca afecciones en la motricidad y en los agarres, debido al dolor que provoca mover los dedos. [12] [14]
- La mano reumática se considera a la artritis reumatoide, la cual es una enfermedad crónica que provoca la inflamación de las articulaciones. Esta afección puede llegar a ser tan severa que afecta la función y apariencia de las manos (así como otras partes del cuerpo). En la mano puede llegar a causar deformidades en las articulaciones de los dedos lo que provoca dificultad en el movimiento. Otra anomalía frecuente es la artrosis, que consiste en una enfermedad degenerativa de las articulaciones que a su vez produce desgaste en el cartílago. Tal patología puede llegar a producir incapacidad funcional. [15] [16]

Existen otras enfermedades que afectan indirectamente a la mano como la enfermedad de Parkinson, enfermedad neurodegenerativa que se caracteriza por temblores y rigidez creciente de los grupos musculares. Así como también la esclerosis múltiple, enfermedad del sistema nervioso que afecta al cerebro la medula espinal, la cual provoca que los

mensajes entre el cerebro y el cuerpo se hagan más lentos o estén bloqueados, y como consecuencia dificultad en el empleo de la mano. [17]

La rehabilitación que se utiliza para tratar la mayoría de estas patologías involucra principalmente una cirugía, un periodo de inmovilización, fármacos y adicionalmente una gran cantidad de tiempo en fisioterapia para recuperar fuerza y funcionalidad o para ralentizar el deterioro de la mano causado por alguna de las enfermedades.

2.2 Conceptos básicos de Rehabilitación

Rehabilitación según la Organización Mundial de la Salud (OMS):

La aplicación coordinada de un conjunto de medidas médicas, sociales, educativas y profesionales para preparar o readaptar al individuo con objeto de que alcance la mayor proporción posible de capacidad funcional. [18]

Para el interés que persigue el proyecto se hará un enfoque en las medidas médicas que se realizan, es así que se define *Rehabilitación médica* como:

La parte de la asistencia médica que trata de desarrollar las capacidades funcionales y psicológicas del individuo y, si es preciso, sus mecanismos de compensación, a fin de permitirle llevar una existencia autónoma y activa. [18]

Dentro de la rehabilitación se encuentra contenida la fisioterapia que actúa para reeducar al usuario o como medida preventiva ante las anomalías funcionales.

2.2.1 Fisioterapia

Según la OMS *Fisioterapia* se define como:

Arte y ciencia del tratamiento físico por medio de la gimnasia reeducativa, el calor, el frío, la luz, el masaje y la electricidad. Entre los objetivos del tratamiento figuran el alivio del dolor, el aumento de la circulación, la prevención y la corrección de incapacidades y la recuperación máxima de la fuerza, la movilidad y la coordinación.

La fisioterapia comprende también la ejecución de pruebas eléctricas y manuales para determinar la importancia de la alteración de los impulsos nerviosos y de la energía muscular, y de pruebas para precisar las aptitudes funcionales, así como la medición de la amplitud del movimiento articular y de la capacidad vital a fin de facilitar al médico el establecimiento del diagnóstico y de registrar los progresos efectuados. [18]

La fisioterapia por lo tanto se encarga de:

1. Exploración de pacientes con alteraciones, limitaciones funcionales y discapacidades u otras afecciones relacionadas con la salud para determinar su diagnóstico, pronóstico e intervención.
2. Aliviar las alteraciones y las limitaciones funcionales elaborando, ejecutando y modificando intervenciones terapéuticas. Las intervenciones pueden ser ejercicio terapéutico así como también, la prescripción, fabricación y aplicación de aparatos o equipamiento de ayuda.
3. Prevenir lesiones, alteraciones, limitaciones funcionales y discapacidades, lo cual comprende la promoción y el mantenimiento de la forma física, la salud y la calidad de vida en poblaciones de todas las edades. [19]

Según el principio físico que se emplee en la terapia se puede clasificarse, atendiendo a su naturaleza en varios grupos: agentes cinéticos o mecánicos, agentes térmicos, agentes eléctricos y electromagnéticos, y agentes climáticos o completos. [19]

2.2.2 Cinesiterapia

La cinesiterapia puede definirse como el conjunto de métodos que utilizan el movimiento con finalidad terapéutica. La implementación del ejercicio como terapia es la parte de la fisioterapia que ocupa el mayor tiempo de trabajo de los profesionales que llevan a cabo las técnicas de rehabilitación. La cinesiterapia actúa por análisis mecánico del movimiento y construye sus ejercicios a partir de los elementos anatómicos. [19]

Incluida en la cinesiterapia se encuentra la mecanoterapia, que puede considerarse como una variedad instrumental que engloba un conjunto de técnicas que requieren el empleo de aparatos mecánicos diversos. [20]

Dentro de este amplio concepto que es la terapia por el movimiento, podemos clasificar las diferentes opciones terapéuticas como cinesiterapia pasiva, cinesiterapia activa (como se muestra en la Figura 2.9). [21]

Cinesiterapia pasiva: Es aquella en la cual el movimiento terapéutico se realiza sin colaboración alguna por parte del paciente. Es un agente externo el que provoca el movimiento, generalmente las manos del fisioterapeuta

Cinesiterapia activa: En este caso el movimiento lo ejecuta el propio paciente, con o sin ayuda, e incluso contra resistencia. Esto es lo que hará que exista una diferencia entre cinesiterapia activa asistida, libre o resistida.

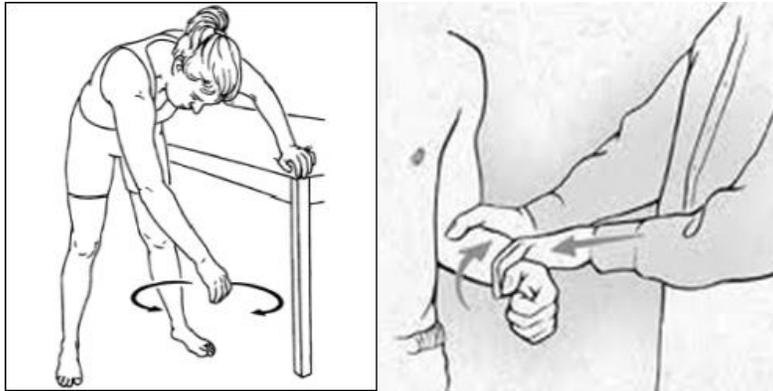


Figura 2.9 Ejemplo de cinesiterapia activa en la izquierda y pasiva en la derecha. [22]

En la cinesiterapia los valores medidos relevantes para el tratamiento involucran posiciones angulares y lineales, estos son medidos para determinar el punto de inicio de un tratamiento, evaluar su progresión en el tiempo, motivar al paciente, establecer un pronóstico, modificar el tratamiento o darle un punto final, y, finalmente, evaluar la secuela, estos parámetros son determinados gracias a la goniometría. [20]

2.2.3 Goniometría aplicada a las ciencias médicas

Goniometría es la técnica de medición de los ángulos creados por la intersección de los ejes longitudinales de los huesos a nivel de las articulaciones. Tiene dos objetivos principales:

1. Evaluar la posición de una articulación en el espacio. Se trata de un procedimiento estático utilizado para objetivizar y cuantificar la ausencia de movilidad de una articulación.
2. Evaluar el arco de movimiento de una articulación en cada uno de los tres planos. Se trata de un procedimiento dinámico que se utiliza para objetivizar y cuantificar la movilidad de una articulación. [23]

Como se ha mencionado la información de las posiciones angulares de la mano son fundamentales en la evaluación del progreso de los pacientes. Sin embargo, existen otros factores dentro de los ejercicios terapéuticos que determinan el plan de trabajo que se llevará y la modificación que se le hará dependiendo las limitaciones que se tienen.

2.3 Ejercicios Terapéuticos

La intervención mediante el ejercicio terapéutico es uno de los servicios sanitarios que ofrece la fisioterapia a pacientes y clientes. Los pacientes se consideran personas con alteraciones o limitaciones funcionales diagnosticadas, en cambio los clientes son personas que requieren los servicios para prevención o para mejorar el rendimiento. [24]

El ejercicio terapéutico se considera un elemento central de la mayoría de los planes de asistencia de la fisioterapia, al cual se suman otras intervenciones; tiene como finalidad:

- Mejorar el estado físico, de salud y la sensación general de bienestar de las personas diagnosticadas.
- Prevenir complicaciones y reducir el uso de medios sanitarios.
- Mejorar o mantener el estado físico de personas sanas.
- Prevenir o reducir al mínimo futuras alteraciones, pérdidas funcionales o discapacidades de cualquier persona.

Los métodos de intervención que comprende el ejercicio terapéutico son, entre otros, actividades o técnicas para mejorar la movilidad, la fuerza, el control neuromuscular, la capacidad cardiovascular y la resistencia muscular, la coordinación equilibrio y destrezas funcionales, los patrones respiratorios y la relajación, la integración de la postura y los patrones de movimiento. [24]

Un factor importante que influye en la eficacia de cualquier programa terapéutico es la educación del paciente y la participación activa en un plan sistemático de asistencia. Las mejoras funcionales a largo plazo y la prevención de futuras lesiones se producirán sólo si el paciente entiende los objetivos del plan de ejercicio e incorpora los consejos e instrucciones del terapeuta en todos los aspectos de las rutinas de la vida diaria. [25]

El modelo empleado por los fisioterapeutas para tratar a los pacientes involucra seis etapas: exploración, evaluación, diagnóstico, pronóstico e intervención y resultados. El proyecto a tratar se encuentra dentro de la etapa de intervención. [24]

2.3.1 Modelo de intervención

Tras la práctica de la exploración y la evaluación cuidadosas, desarrollo de un diagnóstico y propósito, y cuando el médico conoce las relaciones entre la patología, los deterioros, las limitaciones funcionales o la discapacidad, se establece un plan de intervención mediante el proceso de toma de decisiones clínicas. El ejercicio terapéutico puede constituir la base de la intervención o sólo sea un componente de la misma.

La intervención se define como la interacción diestra y con una finalidad del fisioterapeuta con el paciente mediante varios métodos y técnicas para conseguir cambios en la afección del paciente. Las decisiones en curso sobre la intervención dependen de la monitorización de la respuesta del paciente y del progreso hacia los resultados esperados.

Se emplean tres componentes de la prescripción de ejercicio y sus relaciones: [24]

- ❖ Elementos del sistema de movimientos en su relación con el propósito de cada actividad o técnica.
- ❖ La actividad o técnica específicas elegidas.
- ❖ La dosis específica.

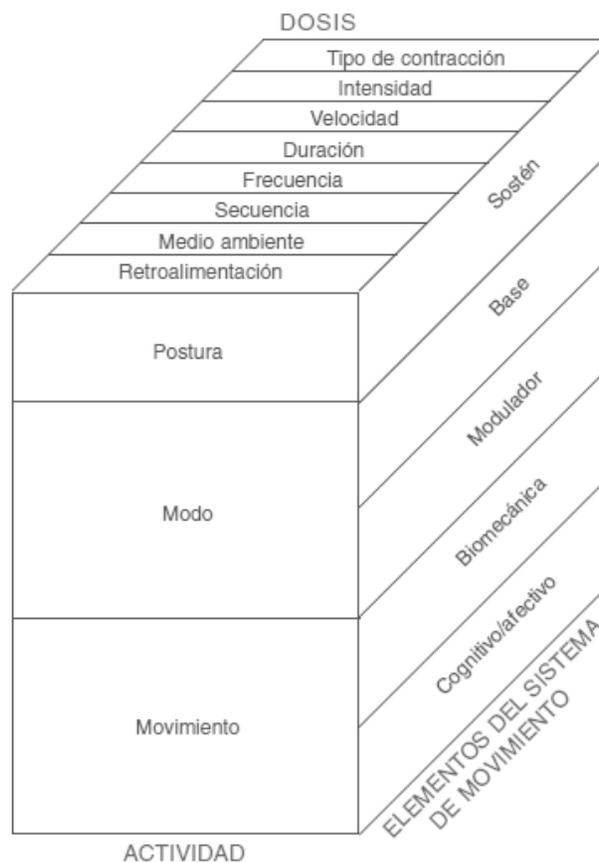


Figura 2.10 Modelo de intervención con ejercicio terapéutico. [24]

Los ejercicios deben modificarse continuamente para aumentar o reducir la dificultad y asegurarse de un progreso continuo con retrocesos mínimos. Pueden modificarse algunos de los parámetros mostrados en la Figura 2.10 para que un ejercicio sea más o menos difícil, los cuales pueden ser de diversas índole en la prescripción de ejercicio: biomecánicos, fisiológicos, neuromusculares, y cognitivos y afectivos.

Los tres componentes en la prescripción de ejercicio son analizados y estudiados para que en una etapa posterior, la elaboración de un plan de ejercicios; en la cual se consideran elementos adicionales que se presentan a continuación.

2.3.2 Elaboración de un plan de ejercicios terapéuticos

En ocasiones la motivación del paciente mejora cuando se le enseñan unos objetivos razonables, la habilidad de realizar el mismo nivel de ejercicio o actividad con menor grado de dolor es un objetivo razonable a corto plazo, pero puede ser que el paciente tal vez sólo repare en que está actuando al mismo nivel y lo perciba como una falta de mejoría. La clarificación del proceso de parte del fisioterapeuta y de las expectativas razonables sobre el progreso que se desea a corto plazo puede aumentar la adhesión al programa y la satisfacción del paciente. [25]

El procedimiento para utilizar un plan de ejercicios para resolver los problemas del paciente involucra varias etapas: evaluar necesidades, desarrollar un plan de ejercicios, ejecutar el plan y evaluar el resultado. En el primer paso se miden las necesidades atendiendo las deficiencias, limitaciones funcionales, discapacidades y minusvalías; para proporcionar atención de calidad en términos de coste y eficacia en el ámbito de la asistencia sanitaria.

Las necesidades del paciente pueden variar según la gravedad de su afección:

- *Deficiencia* es cualquier pérdida o anomalía de las estructuras o funciones psicológicas, fisiológicas y anatómicas, limita o cambia la capacidad individual para realizar una tarea o actividad.
- *Limitación funcional* es generada por una deficiencia que no es discapacitadora aunque interfiere su función normal.
- *Discapacidad* supone incapacidad para realizar actividades de la vida diaria con normalidad.
- *Minusvalía* es la desventaja social debido a una deficiencia o discapacidad que impide o limita a la persona en su trabajo o ámbitos personales o sociales. [25]

Prescribir ejercicios para un programa en casa constituye un reto, pues estos ejercicios se realizan sin supervisión, y la disciplina del paciente es clave para que el programa de ejercicio en casa tenga éxito. Con frecuencia, el tiempo limitado de visita supone el mayor reto para el médico que enseña al paciente todos los componentes necesarios del programa de autotratamiento. Ofrecer un programa corto y seguro de ejercicio en casa es mejor que querer abarcar demasiado y abrumar al paciente con información durante la primera visita. [24]

Si el ejercicio es escaso puede no obtenerse ningún resultado esperado, y si es excesivo, el paciente corre el riesgo de que el exceso provoque un declive del progreso. Algunos de los factores que influyen en la prescripción de los ejercicios son:

- Estadio de la curación.
- Irritabilidad del tejido y estabilidad de los síntomas.
- Tiempo disponible del paciente y su involucración.
- Tiempo entre visitas de fisioterapia.

El modelo de tratamiento empleado por los fisioterapeutas para tratar a los pacientes se muestra en la Figura 2.11, a partir de las etapas de exploración y evaluación, se obtienen resultados que proporcionan las bases para establecer el punto de referencia con el cual medir los resultados de la intervención terapéutica. Además de evaluar las necesidades del paciente también hay que evaluar las necesidades del profesional a medida que se interpretan los resultados de la evaluación.



Figura 2.11 Modelo de tratamiento del paciente. [24]

Después de evaluar y valorar el siguiente paso es establecer objetivos y un plan adecuado de tratamiento. Lo cual involucra: [25]

- Factores que influyen en las decisiones:
 - El nivel de limitación funcional que tiene el paciente: deficiencia, limitación funcional o discapacidad.
 - El estado psicológico, como la adaptación del paciente al problema, la motivación y la personalidad, así como la capacidad de comprender y aprender.
 - Apoyo socioeconómico y reacciones culturales.
 - Asistencia a domicilio o alternativa.
 - Planes y objetivos vocacionales del paciente.
 - Consideraciones éticas.
- Establecer objetivos para un resultado funcional esperado:
 - Objetivos a largo plazo o de rehabilitación.
 - Todos los objetivos deben ser medibles y específicos de las situaciones y pruebas.
- Identificar los objetivos a corto plazo:

- Con frecuencia estos objetivos son de conducta medible que afectan a las deficiencias documentadas.
- Reflejan las capacidades o destrezas necesarias para lograr el resultado funcional.
- Desarrollar un plan de asistencia:
 - Determinar los métodos terapéuticos que mejor sirvan para alcanzar los objetivos.
 - Seleccionar técnicas o modalidades terapéuticas que cumplan con el plan y logren objetivos.
 - Determinar los modos de evaluación que se emplearán.
 - Anticipar la duración del tratamiento y planificar el alta.

La ejecución del plan de ejercicios terapéuticos consta de emplear los procedimientos y técnicas de fisioterapia, estos ejercicios combinan diferentes aspectos como la fuerza o la resistencia con la coordinación y el equilibrio, dependiendo de las necesidades del paciente.

2.3.3 Aspectos funcionales de los ejercicios terapéuticos

En este caso particular se trabajara a nivel muscular del brazo, por ello se consideran estos elementos para los ejercicios terapéutico.

Fuerza muscular: Es la capacidad de un músculo o grupo de músculos para generar tensión y una fuerza resultante durante un esfuerzo máximo, dinámico o estático, respecto a las exigencias que se le imponen. Para aumentar la fuerza, debe emplearse durante el ejercicio una carga que supere la capacidad de las fibras del músculo. Esto genera hipertrofia (crecimiento de las fibras musculares) y reclutamiento (aumentar la cantidad de fibras musculares) y, por tanto, un aumento de la fuerza del músculo. La capacidad de los músculos para producir mayor tensión puede lograrse sobre todo con ejercicio de gran intensidad (ejercicio realizado con cargas pesadas) con un número relativamente bajo de repeticiones. En ambos casos, los músculos deben ejercitarse hasta el punto de fatiga para que se produzcan aumentos adaptativos de la fuerza. [26]

Resistencia muscular: Capacidad de un músculo para contraerse repetidamente o generar tensión, mantener dicha tensión y resistir la fatiga durante un período prolongado de tiempo. A medida que aumenta la resistencia física, el músculo podrá realizar mayor número de contracciones o aguantar una carga durante un período largo de tiempo. El ejercicio activo realizado repetidamente contra una carga moderada hasta el punto de fatiga aumentará la resistencia física de los músculos. Se produce un aumento de la resistencia muscular en los programas de ejercicio pensados para aumentar la fuerza. [26]

Equilibrio y coordinación: Favorece la calidad y seguridad de los movimientos del paciente. Los ejercicios rítmicos de las manos y pies junto con ciertas actividades específicas (como el equilibrio en una sola pierna, bailes rítmicos, lanzar y atrapar una pelota), preferentemente bajo la supervisión de un fisioterapeuta, pueden mejorar el equilibrio y la coordinación. [26]

Flexibilidad: Implica estirar bien los músculos y tendones mientras se mantiene la movilidad de las articulaciones, estas actividades previenen la reducción de la movilidad, la rigidez, la debilidad y la espasticidad (tensión y rigidez de los músculos). Si no se hace ejercicio, la rigidez puede ocasionar contracturas dolorosas que inmovilicen las articulaciones de modo permanente. [26]

Relajamiento: Reduce la tensión física y mental, puede consistir en concentrarse en una lenta respiración o en una meditación más profunda. El desarrollo de la capacidad para relajarse requiere conciencia del estrés y la tensión muscular. Las técnicas de relajación consciente permiten controlar y afrontar muy variadas tensiones, así como estar mentalmente alerta ante una tarea mientras se relajan los músculos tensos. Un programa de relajamiento estructurado puede reducir el cansancio después de una sesión de ejercicio o puede ayudar a manejar un día lleno de tensiones. [26]

La combinación de estos aspectos permite múltiples actividades que pueden desarrollar las personas con el fin de hacer más dinámicas sus sesiones de trabajo y de esta forma intentar aumentar el interés hacia los ejercicios, dando lugar a terapias más elaboradas que tengan una serie de reglas u objetivos, los cuales pueden considerarse actividades lúdicas.

2.4 Elementos lúdicos para Rehabilitación

La terapia ha ido evolucionando en las actividades que se realizan, se mantiene el objetivo de rehabilitar a la persona pero los métodos se vuelven más interesantes cuando hay una dinámica de objetivos cortos de por medio. En aspectos de mecanoterapia, los elementos empleados han sido mejorados a través del tiempo con ayuda de las tecnologías de sensores para realizar mediciones de las posiciones goniométricas. Otro elemento importante que ha mejorado las formas de rehabilitar es la implementación de la gamificación.

Se entiende por gamificación como el empleo de mecánicas de juego en entornos y aplicaciones no lúdicas con el fin de potenciar la motivación, la concentración, el esfuerzo, la fidelización y otros valores positivos comunes a todos los juegos. [27]

La implementación de las mecánicas de juego en el ámbito de rehabilitación da como resultado las terapias basadas en juegos que involucran formas para motivar y distraer a las personas de sus enfermedades permitiéndoles realizar sus actividades de una manera más positiva, estas técnicas basadas en juegos son también llamadas lúdicas.

2.4.1 Técnicas Lúdicas

El decir que una actividad es lúdica significa que dicha actividad sea divertida aunque su propósito sea otro, educativo, experimental o rehabilitación. Entre las actividades lúdicas se destaca el juego. [28]

Según la RAE, la definición de juego es:

Ejercicio recreativo sometido a reglas, y en el cual se gana o se pierde. [29]

A partir de la definición se puede entender la necesidad de que exista una serie de restricciones para poder cumplir con el objetivo del juego y que de esa manera se considere el éxito.

Otra definición más completa es la que proporciona el trabajo de Huizinga¹:

El juego es una acción u ocupación libre, que se desarrolla dentro de unos límites temporales y espaciales determinados, según reglas absolutamente obligatorias, aunque libremente aceptadas, acción que tiene fin en sí misma y va acompañada de un sentimiento de tensión y alegría y de la conciencia de ser alguien diferente a quien es en el mundo real. [28]

En el juego humano interviene la función simbólica: interviene en ellos la capacidad de utilizar símbolos y signos para crear contextos, anticipar situaciones, planificar las acciones venideras o interpretar la realidad. [30]

En la sociedad se tiene cierto paradigma de que los juegos son exclusivos de los niños, sin embargo, también el adulto es capaz de ser creativo y de utilizar toda su personalidad en el desarrollo de estas actividades. El juego se puede definir, en este punto, como una actividad ejercitada de acuerdo a reglas libremente consentidas y desligadas de toda noción de necesidad o de utilidad material. Las actividades de juego se consideran también, experimentar las propias facultades en las que opera la imaginación y en donde la fantasía se sobrepone a la realidad, conciliando la libertad y la obligación. [30]

Cuando las personas entran a su etapa adulta, existe una tendencia a que sean más serios y a dejar a un lado, por las responsabilidades que se tienen en el día cotidiano, el juego y la creatividad, esto se torna en la creación de una rutina y el estrés, por lo cual es posible convertir algunas de las actividades en juego. La alternancia del juego (actividad lúdica) y

¹ Johan Huizinga filósofo e historiador holandés. Escribió *Homo ludens*, obra dedicada al estudio del juego como fenómeno cultural y no simplemente en sus aspectos biológicos, psicológicos o etnográficos, concibiéndolo como una función humana tan esencial como la reflexión y el trabajo.

del trabajo (actividad obligada) ayuda a que el adulto acepte mejor este último, dándose la posibilidad de renovarse. Por otra parte hay que tener en cuenta que una actividad realizada con gozo y placer, frecuentemente resulta ser más eficaz que cuando se estima desagradable, dejando una menor sensación de fatiga, aburrimiento y obligación. [31]

A partir de varios estudios respecto a los juegos se han determinado algunos de los posibles beneficios que pueden tener, independientemente del área en el que se estén realizando.

2.4.2 Beneficios del Juego

Los teóricos especialistas en el juego han determinado que el juego:

- Reduce las reacciones ante el estrés o tensión del trabajo.
- Mejora el estado de ánimo.
- Estimula el sistema inmunitario.
- Sube la moral y combate el aburrimiento, dado que la mente se distrae de objetivos cerrados.
- Aumenta la energía y la productividad.
- Fortalece las relaciones personales.
- Inspira la creatividad y la imaginación, lo que promueve la resolución de problemas o desarrollar innovación. [31]

Los ambientes lúdicos ponen en juego componentes de vida, formas asociativas y retos que comprometan las potencialidades físicas, mentales, afectivas y creativas de las personas. Cuando un usuario se encuentra jugando dentro del mundo imaginario se tienen algunos efectos:

- Se ingresa a un espacio de experimentación y aventura interactuando en situaciones de menor o mayor complejidad que las reales, con elementos fantasiosos y especulativos.
- Se puede presentar también como un micro clima para el desarrollo de la creatividad; las reglas, los retos, los problemas que se plantean, permiten sacar a flote potencialidades, habilidades y conocimientos.
- Las formas de comunicación, los lenguajes y los desarrollos están presentes de una manera consciente; la intuición, la percepción, la agilidad, flexibilidad y la capacidad de análisis se conjugan en la expectativa y el riesgo.
- Se respira confianza, alegría, sentimientos y emoción.
- Se posibilita una evasión de la realidad a una esfera temporal, donde se llevan a cabo actividades con orientación propia.

- El jugador comprometido se arriesga a traspasar el umbral de lo desconocido, a inventar su propio juego si fuere necesario y a desplegar sus mejores recursos para alcanzar una meta, individual o colectivamente. [32]

Estos ambientes lúdicos son considerados espacios imaginarios o virtuales, es decir, que no forman parte de lo real. Esta virtualización también puede provenir de espacios creados a partir de la computación, donde los usuarios tienen la oportunidad de interactuar con ellos a través de una interfaz.

2.4.3 Terapias basadas en interfaces humano computadora

En el año 2005 se abordó el término “Juego Serio” por Mike Zyda² de una forma actualizada y lógica en un artículo publicado en la revista *Computer* de la *IEEE Computer Society* que llevaba por título *From Visual Simulation to Virtual Reality to Games*, para lo cual parte de su propia definición de juego:

- **Juego:** una prueba física o mental, llevada a cabo de acuerdo con unas reglas específicas, cuyo objetivo es divertir o recompensar al participante.
- **Videojuego:** una prueba mental, llevada a cabo frente a una computadora de acuerdo con ciertas reglas, cuyo fin es la diversión o esparcimiento, o ganar una apuesta.
- **Juego serio:** una prueba mental, de acuerdo con unas reglas específicas, que usa la diversión como modo de formación gubernamental o corporativa, con objetivos en el ámbito de la educación, sanidad, política pública y comunicación estratégica. [33]

Durante la primera década del 2000, algunos estudiosos comenzaron a examinar la utilidad de los juegos para otros propósitos, contribuyendo al creciente interés por emplearlos con nuevos fines. Además, la capacidad de los juegos para contribuir a la formación se vio ampliada con el desarrollo de los juegos multijugador. En 2002 se creó la *Serious Games Initiative* con el fin de fomentar el desarrollo de juegos sobre temas políticos y de gestión. Aparecieron grupos más especializados en 2004, como por ejemplo *Games for Change*, centrado en temas sociales y en cambio social, y *Games for Health*, sobre aplicaciones relacionados con la asistencia sanitaria. [33]

² Michael Zyda es director de GamePipe Laboratory, profesor de ciencias de la computación y miembro asesor del Instituto de Ciencias de la Informática para la Universidad del Sur de California.

Las terapias con juegos se incrementaron con la aparición de los videojuegos basados en el control a través del movimiento humano, mediante periféricos capaces de medir la aceleración y la posición angular del dispositivo o inclusive con cámaras que permiten determinar la posición del cuerpo entero del usuario. Se está probando este tipo de tratamientos en distintas patologías que generan problemas neurológicos, sensorio-motores, perceptivo-cognitivo, problemas en el desarrollo y el aprendizaje, sociales, etc.

Por ejemplo, el caso de la consola *Nintendo Wii*®; pues cada vez existen más equipos de rehabilitación que buscan utilizar la dinámica de estos juegos o simplemente empiezan a ver la *Nintendo Wii*® como una herramienta. Se ha utilizado en el tratamiento de la rehabilitación superior después de un infarto, el estudio ha comprobado la efectividad de estos ejercicios como entornos virtuales. Así como también la implementación de su accesorio *Wii Balance Board*®, diseñada inicialmente para realizar ejercicios en casa. Sin embargo ha alcanzado la validación a través de trabajos de investigación en terapia física. [34]



Figura 2.12 Ejemplo de un juego serio como método de rehabilitación. [35]

Otro caso de videojuegos en la rehabilitación es el dispositivo Kinect® de Microsoft®, con el cual se ha creado un centro de rehabilitación “virtual” con Kinect® gracias a la Fundación Vasca de Esclerosis Múltiple; en ese lugar los pacientes pueden ejercitar diferentes partes del cuerpo sin utilizar algún otro dispositivo encima y al mismo tiempo permite al terapeuta hacer un seguimiento de los progresos de cada usuario por medio de informes individuales. [36]

Uno de los artículos que realizaron un estudio sobre la implementación de realidad virtual en el tratamiento del dolor menciona que la realidad virtual involucra una interfaz humano-computadora, con la cual el usuario interactúa con un entorno virtual multisensorial y responsivo, se puede realizar la interacción a través de la manipulación de un joystick o mouse, el movimiento de la cabeza o el movimiento de las manos. La distracción por realidad virtual puede afectar la percepción del dolor a través de la competencia por los

recursos de atención finita y bloqueando la estimulación externa asociada con el entorno real y el estímulo doloroso. Las investigaciones han demostrado que la distracción por medio de la tecnología de realidad virtual es una intervención efectiva para reducir el dolor experimental, de una manera tan efectiva como el dolor provocado por lesiones de quemaduras. [37] [38]

En otro estudio se abarca el tema de diseño de juegos de motivación en la rehabilitación del brazo después de un infarto. Se menciona que los juegos multi-modales pueden proveer de una atractiva e interactiva plataforma para motivar a las personas a participar en la terapia, además que el diseño de juegos para la rehabilitación requiere la entrada de múltiples campos de conocimiento, como lo son la medicina, la bioingeniería y el diseño de juegos. Algunos de los resultados mostraron que el enganche y disfrute varía dependiendo del juego, sin embargo, se comprueba la viabilidad. [39] [40]

Con lo anterior mencionado es claro que el papel psicológico de los juegos de video es fundamental en el diseño de juegos enfocados a la rehabilitación, por lo que es importante tratar sobre el cómo logran atraer la atención de las personas.

2.4.4 Psicología de los juegos de video

Los videojuegos tienen un efecto psicológico que invita a los usuarios a ser inmersos en estas experiencias y de ahí que exista un gusto hacia este tipo de actividades. Según Scott Rigby³ existen tres necesidades psicológicas que operan simultáneamente en todos nosotros a lo largo de nuestras vidas: competencia, autonomía y parentesco. La competencia es aquél deseo de tener control o tener maestría sobre una situación, las personas buscan ser exitosas y sentir que están progresando a medida que avanzan, tanto en conocimiento como en adquisiciones. La autonomía es aquél deseo de sentir independencia y control sobre las acciones del usuario, y hacen sentir rechazo, por instinto, hacia la sensación de ser manipulados. El parentesco es aquél deseo de sentir que la persona importa a otros y, por ende, se crean y mantienen relaciones significativas con terceros. [41]

Otros autores han encontrado con sus investigaciones que existen una serie de factores que motivan a las personas a usar los juegos de video: [42]

- **Competición:** El deseo de ser mejor que otro jugando a un juego. Es la motivación fundamental de los videojugadores, que se ve reforzada con la aparición del juego online y la posibilidad de enfrentarse a otros jugadores.

³ Scott Rigby Ph.D. en Psicología clínica y social, investigador de la psicología de la motivación, presidente de Immersyve; es coautor del libro *Glued to Games: How videogames draw us in and hold us spellbound*.

- **Desafío:** Se refiere al deseo de dominar todos los aspectos de un juego. Un jugador con esta motivación disfruta especialmente enfrentándose a retos complicados o jugando en la dificultad más elevada de un videojuego.
- **Estímulo emocional:** Un jugador con esta motivación disfruta con la emoción que le produce el hecho de jugar.
- **Fantasía:** Se refiere al hecho de jugar para explorar y conocer mundos y personajes imaginarios. Un jugador con esta motivación disfruta de videojuegos ricos en estos elementos.
- **Interacción social:** Se refiere al hecho de jugar a un videojuego como medio para encontrar nuevas relaciones sociales o afianzar las ya existentes.
- **Escape:** Es una dimensión que surge de las investigaciones sobre motivos de consumo de televisión pero que por sus características creemos que puede aplicarse también al consumo de videojuegos. Se refiere al hecho de jugar para aliviar o escapar de las tensiones del mundo real.
- **Diversión:** Un jugador con esta motivación busca únicamente entretenimiento en el videojuego; es una motivación hedonista.

La idea de implementar las tecnologías virtuales que involucran juegos de video permite visualizar el progreso que ha tenido la rehabilitación, por lo que es interesante recapitular los avances de la mecanoterapia que promueven los ejercicios terapéuticos de la mano patológica, pues esta evolución ha pasado de aparatos mecánicos con variables constantes de fuerza o movimientos, hasta llegar a aparatos más sofisticados con la electrónica de por medio, permitiendo la virtualización de los movimientos e inclusive adentrarse a interfaces más detalladas.

3 Estado del arte

Se pueden apreciar algunos ejemplos de mecanoterapia para el miembro superior, se observan los diferentes dispositivos actuales en el mercado. Los elementos tecnológicos que se muestran más adelante permiten notar el impacto de las interfaces humano-computadora en el área de la fisioterapia incluyendo en algunos de ellos elementos lúdicos como forma de terapia ocupacional. A diferencia de la adaptación de las tecnologías de consolas de juegos para la rehabilitación, algunas de estas máquinas fueron creadas con el propósito de realizar diversos tipos de actividades para obtener otra serie de ejercicios terapéuticos.

3.1 Mecanoterapia para miembro superior

Inicialmente se tenían dispositivos de gran tamaño para los centros de fisioterapia que contaban con una diversa gama de ejercicios para el miembro superior. Como por ejemplo estaba la *mesa de Kanavel*.

Mesa de Kanavel: Es una mesa que contiene una serie de ejercicios para la mano, la muñeca y el codo. Para trabajar con o sin resistencia. Los ejercicios para la mano se realizan mediante unas pesas que cargan con cada uno de los dedos. La mesa cuenta además con un rodillo para practicar el agarre y un elemento giratorio para la pronación y supinación. [43]



Figura 3.1 Mesa de Kanavel con las pesas para los dedos, y los elementos rotatorios. [44]

Por otro lado en el área de los ejercicios de entrenamiento existen pequeños elementos sencillos para trabajar la mano en diferentes posiciones. Se tiene por ejemplo el *HandGrip*®.

HandGrip®: Consiste en un resorte torsional sujeto a una estructura de plástico de donde se sostiene. Es utilizado para realizar ejercicios de flexión de los dedos, esta actividad se utiliza tanto como un ejercicio común para ejercitar la mano como también para la rehabilitación. [45]



Figura 3.2 Modelo del Hand Grip®, se puede observar el resorte torsional. [45]

También existen mecanismos diseñados para entretener y retar la destreza de la mano de los usuarios, que resultaban en ejercicios libres y sencillos para los dedos. Como lo es el juguete *FiddLink*®.

FiddLink®: Consiste en un pequeño mecanismo de plástico que tiene la forma y las dimensiones que permiten se coloque en la mano. El ejercicio consiste en sostener el elemento con una sola mano en el interior de la palma y con el movimiento de los dedos realizar cambios de posición a través de los diferentes eslabones. [46]



Figura 3.3 Dispositivo FiddLink® en posición para girarlo. [46]

La fisioterapia por su parte, comenzó el desarrollo de una serie de elementos con fines terapéuticos más especializados en el agarre de la mano. Como ejemplo existe la *PowerWeb*®.

PowerWeb®: Esta herramienta de la rehabilitación es una red de un material plástico moldeable y resistente. Los agujeros permiten adoptar diferentes posiciones de los dedos para realizar ejercicios de agarre lo que ayuda en el entrenamiento de la fuerza y la movilidad de la mano. La resistencia de sus elásticos varía dependiendo el color de la red, cuenta con una gama de cinco niveles. [47]



Figura 3.4 Muestra de uno de los ejercicios con Power-Web® [48]

Al buscar reducir el tamaño de estos elementos, se pueden observar otros productos enfocados a la mano como el *Handmaster*® y el *Digi-Extend*®.

Handmaster® **Plus**: Consiste en una estructura parecida a una pelota que es suave, adicionalmente tiene una serie de elementos elásticos delgados para colocar cada uno de los dedos. Los ejercicios que se realizan son para trabajar los músculos extensores y flexores así como también la muñeca, por ello se utiliza como tratamiento de relajación y recuperación de la movilidad de la mano. El producto cuenta con tres diferentes niveles de resistencia elástica dependiendo el color que tenga. [49]



Figura 3.5 Visualización del ejercicio de Handmaster® [49]

Digi-Extend®: Se trata de una estructura delgada donde se coloca una banda elástica. La mano se introduce en los orificios y el ejercicio consiste en estirar voluntariamente la liga mediante el estiramiento de la mano. Este dispositivo se utiliza en la rehabilitación como medida para aumentar la resistencia de los dedos de la mano y entrenar la movilidad. Para variar la resistencia elástica se cambia la liga, se cuenta con cinco niveles de tensión. [50]



Figura 3.6 Muestra de cómo se emplea el Digi-Extend®. [50]

Otros elementos más elaborados para aumentar el número de posibles ejercicios que se realizan con un producto son, por ejemplo, el *Gripmaster®*, con una versión evolucionada el *Varigrip®*, esto demuestra la tendencia de los dispositivos: buscar la variación gradual de la resistencia que se opone en su respectivo ejercicio.

Gripmaster®: Es un dispositivo de ejercicios recomendados para desarrollar la fuerza, flexibilidad y coordinación de la mano y cada uno de los dedos, así como también mejorar la fuerza de los flexores de la muñeca. Una estructura rígida sostiene los elementos de resorte, en conjunto tiene una forma cómoda para la mano, utiliza la fuerza de los resortes

como método para trabajar los tendones de la mano. A partir de la configuración que se utilice se puede trabajar cada uno de los dedos a diferentes ritmos o trabajar todo en conjunto en diferentes áreas. Su utilización está enfocada a los usuarios que buscan mejorar la fuerza de sus dedos, especialmente las personas que practican guitarra, sin embargo, su uso también se extiende a la rehabilitación de la mano. [51]



Figura 3.7 Ejemplo del tamaño Gripmaster® en una mano. [52]

Su diseño viene por colores que simbolizan cada uno de los niveles de resistencia que presentan los resortes: amarillo (2.3 [kg]), rojo (4.5 [kg]), verde (7.3 [kg]), azul (10.4 [kg]) y negro 14.1 [kg]. [52]

Varigrip®: Muy similar al *GripMaster®* con la diferencia de que se puede ajustar la resistencia de los resortes por medio de tornillos que modifican la posición inicial. [53]



Figura 3.8 En el Varigrip® se puede observar en la parte inferior los tornillos de ajuste. [53]

Además de la necesidad de variación también se busca comodidad en la herramienta de ejercicios, es por ello que se adopta la forma natural de la mano como por ejemplo *Xtensor®*.

Xtensor®: Es un guante con agujeros para cada uno de los dedos. Al colocar la mano en posición se estira una banda elástica por cada dedo. Puede ser usado tanto en la mano derecha como en la izquierda. En rehabilitación se ha recomendado este producto como un entrenamiento de la fuerza de los dedos así como también de un método de relajación. Es recomendado para personas con síndrome del túnel carpiano y rehabilitación post quirúrgica de la mano. [54]



Figura 3.9 Visualización del producto Xtensor® puesto en acción [55]

Dada la necesidad de retroalimentación y precisión en la medición de las variables se implementaron dispositivos que puedan registrar el progreso de la rehabilitación, así como también poder adaptarse a las necesidades del usuario tanto en la fuerza empleada como en la comodidad de la mano, se han hecho progresos en cuanto a sistemas tecnológicos que permitan tal progreso en los dispositivos.

3.2 Retroalimentación en la mecanoterapia

En los productos que se presentan a continuación, puede se observa un dispositivo físico que permite medir las variables de control para la rehabilitación y una interfaz que ayuda a que exista retroalimentación con el usuario, pues el paciente puede observar que sus ejercicios estén siendo realizados correctamente así como también el progreso que va teniendo a medida que avanzan sus sesiones de terapia, estas interfaces además cuentan con algunas actividades lúdicas como medio para realizar los ejercicios.

Amadeo® de Tyromotion: Se trata de un dispositivo diseñado para la terapia física de la mano, especialmente para la rehabilitación después de la cirugía de parálisis de mano, terapia ortopédica y la rehabilitación de la parte superior del cuerpo después de

intervenciones quirúrgicas. Como se puede observar en la figura 3.10 se empieza a hacer presente una interfaz humano -computadora. [56]



Figura 3.10 Muestra del sistema Amadeo® con su interfaz y su aplicación sobre una mano. [56]

Sistema Pablo® de Tyromotion: Es un conjunto de dispositivos que emplean giroscopios electrónicos para realizar mediciones angulares según las distintas posiciones que el paciente requiere realizar. Al utilizar los accesorios permite al usuario colocarse en diferentes configuraciones para contribuir con la diversificación de actividades que se realizarán. Es utilizado para rehabilitar el hombro, el codo y la muñeca. [57]



Figura 3.11 Componentes del Sistema Pablo®: el control y sus accesorios. [57]

Sistema Diego® de Tyromotion: El sistema está diseñado para pacientes y terapeutas con los ejercicios que resultan complicados para las funciones debilitadas del brazo, lo que permite al paciente al cabo de varias terapias nuevamente el movimiento natural habitual. [58]



Figura 3.12 Prueba con los brazos del sistema Diego® de Tyromotion. [58]

Armeo® de Hocoma: Consiste en un elemento mecánico que permite realizar ejercicios activos libres, resistidos y pasivos del brazo de acuerdo a sus diferentes versiones. Los movimientos que puede recopilar son abducción y flexión del hombro, flexión del codo, pronación y flexión de la muñeca, agarre de la mano. Tales movimientos pueden ser enlazados a una interfaz gráfica de manera que el dispositivo es utilizado como un joystick. Tiene como objetivo incrementar el rango de movilidad, la fuerza y la resistencia, facilitar el movimiento “iniciado”. De sus tres versiones, la única que está diseñada para uso doméstico es “Armeo® Boom” el cual consiste en un sistema suspendido. [59]



Figura 3.13 Armeo Boom® probado en una laptop. [59]

Algunos de los dispositivos presentados además de contar con sensores para medir las posiciones también cuentan con actuadores que desarrollan sistemas hápticos⁴ para hacer más atractivo el ambiente virtual de terapia.

Ultra® de Easytech: Es un manipulador robótico pasivo diseñado para la rehabilitación ortopédica y neurológica de los miembros superiores. Este dispositivo realiza su interfaz gráfica con ayuda de una computadora. [60]



Figura 3.14 Ultra con uno de sus ejercicios para la mano. [60]

Hand Mentor® de Kinetic Muscles, Inc: Consiste en un dispositivo que se coloca ajustándolo sobre la mano para mejorar la función en la extremidad superior. El producto cuenta con una interfaz gráfica que utiliza un monitor propio como ambiente interactivo para animar al paciente a que mejore la función de su mano con programas físicos de terapia de la mano. [61]



Figura 3.15 Muestra de la implementación del Hand Mentor. [61]

⁴ Los dispositivos hápticos proporcionan una realimentación de fuerza de interacción al usuario que interactúa con entornos virtuales o remotos.

Además de lo ya mencionado, se busca una comodidad en los productos por lo cual existe una tendencia hacia el desarrollo de dispositivos semejantes a los guantes, combinado con interfaces por computadora.

Hand Tutor®: Es un dispositivo de entrenamiento combinado para los dedos de la mano como tratamiento físico. El sistema contiene detalles de las instrucciones de los ejercicios y una retroalimentación para realizar los ejercicios correctamente. [62]



Figura 3.16 Visualización de uno de los ejercicios del Hand Tutor. [62]

Gloreha Glove®: Es un dispositivo para el tratamiento casero de los pacientes, basado en rehabilitación de cualquier deficiencia de la mano. El dispositivo consiste en un guante con empalmes de los dedos para que el paciente pueda seguir el ejercicio a través de una animación 3D en la pantalla. [63]



Figura 3.17 Gloreha Glove® con su visualización 3D en una pantalla de computadora. [63]

3.3 Patentes sobre rehabilitación de la mano

Además de la información explorada en el mercado se puede destacar la existencia de algunas patentes que involucran la rehabilitación de la mano como tema principal.

Método y aparato para la rehabilitación del movimiento de masas-entregado (Method and apparatus for mass-delivered movement rehabilitation): Es un sistema basado en computadora para proveer de terapia para el movimiento del brazo y la muñeca con motores sensibles implementados. Puede ser utilizado para controlar remotamente una computadora. [64]

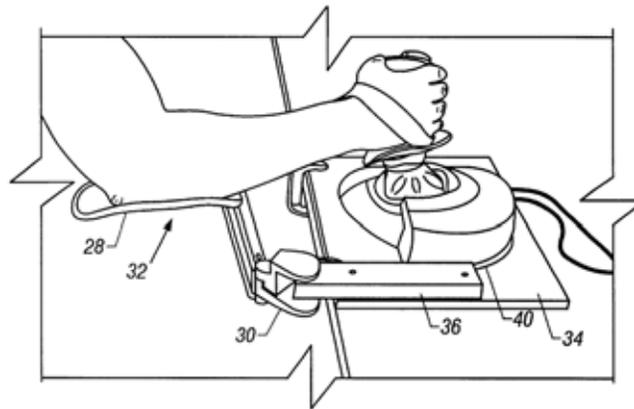


Figura 3.18 Método y aparato para la rehabilitación del movimiento de masas-entregado. [64]

Dispositivo de rehabilitación dedo elástico tipo separable (Separable type elastic finger rehabilitation device): Este invento trata sobre un dispositivo para la rehabilitación de un dedo y tiene como propósito restaurar la fuerza muscular utilizando elásticos que pueden ir incrementando la presión para restaurar la función del dedo. [65]

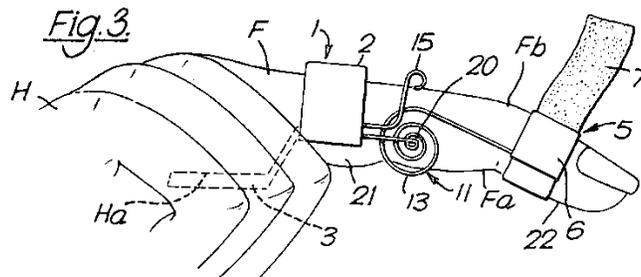


Figura 3.19 Extraído de Dispositivo de rehabilitación de dedo elástico tipo separable [65]

Guante inteligente multi-usuario para la rehabilitación basada en entorno virtual (Multi-user smart glove for virtual environment-based rehabilitation): Se trata de un sistema de rehabilitación de bajo costo con entorno virtual y un guante como dispositivo de entrada para pacientes que sufrieron un infarto o alguna otra complicación neurológica. El sistema realizará seguimiento de movimiento del brazo, mano y dedos. [66]

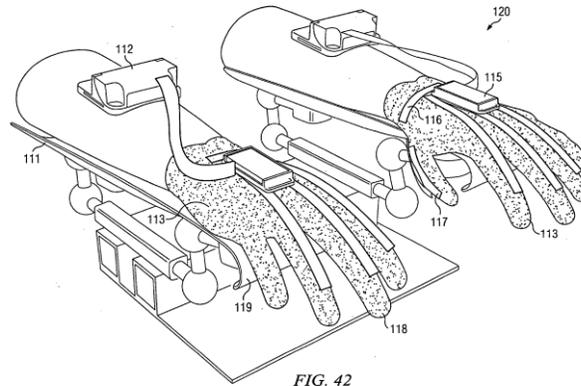


Figura 3.20 Guante inteligente multi-usuario [66]

Dispositivo vestible de asistencia para la rehabilitación de la mano (Wearable power assistive device for hand rehabilitation): Este dispositivo incluye una plataforma externa y una interna que se conectan, junto con un ensamble de cinco dedos ajustables y cada uno de estos incluye una articulación proximal unida en una junta. Con cinco motores usados para cada dedo, cada motor es montado cerca de la plataforma externa. [67]

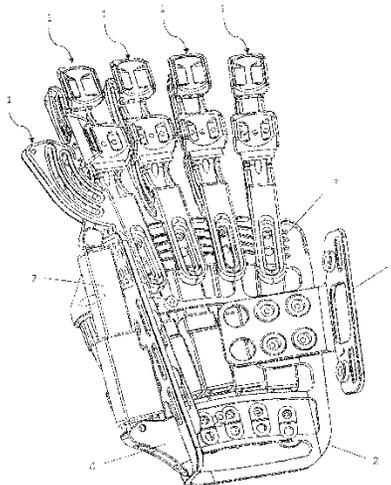


Figura 3.21 Dispositivo vestible de rehabilitación para la mano. [67]

Guante de ejercicio o rehabilitación con pesas de dedo (Weighted finger exercise/rehabilitation glove): Este aparato de ejercicios y rehabilitación consiste en un par de guantes con unas pesas que pueden ser intercambiadas de posición dependiendo de los ejercicios que se desean. [68]

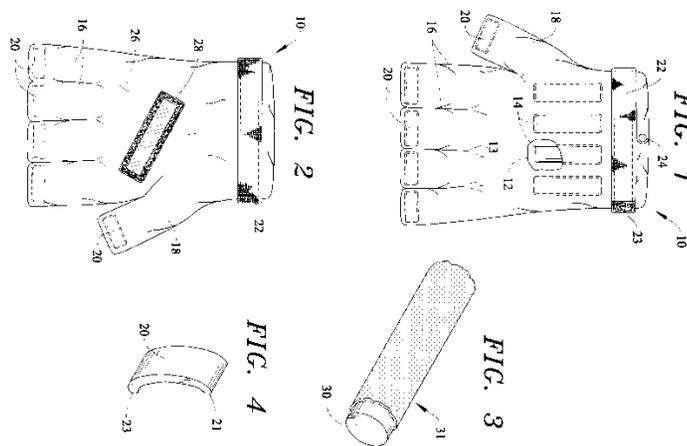


Figura 3.22 Guante de ejercicio o rehabilitación con pesas de dedo. [68]

Con todo lo mostrado se puede observar una evolución de los elementos involucrados en los sistemas de rehabilitación, se pueden apreciar algunas de las tecnologías implementadas así como aplicaciones presentadas en las patentes. A partir de lo mencionado es posible vincular los antecedentes sobre las actividades lúdicas en el ámbito de la rehabilitación con el desarrollo de los dispositivos empleados en la mecanoterapia. Es así que se puede presentar el proyecto en cuestión, la información influyó a la problemática que se plantea a continuación, así como el estado del arte ayudó al planteamiento de las ideas de una posible configuración del modelo.

4 Objetivo

El objetivo de este proyecto será:

Desarrollar el modelo funcional de un dispositivo lúdico para ejercicios de rehabilitación de la mano.

4.1 Objetivos específicos

- Diseñar un concepto solución del dispositivo con base en los ejercicios terapéuticos, la goniometría de la mano y la aplicación de técnicas lúdicas, así como lo observado en el estado del arte.
- Realizar la construcción de un modelo funcional del concepto solución obtenido que permita realizar las mediciones angulares de la mano, cuente una interfaz capaz de contener diversidad de actividades, las cuales contendrán elementos lúdicos.
- Diseñar ejercicios, aproximados a los recomendados para tratar la movilidad de la mano y la goniometría de la mano, que empleen el modelo para comprobar la viabilidad del concepto y la factibilidad del modelo funcional.

5 Justificación

Como se explicó en el capítulo 2 Antecedentes, ya que la mano tiene una gran importancia en la vida de los seres humanos, el estilo de vida actual de las personas implica en una gran área trabajo de oficina que involucra el utilizar una computadora, esto a su vez requiere de emplear un teclado o un ratón por periodos prolongados de tiempo. El abuso de tiempo en los juegos de videos y los teléfonos móviles involucran posiciones para las manos, que en periodos largos resulta perjudicial.

Los casos anteriormente mencionados de la vida cotidiana generan una tendencia a desgastar las articulaciones, debilitar los músculos y que las personas sean propensas a enfermedades como las mencionadas en el capítulo 2.1.2 Patología de la mano, para tomar un punto de partida se considera principalmente la artritis reumatoide o el síndrome del túnel carpiano que son enfermedades comunes en la afección de las articulaciones de la mano, además de tener ejercicios de recuperación que involucran la movilidad de la mano así como mantener posiciones durante cortos periodos de tiempo.

Los dispositivos de rehabilitación están sujetos a una serie de ejercicios que deben seguir un plan de trabajo al realizarlos, es por ello que se promueve la necesidad de motivación para la ejecución de ejercicios terapéuticos para la mano, y de distracción cuando las personas se encuentren bajo alguna patología y la concentración para realizar los movimientos correctamente de manera inconsciente.

6 Problemática

La rehabilitación requiere seguir una guía de instrucciones para la correcta realización de los ejercicios terapéuticos en una etapa de cinesiterapia activa (el paciente ejecuta los movimientos), sin embargo, no todas las personas tienen un fácil acceso a las instalaciones de rehabilitación donde se proporciona el servicio; esto promueve que algunos fisioterapeutas recomienden una serie de ejercicios en casa, a veces con algunas herramientas sencillas como mancuernas, pesas pequeñas y ligas. Sin embargo, los ejercicios que se realizan con aparatos se vuelven monótonos, repetitivos y, por lo tanto, aburridos. La situación de aburrimiento provoca que los pacientes sientan un desinterés en realizar los ejercicios y como consecuencia decidan no continuarlos para buscar actividades más interesantes o entretenidas. Es muy importante que los pacientes realicen sus ejercicios para que exista progreso significativo en su tratamiento, estos avances son medidos por el terapeuta en cada una de las citas periódicas.

La mano constituye una de las herramientas principales de las actividades cotidianas de las personas, por lo que es vital que se evite su incapacidad de funcionar. La forma de prevenir una variedad de enfermedades es hacer uso de la fisioterapia, el mover las articulaciones permite evitar que se queden tensados los músculos, ayuda a la recuperación de la motricidad después de que exista un periodo de inmovilización, también recupera la fuerza muscular, y retrasa la deformación de la mano en enfermedades reumáticas.

Para la rehabilitación de la mano se considera los dedos y la muñeca, puesto estos son los elementos realizan los movimientos que permiten realizar el agarre (prensa), utilizar herramientas primordiales en la vida cotidiana. La correcta realización del proceso de rehabilitación es uno de las principales preocupaciones de los pacientes, dado que buscan resultados tangibles, y para que esto ocurra debe realizarse los ejercicios terapéuticos con periodicidad y constancia.

7 Metodología de diseño

A lo largo de la carrera se han estudiado diferentes métodos de diseño planteados por los profesores, algunos de los puntos clave convergen con los elementos dados por la metodología de diseño de Ulrich, entre los que se destaca: Identificar necesidades del cliente, Establecer especificaciones objetivo, Generar conceptos del producto, Seleccionar conceptos del producto y Probar conceptos del producto. Con las modificaciones pertinentes, a partir de la experiencia que se ha tenido con diferentes métodos, se establece una metodología que se seguirá para el proyecto presentado. [69]

El procedimiento es el planteado a continuación: a partir de la problemática, se recopila las necesidades a cubrir, éstas a su vez son transcritas a modo de requerimientos que debe contener la solución, los cuales se traducen en especificaciones objetivo dadas por el autor, que puede dar solución a lo inicialmente planteado.

Se procede a la generación del concepto, luego son establecidas las entradas y salidas del sistema, donde se hace una división en funciones que son representadas en subsistemas. Posteriormente se plantean las posibles tecnologías a utilizar de cada subsistema, se organizan en una carta morfológica y se procede a buscar la configuración más adecuada combinando algunas de las tecnologías propuestas.

Una vez que se ha elegido una solución, se procede a realizar pruebas conceptuales sobre su viabilidad a nivel técnico, una vez que se ha logrado comprobar el concepto se procede a la construcción de un modelo funcional y la descripción del diseño de configuración del mismo donde se documenta todos los elementos implementados, así como la conexión que existe entre ellos.

Después de completar su construcción, se realizan pruebas del modelo funcional para comprobar que se cumplen las especificaciones objetivo del concepto, con los resultados arrojados se puede obtener una conclusión respecto al diseño realizado.

8 Diseño conceptual

Como se mencionó en la metodología, a partir de la problemática se recaba la información de las necesidades con la finalidad de alcanzar un concepto basado en las especificaciones objetivo que se tienen. El desarrollo permitirá obtener un concepto que involucra una descripción aproximada de la idea que se va a materializar y que va satisfacer las necesidades.

8.1 Necesidades

Se entiende por necesidades a los atributos y requisitos que se desea en un proyecto, éstas son independientes de cualquier producto particular que se pudiese desarrollar. Las necesidades se expresan como enunciados escritos que describen lo que el dispositivo tiene que hacer más no el cómo podría hacerlo. [69]

Después de analizar la información de la problemática y considerar algunos de los elementos destacados que aparecen en el estado del arte se obtuvieron los siguientes puntos como necesidades:

- Debe ser entretenido para el usuario, para evitar el aburrimiento causado por la monotonía.
- Debe asegurar que los ejercicios se practiquen correctamente, con la finalidad de que puedan ser realizados sin un terapeuta.
- Debe ser de uso doméstico, para evitar que el paciente requiera más visitas a la institución o centro de fisioterapia.
- Debe ser seguro, para ser usado sin supervisión y no dañe al paciente.

8.2 Requerimientos

La información de las necesidades es analizada y reestructurada a modo de requerimientos que describen los elementos más destacados en la Tabla 1 Necesidades y requerimientos. Un requerimiento se puede considerar como un enunciado que vincula las necesidades con acciones u operaciones que incluirá o realizará el proyecto.

Tabla 1 Necesidades y requerimientos

Necesidades	Requerimientos
Debe ser entretenido para el usuario.	Contener elementos lúdicos
Debe asegurar que los ejercicios se practiquen correctamente.	Realizar las mediciones en tiempo real de las diversas actividades.
	Contener retroalimentación para el paciente
Debe ser de uso doméstico.	Poder ser utilizarlo en una mesa o escritorio de uso doméstica.
Debe ser seguro.	Mantener al usuario dentro de los límites de movimiento.

Para cumplir que debe ser entretenido se promueve que contenga elementos lúdicos que involucren las características mencionadas en el capítulo 2.4.4 Psicología de los juegos de video.

Con el fin de asegurar que los ejercicios se realicen correctamente se debe incluir una retroalimentación permita al paciente saber cuándo esté en la posición adecuada y en qué momento no, para corregirlo; por lo mismo, debe ser capaz de realizar las mediciones lo más aproximado al tiempo real para asegurar un buen desempeño.

A modo que sea de uso doméstico se asegura que sea accesible a usarse en un escritorio o mesa, dado que permita al usuario sentarse y usar el dispositivo en cualquier lugar que cuente con una superficie.

Finalmente como debe ser seguro, se busca mantener al usuario dentro de los límites angulares guardados en el apartado de goniometría y así evitar que el usuario se exceda en sus movimientos.

8.3 Especificaciones

Las especificaciones representan una base sobre lo que el proyecto debería hacer para satisfacer las necesidades, más concretamente consiste en una métrica y un valor que describen las aspiraciones del proyecto.

Las traducciones de requerimientos a especificaciones serán basadas en el juicio del autor, con el fin de tener resultados cualitativos y cuantitativos y como consecuencia el proyecto pueda ser evaluado respecto al objetivo, y son mostrados a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2 Requerimientos y especificaciones del sistema

Requerimientos	Especificaciones
Contener elementos lúdicos diversos para mantener la atención del paciente.	Tiempo tolerado mínimo
Poder ser utilizarlo en una mesa o escritorio de uso doméstico.	Espacio requerido máximo
	Dimensiones máximas
	Peso máximo
Realizar las mediciones en tiempo real de las diversas actividades que se practiquen.	Velocidad de procesamiento mínimo
Mantener al usuario dentro de los límites de movimiento.	Grados máximos para los ejercicios
Contener retroalimentación para el paciente	Cantidad de indicadores

Para tener una referencia del contenido de elementos lúdicos, dado que no existe un parámetro para un valor subjetivo como este, es propuesto un tiempo tolerado por el usuario, pues de ser entretenido no se tendrá problemas en continuar la actividad.

En el caso de requerir ser utilizarlo en una mesa de uso doméstico, se deben involucrar sus dimensiones, el espacio de trabajo requerido y el peso del dispositivo.

Para acercar las mediciones de tiempo real se debe utilizar una adecuada velocidad de procesamiento y obtención de las variables.

Dado que es necesario mantener el usuario dentro de los límites de movimiento se utiliza los grados máximos de movilidad, a partir de lo observado en las mediciones goniométricas de los movimientos de la mano.

La retroalimentación para el paciente, de manera que esté consciente de la correcta realización de su ejercicio se debe dar por la presencia de indicadores.

Cada una de las especificaciones está descrita por su variable y su valor con unidad (en el caso de las cuantificables) o su parámetro (en el caso de los cualitativos).

Tabla 3 Especificaciones con valores.

Especificaciones	Valores	Justificación
Tiempo tolerado mínimo	20 [min]	Se recomienda realizar al menos 15 [min], sin embargo se propone 20 [min] dado que posteriormente se puede aumentar la dosis
Espacio requerido máximo	750 [cm ²]	El espacio que se pretende es aproximadamente 15 [cm]*50 [cm] considerando el largo de un antebrazo flexionado y de un ancho sobrado.
Dimensiones máximas	Espacio en plano 30x30 [cm ²] Altura 30[cm]	Es el volumen aproximado de una computadora abierta.
Peso o fuerza a vencer máxima	3 [kg]	Se considera la fuerza aproximada entre los niveles más bajos del Gripmaster®.
Velocidad de procesamiento mínimo	20 [Mhz]	Basado en la experiencia de utilizar microcontroladores con múltiples sensores y protocolos de comunicación.
Grados máximos para los ejercicios	30 [°] para muñeca 80 [°] para falange proximal	A partir de lo mostrado en el ANEXO I de goniometría.
Cantidad mínima de indicadores	Un elemento por grado de libertad	Con el fin de que el usuario sepa que su posición es correcta o incorrecta, se define que al menos un indicador.

Se completan las especificaciones objetivo con su respectiva justificación añadida como puede ser observado en la Tabla 3, a partir de lo anterior se puede proceder a la elaboración del concepto que resolverá la problemática y se ajustará a lo establecido por el autor en las especificaciones que posteriormente pueden ser mejoradas según el resultado obtenido en el desarrollo.

8.4 Concepto

Un concepto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto; en otras palabras, es una explicación concisa de la forma en que el producto va a satisfacer las necesidades; se expresa como un bosquejo o como un modelo aproximado y a veces es acompañado por una breve referencia. [69]

Con lo anterior se establece el concepto, que cumple con una serie de funciones o acciones, de manera que se consideren las necesidades y las especificaciones contempladas, con la finalidad de tener una referencia de lo que se desea obtener y así poder establecer el diagrama del sistema así como las funciones permitidas.

Por lo tanto el concepto es:

Un dispositivo que permita al usuario realizar diversos ejercicios de movilidad, amplitud y resistencia de una manera lúdica a través de la medición de variables dadas por el usuario que, después de ser procesadas, sean utilizadas por una interfaz para que pueda existir una interacción que entretenga, retroalimente al usuario y permita llevar un control del tiempo de uso, además permita el registro de los datos obtenidos en cada sesión; este dispositivo deberá tener dimensiones de un electrodoméstico de mesa por lo cual el paciente podrá ser capaz de utilizarlo sin supervisión.

El concepto obtenido puede cumplir con las necesidades establecidas a partir de sus características:

- Se cumple que debe ser entretenido para el usuario, al incluir elementos lúdicos en la realización de diversos ejercicios así como la implementación de una interfaz que mantenga una interacción de entretenimiento.
- Se cumple que se asegure que los ejercicios se realicen correctamente, al incluir la medición de las variables de la mano, una retroalimentación al usuario de manera que éste puede corregir su posición, así como también un control del tiempo de uso para regular su actividad.
- Se cumple que sea de uso doméstico y que sea seguro al determinar que sus dimensiones serán adecuadas para usarse por algún paciente y asegurarse que el usuario pueda utilizarlo sin supervisión al incluir la retroalimentación.

A partir del concepto se puede desarrollar una visualización gráfica de los sistemas necesarios para cumplir con el objetivo, a partir de un diagrama de caja negra⁵.

⁵ *Caja negra* es aquel elemento que es estudiado desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas o respuestas que produce, sin tener en cuenta su funcionamiento interno. En otras palabras, es estudiado su forma de interactuar con el medio que le rodea entendiendo *qué es lo que hace*, pero sin dar importancia a *cómo lo hace*.

8.5 Sistemas involucrados

Se realiza la abstracción del dispositivo como un diagrama de caja negra (véase Figura 8.1 Diagrama de caja negra con las entradas y las salidas), se puede partir de que se necesita analizar las posiciones de la mano y de la muñeca y se requiere de una interacción con el usuario, así como la información del resultado de estas actividades debe ser recopilada a modo que pueda ser consultada posteriormente.

En el caso particular del proyecto el dispositivo tendrá como entradas: la posición de los dedos de la mano medida, la posición de la muñeca medida y la energía suministrada para los componentes que lo requieran; las salidas serán: la interacción con el usuario, la recopilación de la información de resultados.

De manera que el sistema completo (o caja negra) aprovecha las variables de la mano que son medidas, son utilizadas para crear la interacción entre el usuario y la interfaz de manera que se empleen estímulos para los receptores sensoriales de las personas (visión, audición, táctil) y se realice alguna actividad lúdica, los resultados obtenidos de esta actividad serán recopilados por el sistema.



Figura 8.1 Diagrama de caja negra con las entradas y las salidas correspondientes.

Para entender el funcionamiento de la caja negra, se realiza la división de las funciones necesarias para el aprovechamiento de las entradas y obtener las salidas deseadas, estas funciones son representadas por subsistemas abstractos. En la es posible observar la relación que existe entre los subsistemas y los elementos utilizados: soporte, alimentación (energía) información del usuario y la interacción con el usuario.

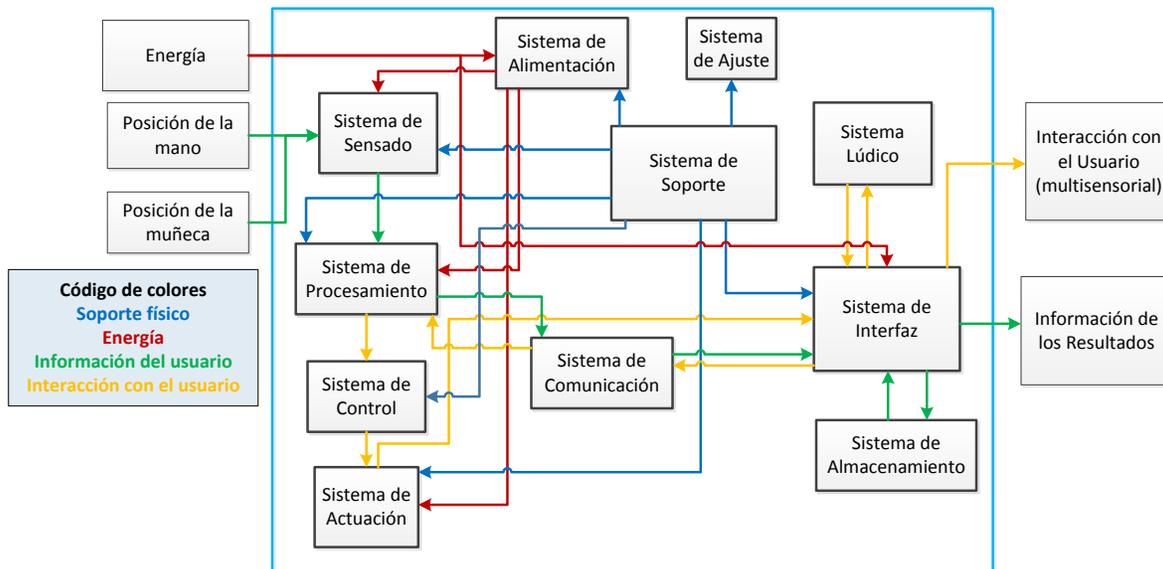


Figura 8.2 Relación entre los subsistemas en los que se divide el sistema.

Cada uno de los subsistemas es descrito a continuación para explicar la interacción que existen entre ellos y destacar la tarea que realizan dentro del sistema completo.

- **Sistema de Soporte:** Almacena y protege del ambiente al resto de los sistemas físicos. La estructura, además, permite que los sistemas de sensado y actuación mantengan la posición para que realicen correctamente sus funciones. Sostiene además al sistema de alimentación y al de procesamiento con el fin de evitar desconexiones.
- **Sistema de Ajuste:** Permite que el dispositivo sea utilizado por diferentes pacientes considerando las variaciones de dimensiones antropométricas.
- **Sistema de Alimentación:** Obtiene la energía y regula de los diferentes niveles necesarios para alimentar a los elementos que así lo requieran.
- **Sistema de Sensado:** Recibe las posiciones de los grados de libertad de la mano y la muñeca y la convierte en información aprovechable para el sistema de procesamiento.
- **Sistema de Procesamiento:** Organiza la información proveniente de los sensores y la envía adecuadamente al sistema de comunicación. Al mismo tiempo se encarga de suministrar la información de las posiciones angulares al sistema de control por medio de la información de la interfaz.

- **Sistema de Comunicación:** Este apartado funge como vínculo entre el sistema de procesamiento y la interfaz con la que se trabaja.
- **Sistema de Control:** Permite un comportamiento regulado de los actuadores involucrados utilizando un método de control de lazo cerrado, para obtener retroalimentación del error de la posición del actuador.
- **Sistema de Actuación:** Crea interacción directa entre el usuario y el dispositivo, los movimientos realizados del usuario son sincronizados con la interfaz (que utilizará la información para el sistema lúdico) y retroalimentados al usuario.
- **Sistema de Interfaz:** Es la comunicación entre el dispositivo y el paciente, ésta permite al usuario reconocer las posiciones actuales y utilizarlas en las actividades de la forma en que se le pide. Al mismo tiempo será capaz de revisar la información del progreso contenida en el sistema de almacenamiento para ser mostrada tanto al paciente como al terapeuta.
- **Sistema Lúdico:** Involucra las actividades a desarrollar por medio de la interfaz, éstas mantienen activo, concentrado al usuario además de involucrar las características psicológicas de un juego de video.
- **Sistema de Almacenamiento de Datos:** Guarda la información de las sesiones del paciente tanto en la interfaz como en un elemento físico o virtual de manera que sea posible visualizarse en otros sistemas.

8.6 Relación entre las especificaciones y los sistemas involucrados

Finalmente hay que tomar en cuenta la relación que tiene cada una de las especificaciones con los sistemas involucrados para visualizar la relevancia que tienen cuando se esté trabajando en la toma de decisión. En la Tabla 1 se ilustra por medio de “O” para destacar que existe relación y “X” donde no la hay.

Las relaciones nos permiten hilar ideas en la selección de concepto para cada sistema involucrado en el proyecto. A partir de lo cual se puede observar que el desarrollo de la interfaz funge como elemento principal dado que está involucrado en todas las especificaciones. Mientras que el sistema de alimentación es meramente parte del sistema

para que los elementos electrónicos funcionen correctamente, sin embargo es necesario debido a las tecnologías que se pretenden utilizar pues de no existir los componentes no podrían desarrollar sus funciones.

Tabla 4 Relación entre las especificaciones y los subsistemas.

Sistemas	SopORTE	Ajuste	Alimentación	Sensado	Procesamiento	Comunicación	Control	Actuación	Interfaz	Lúdico	Almacenamiento
Tiempo tolerado mínimo	O	O	X	X	O	X	X	O	O	O	X
Espacio requerido máximo	O	O	O	O	X	O	X	O	O	O	X
Dimensiones máximas	O	X	X	O	X	X	X	X	O	O	X
Peso o fuerza a vencer máxima	O	O	X	X	O	X	O	O	O	X	X
Velocidad de procesamiento mínimo	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O
Grados máximos para los ejercicios	O	O	X	O	X	X	O	X	O	O	X
Cantidad mínima de indicadores	X	X	X	O	O	X	X	X	O	O	O

Las observaciones que se pueden hacer es que la interfaz resulta el elemento más importante, dado que a partir de ésta se definirá si se requiere un amplio espacio de trabajo, así como las dimensiones del dispositivo; e involucra directamente el uso del procesamiento debido a las comunicaciones que se requieren, así como el número de operaciones necesarias dependiendo de los sensores elegidos.

Por otro lado el siguiente sistema en jerarquía es el sistema lúdico, dado que el proyecto en sí está basado en la implementación de la gamificación en los ejercicios terapéuticos para resolver la problemática.

A partir de este punto aparece el sistema de soporte y el sistema de sensado. El sistema de soporte mantiene su relevancia en que depende directamente el espacio requerido así como las dimensiones de la estructura o estructuras que se generarán. Mientras que el sistema de sensado es responsable de la medición de las variables proporcionadas por el usuario y sin ellas no existiría interacción alguna.

8.7 Carta morfológica

Para visualizar las opciones de las posibles configuraciones se utiliza la técnica de análisis morfológico, el cual se basa en la concepción de que cualquier objeto de nuestro pensamiento está compuesto o integrado por cierto número de elementos y que éstos tienen identidad propia y pueden ser aislados. Para realizarlo se realiza el análisis de los elementos que lo componen, los cuales deben ser elegidos por su relevancia y viabilidad en el proyecto; después se analizan las variantes o alternativas de cada posible elemento, y de este modo es posible realizar posibles combinaciones tomando una variante de cada atributo. La matriz que contiene las alternativas de cada subsistema se encuentran ilustrados en la Tabla 5 y Tabla 6 . [70]

Tabla 5 Carta morfológica con todos los sistemas involucrados (1/2).

Control	Actuación	Interfaz	Lúdico	Almacenamiento
Control ON-OFF	Electro-imán con imanes fijos	Gráfica con computadora	Juego Rítmico	Memoria USB
Control P	Solenoide	Luces y Sonidos	Juego Puzzle	Memoria SD
Control PID	Piñon-cremallera	Gráfica con pantalla incluida	Juego Habilidad	Base de Datos internet
	Motores, cables y poleas			Archivo texto

Tabla 6 Carta morfológica con todos los subsistemas involucrados (2/2).

Soporte	Ajuste	Alimentación	Sensado	Procesamiento	Comunicación
Móvil	Medida estándar	Batería Recargable	Giróscopo+ Acelerómetro	PIC	Cable Serial
Fijo de mesa	Broches	Cable toma corriente	Sensor de Flexión	Arduino	Bluetooth
Fijo articulado	Retráctil	Baterías AA	Encoders magnéticos	Raspberry	Xbee
	Piezas independientes	Celdas solares	Encoders ópticos	Chipkit	Driver USB

Las opciones para el sistema de soporte son establecidas a partir de la premisa de que debía mantenerse unido y reducir el número de piezas, a modo que la estructura no fuese modular, para que no requiera una gran cantidad de operaciones para instalarlo.

En cuanto al sistema de ajuste se consideran atributos para ajustarse a una mano basados en lo observado en el capítulo tres Estado del arte, y elementos cotidianos de vestimenta para la mano (como broches o velcro).

Para establecer el sistema de alimentación son consideradas las opciones que involucraran un voltaje superior a 5 [V] necesario para regular la energía de un microcontrolador y alimentar los posibles actuadores que vayan a ser utilizados.

Los sensores que pueden ser utilizados para este proyecto involucran la medición de ángulos o posiciones angulares directa (como los encoders o el acelerómetro) o indirectamente (como el sensor de flexión).

El sistema de procesamiento es restringido a un microcontrolador o tarjeta de desarrollo, pues se pretende que sea accesible para las personas, a modo que no requieran un proceso de instalación software especializado y que trabaje de manera independiente; es por ello que se eligen una serie de opciones basadas en la experiencia del autor a lo largo de la carrera.

Las opciones del sistema de interfaz están basadas en la interacción de la persona con el dispositivo de manera que existan los ejercicios, es por ello que se consideran opciones que permitan una retroalimentación visual y auditiva, según la interfaz establecida se puede elegir un sistema de comunicación que puede ser alámbrico o inalámbrico a manera que se pueda ampliar la selección de configuraciones posibles; además la información recopilada de la interfaz es utilizada por el sistema de almacenamiento que es elegido a partir de diferentes métodos para guardar información digital, de manera que para todos estos sistemas se agregan tecnologías conocidas por el autor.

El sistema de actuación será implementado para generar fuerzas que interactuaran con el usuario directamente, estos movimientos son lineales con el fin de marcar una ruta para los dedos, y a partir de la configuración adecuarse a los movimientos de la mano y la muñeca; con la finalidad de que este sistema pueda realizar sus movimientos sin ser brusco o generar oscilaciones, por lo cual se establecen algunas tecnologías así como los métodos de control aceptados y conocidos por el autor para los fines del proyecto.

Mientras que el sistema lúdico es establecido por diferentes categorías de juegos que pueden ser usados por el dispositivo y que tengan como objetivo movimientos o posiciones angulares en ciertos periodos de tiempo; sin embargo, estas variaciones así como algunas de las mencionadas en otros sistemas pueden no ser elegidas de manera independiente a las combinaciones de la carta morfológica, de manera que se facilita las configuraciones

posibles, a raíz de esto se presentan algunas de las elecciones sobre algunos de los sistemas propuestos.

8.8 Elecciones independientes

Para continuar con la elección del concepto final se debe proceder a elegir la mejor opción para cada uno de los elementos. Sin embargo, hay elementos que son independientes del modelo físico que se tiene pensado que se pueden elegir independientemente del principio de funcionamiento elegido y el diseño de la solución no sufrirá cambios significativos.

8.8.1 Elección del Sistema de procesamiento

Para la elección de este sistema se emplea una tabla comparativa donde podemos observar algunas de las características con más impacto para el propósito del proyecto, elegidas a partir de las especificaciones.

Se requiere que la velocidad sea de al menos 20 Mhz para que el proceso se realice en tiempo real sin incomodar al usuario. El número de entradas y salidas sean al menos 16 para completar los periféricos necesarios para los sensores dado que se requiere grados de libertad para la muñeca y otros para los dedos, y además incluir las salidas de los actuadores. El protocolo de comunicación tiene relevancia en cuanto a la velocidad de procesamiento así como también la facilidad para crear comunicación con la interfaz. El lenguaje de programación es considerado debido a los posibles lenguajes que maneja el autor.

Tabla 7 Comparación entre los microcontroladores propuestos.

Microcontrolador	Velocidad max.	Entradas/ Salidas	Protocolo de Comunicación	Lenguaje de programación
PIC16F887	20MHz	35	USART,SPI,I2C	PIC C, CCS
PIC18F4550	48MHz	35	USART,SPI,I2C , USB	PIC C, CCS
Arduino Mega 2560	16MHz	54	USART, I2C,SPI	Arduino IDE
Arduino DUE	84MHz	54	USART,SPI,I2C ,USB	Arduino IDE
Raspberry Pi	700MHz	15	USART,I2C,GP IO,SPI	Phyton
ChipKIT UNO32	80MHz	42	UART,I2C,SPI	PIC C/Arduino IDE

Las observaciones están enfocadas principalmente en la especificación de velocidad de procesamiento, otro punto importante es la cantidad de puertos que se pueden utilizar dado el número de sensores y actuadores que podrían ser utilizados, con la consideración de la velocidad y el número de entradas respectivamente, se descarta la posibilidad de usar Arduino Mega 2560 y Raspberry Pi.

Debido a la necesidad de utilizar la menor cantidad de espacio se opta por evitar utilizar las tarjetas de desarrollo, por lo cual es preferible utilizar los circuitos integrados con su respectivo circuito mínimo, a partir de esto se propone utilizar la tecnología PIC o AVR (familia de microcontroladores utilizados en las tarjetas de desarrollo Arduino). Los microcontroladores PIC fueron elegidos debido a que el PIC16F887 fue estudiado en la carrera, se utilizó el *datasheet* para comprender la mayoría de sus funciones y por ello es posible extrapolar estos conocimientos a más gamas de esta tecnología, por lo que es preferible sobre los microcontroladores AVR.

Finalmente el PIC18F4550 es elegido dado que abre la posibilidad a utilizar directamente la comunicación USB y tiene la posibilidad de utilizar un oscilador de 48 [MHz], que mejorará el rendimiento del programa con respecto al oscilador de 20 [MHz]; además de contener una mayor cantidad de periféricos con respecto al PIC18F2550 de 28 pines (incluyendo el voltaje alimentación y tierra), que de igual manera puede utilizar la comunicación USB.

8.8.2 Elección del Sistema Lúdico

El sistema lúdico particularmente no tiene problemas en la diversificación de sus elementos, su versatilidad está fundamentada en la cantidad de señales de entrada que se reciben y, por lo tanto, pueden crearse diferentes tipos de juegos que se programaran sobre la interfaz a utilizar, el resultado de algunos desarrollos se presentarán más adelante.

8.8.3 Elección del Sistema Control

Su impacto radica en la cantidad de líneas de código necesarias para el procesamiento, la complejidad para utilizarlo y el resultado en la interacción de los actuadores que se obtiene al implementarlo, sin embargo, con la especificación de la velocidad se puede omitir el primer punto. Si se plantea la necesidad de controlar los movimientos que realicen los actuadores para que tengan un comportamiento sobre-amortiguado con el fin de no generar fuerzas sobre-excedidas u oscilaciones que incomoden al usuario.

Lo ideal es implementar un sistema con complejidad superior a la de un *control On-Off*, por lo tanto se pretende utilizar un *control proporcional*; dependiendo de su efectividad, se avanzará o no en realizar un controlador más completo como el *control PID*.

8.8.4 Elección del sistema de Almacenamiento

La investigación de cómo implementar las tecnologías propuestas para el almacenamiento de información revela diversas necesidades.

Una memoria USB (pen drive) está compuesta por el circuito de la memoria flash y la comunicación USB, para realizar esta comunicación se puede utilizar un integrado que utiliza este protocolo (como el PIC18F4550), sin embargo, la mayoría de los integrados solo pueden actuar como esclavos. Por lo cual no pueden ser escritos por este dispositivo. Un ejemplo de maestro en la comunicación USB es una computadora, con lo que permite la lectura y escritura mediante la comunicación USB; este mismo problema ocurre con la lectura de la memoria SD, que requiere además de un adaptador para actuar de la misma manera que la memoria flash.

Para escribir en un archivo de texto se requiere de un procesador que pueda interactuar con este tipo de archivos. Por lo tanto lo más recomendable es, al igual que el caso anterior, utilizar un software de computadora.

Para realizar la base de datos en internet, se requiere el protocolo de comunicación con la red. Existen por lo tanto dos posibilidades, un circuito que funciona como módulo de comunicación WiFi o realizar usar como medio una computadora. Puesto que el sistema de comunicación que se plantea de un inicio es para enlazar a la interfaz, no se considerará WiFi; esto porque sus características superan las necesidades de distancia o velocidad y a su vez cuenta con precio superior por lo cual se omite esta opción.

Como conclusión el almacenamiento de la información sólo será viable en el caso de utilizar un sistema de interfaz por computadora. Y dada esa situación se permitirá guardar la información en un *archivo de texto* que además cuente con la posibilidad de elegir la ruta donde se creará el archivo.

8.8.5 Sistema de Interfaz

En el estado del arte se pudo observar la aplicación de las tecnologías modernas en la rehabilitación. Varios de los elementos considerados demostraron su comunicación con la interfaz gráfica, ésta permite mayor versatilidad en la creación de entornos virtuales con

respecto a utilizar *luces y sonidos* que limitaría la cantidad de juegos posibles así como no captar completamente la atención del usuario, la interfaz gráfica permitiría mayor cantidad de elementos llamativos e interacciones virtuales con el dispositivo. Por lo que se descarta la opción de una interfaz sencilla con luces y sonidos.

Dada la tendencia de las interfaces actuales, lo mejor es tomar la decisión entre la interfaz gráfica producida por computadora y la que se podría lograr al adaptar una pantalla LCD con comunicación con el microcontrolador. Como se prevé la necesidad de reducir la cantidad de líneas en el procesamiento, así como la conclusión del sistema de almacenamiento que preferiblemente se requiere una computadora, lo más óptimo es que la implementación se realice en una **interfaz gráfica por computadora**, de esta manera se puede aprovechar el procesamiento de la computadora y simplemente aprovechar el sistema de comunicación para un mínimo de información.

8.9 Soluciones propuestas

Una vez que se han reducido los elementos involucrados, los subsistemas restantes, que afectan la configuración solución, permiten una variedad de combinaciones, es por ello que para continuar con la selección del concepto se parte de una carta morfológica reducida (Tabla 8 Carta morfológica reducida para obtener posibles soluciones.) que permite relacionar los subsistemas de una manera más sencilla.

Tabla 8 Carta morfológica reducida para obtener posibles soluciones.

Soporte	Ajuste	Alimentación	Sensado	Actuación	Comunicación
Móvil	Medida estándar	Batería Recargable	Giróscopo+ Acelerómetro	Electro-imán con imanes fijos	Cable Serial
Fijo de mesa	Broches	Cable toma corriente	Sensor de Flexión	Solenoides	Bluetooth
Fijo articulado	Retráctil	Baterías AA	Encoders magnéticos	Piñon-cremallera	Xbee
	Piezas sueltas	Recarga piezoeléctrica	Encoders ópticos	Motores, cables y poleas	Driver USB

De las posibles combinaciones se consideraron varias opciones de configuración de las cuales las más destacadas se presentan a continuación.

8.9.1 Solución 1: Motor DC. Cable con Poleas– Encoder – Estructura fija – Comunicación USB – Regulador toma corriente

El sistema consistiría en una estructura cúbica que sostenga los cables permitiendo un grado de libertad para cada dedo. El usuario coloca la mano sobre un montículo para reposar y cada dedo se posiciona en cada aro. El movimiento de los dedos se realiza libremente, la lectura de la posición se realiza mediante un encoder y la fuerza de retroalimentación ocurre a partir de un motor de corriente directa sobre uno de los puntos de apoyo del cable.

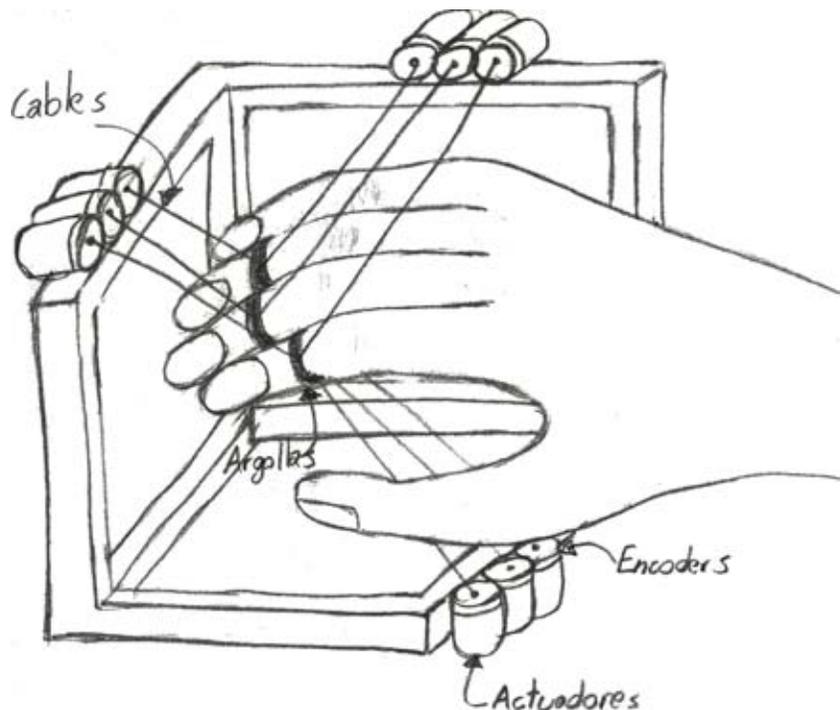


Figura 8.3 Boceto de la solución 1.

Este sistema permitiría un movimiento semi-libre en un espacio tridimensional como consideración para la interfaz y los elementos lúdicos. Sin embargo, este dispositivo requeriría modificaciones para considerar los movimientos de la muñeca. Además el tamaño podría tender a ir más allá de lo establecido en las especificaciones, debido a las dimensiones necesarias para el área de trabajo de la mano y la adición de los componentes de sensado y actuación para la muñeca.

8.9.2 Solución 2: Motor DC, Cable con Poleas – Sensor de flexión/ IMU—
Móvil – Comunicación USB -- Regulador toma corriente

Este sistema consta de un guante con los sensores de flexión colocados en cada uno de los dedos y la IMU para la lectura del movimiento de la muñeca, consta de poleas en la parte inferior que a través de un motor pueden generar fuerza que jale el cable y obligue a realizar el giro a cada dedo, estos cables van conectados a una base donde se encuentran los motores y el resto del circuito. Esta misma base sirve como reposo para el brazo mientras se realizan los ejercicios.

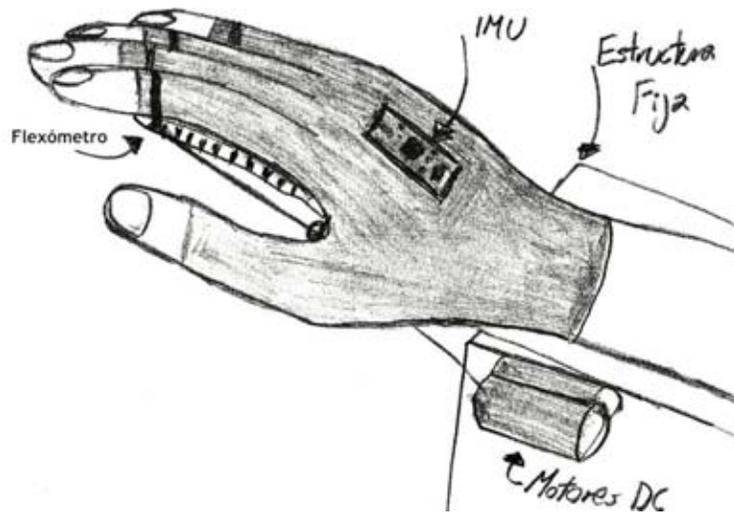


Figura 8.4 Boceto de la solución 2.

Este sistema requeriría un contenedor debajo del brazo para poder ocultar los actuadores además de colocar la mano en una posición adecuada para que los actuadores pudiesen crear el efecto esperado. Los cables tienen la dificultad que deberían adaptarse de manera que el usuario pudiese utilizar la IMU y realizar los giros así como también tiene la complicación de que la mano no puede reposar en caso de necesitar un descanso entre un ejercicio y otro.

8.9.3 Solución 3 Motor DC, Piñón-Cremallera—Encoder/IMU – Móvil – Comunicación Bluetooth – Batería de litio.

El dispositivo en mente está conformado por una estructura que se asemeja al agarre natural de la mano. Esta posición obliga a los dedos a colocarse en cada uno de los botones desplazables que lo integran. De esta manera el usuario realiza presión sobre los botones y puede recibir una fuerza de retroalimentación por medio del mecanismo del motor. Al mismo tiempo puede girar libremente el dispositivo completo para trabajar la muñeca.

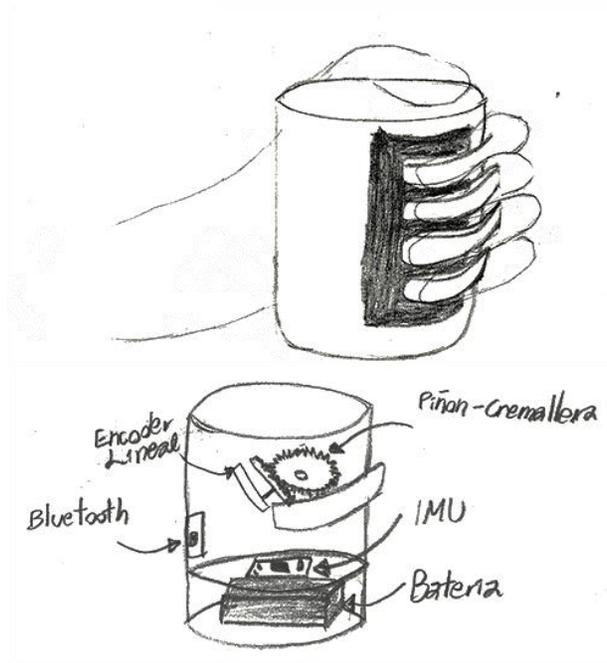


Figura 8.5 Boceto de la solución 3.

Tiene la ventaja de ser inalámbrico, sin embargo el usuario debe cargar todo el peso del dispositivo al mismo tiempo en que está realizando los ejercicios, dado que el usuario podría padecer de artritis reumatoide podría sentir debilidad y fatiga al utilizarlo, también al ser usado en un paciente del síndrome de túnel carpiano podría sentir un exceso de ejercicio, si se considera el peso máximo propuesto para el dispositivo; por lo que se insistiría en cambiar un poco la configuración para ser usado sobre una mesa, además de incluir los movimientos de la muñeca. La implementación de los mecanismos de piñón cremallera en las dimensiones que se requerirían de algún método de manufactura aditiva con una resolución que permitiera crear los piñones a una dimensión capaz de ubicarse al interior de la mano en un agarre cilíndrico (aproximadamente 2 [cm] de diámetro para el piñón) o cambiar el sistema de actuación que se está utilizando.

8.9.4 Solución 4: Motor DC, Piñón-Cremallera—Slider (Potenciómetro) – Estructura Fija – Comunicación USB – Regulador toma corriente.

Esta solución utiliza un mecanismo que conecta un slider, por medio de una junta rotacional, con un dedal, conectado de la misma manera. El dispositivo se coloca sobre la mesa y el usuario coloca la mano sobre el montículo y cada uno de los dedos en su respectivo lugar asignado. El mecanismo logra que los movimientos sean menos rígidos y se acoplen al giro natural de los dedos de la mano.

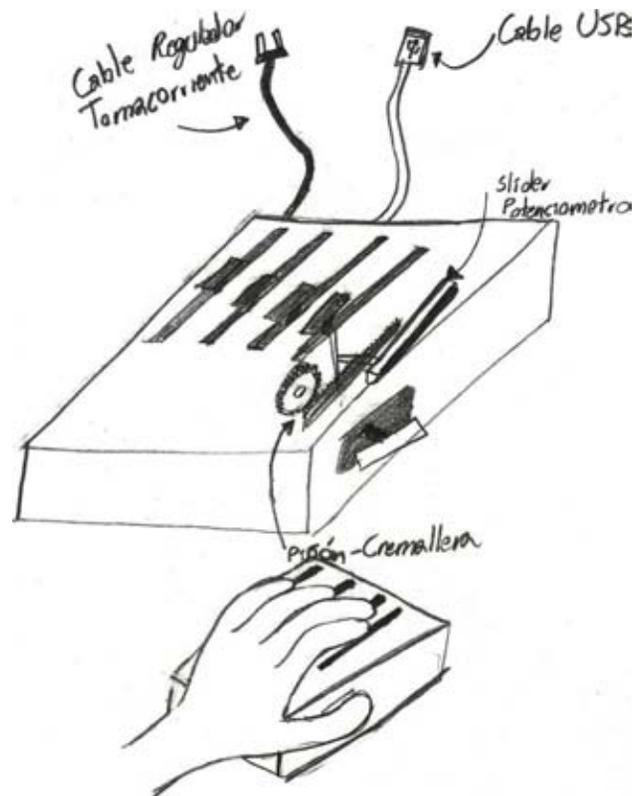


Figura 8.6 Boceto de la solución 4.

Su espacio de trabajo sería amplio y tiene la desventaja que necesita una adaptación para los movimientos de muñeca, este cambio provocaría que sus dimensiones fuesen más grandes y excedan lo propuesto en las especificaciones, pues el interior contiene una serie de mecanismos para cada dedo con su respectivo actuador, así como también la placa electrónica con sus componentes.

8.10 Solución elegida

Para elegir entre las propuestas además de las consideraciones que se han mencionado para cada solución, se hace una matriz de decisión en la que se involucren las características necesarias para cumplir con su cometido, es decir, las especificaciones que se plantearon anteriormente además de incluir consideraciones técnicas.

En la matriz de decisión se elige una de las soluciones como base para calificar con respecto a las otras, por lo cual la solución base tiene calificaciones 0 en todos los aspectos. Cualitativamente “mejor” se contabiliza como 1 y si es una mejora realmente significativa se utiliza 3. En caso de ser peor con respecto a la base se utiliza -1 y si la deficiencia es en gran medida notoria -3. Al contabilizar los puntos otorgados se puede determinar: Si la solución base es mejor que las demás o si alguna de las otras soluciones destaca con respecto a las demás.

Tabla 9 Matriz de decisión entre las soluciones posibles

Necesidades	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4
Tiempo tolerado mínimo	0	0	0	3
Espacio requerido máximo	0	0	3	-1
Dimensiones máximas	0	0	3	-1
Peso o fuerza a vencer máxima	0	1	-1	0
Velocidad de procesamiento mínimo	0	0	0	0
Grados máximos para los ejercicios	0	3	1	1
Cantidad mínima de indicadores	0	0	0	0
Manufactura	0	3	-1	0
Dificultad para modificaciones necesarias	0	0	3	0
Desempeño con las modificaciones	0	1	1	1
Total	0	8	9	3

Por lo anterior se implementará la solución 3, con sus respectivas modificaciones, para poder ser utilizado en el escritorio así como también cambiar el sistema de actuación por cables y poleas. De tal manera la solución elegida, debe su selección por el espacio para ser utilizado, que es de poco espacio, en la posición neutral la mano se encuentra en una posición más natural y por lo tanto será cómoda para el usuario además de que se asemeja a un joystick, elemento representativo de las actividades lúdicas.

8.10.1 Prueba de concepto

A partir del concepto obtenido se realizaron las modificaciones pertinentes, como las observaciones que se mencionaron en el apartado 8.9.4 Solución 3, donde se habla de la adaptación para la muñeca y la posición en la mesa con el fin de que el usuario no tenga que cargar el peso del dispositivo en todo momento, y de esta manera cumplir con el objetivo del proyecto.

En un principio se tienen dos posibilidades para el soporte: que la solución tenga una estructura rígida a modo de esqueleto o una estructura flexible que cubra completamente a los dedos a modo de guante. Una estructura rígida no permite que se adapte a diferentes medidas antropomórficas. Una estructura flexible, en cambio, depende del apoyo que se esté utilizando.

Para demostrar el concepto se inició por fabricar pieza con el material imitación de piel para un dedo, sin embargo se encontraron problemas para realizar la flexión de los dedos, en algunos puntos el material se arruga y no permite el movimiento completo.

A partir de ese problema, se considera que la pieza fuese en secciones y unidas a través de un elástico, éste último generará una fuerza de tensión sobre el dedo, sin embargo su impacto es menor al del actuador, por lo cual se puede considerar que la fuerza que se recibe es constante debido a que no varía la constante de elasticidad.

En el modelo de prueba de concepto se presenta una aproximación de la actuación con ayuda de hilos atravesados sobre el material. Pero al realizar una prueba se puede sentir la tensión ejercida. La fuerza funciona tanto como para permitir el movimiento del dedo y de la misma manera detener el intento de movimiento cuando se debe mantener una posición.

Más adelante se trabajó con el modelo para el resto de los dedos, de esta manera se hacían pruebas con el mismo actuador, con el fin de demostrar que cada dedo es capaz de vencer la fuerza causada por la reducción del motor, dado los resultados, se promueve la idea de que los dedos trabajen juntos para efectuar una mayor fuerza, por lo que el ejercicio independiente de los dedos será postergado a una futura iteración; sin embargo, la actividad física de los dedos no se ve alterada.

Para el sistema de sensado se plantean dos posibilidades la primera es la lectura de la posición del motor y la segunda es directamente la posición del dedo de la mano del usuario. En el primer caso se considera que el motor está conectado por medio de una transmisión flexible al efector del usuario y al ser un único grado de libertad es posible obtener la posición indirectamente ya sea con un potenciómetro o un encoder; en el segundo caso la lectura, al ser directa, podría utilizar un sensor de flexión que permita conocer el valor de la posición flexionada del dedo. Sin embargo el utilizar la posición del motor implicaría mantener una tensión en el hilo en todo momento, lo que provocaría que algunos momentos el dedo no realizara debidamente su movimiento articular.

Después de realizar las pruebas se llegó a la conclusión de que la lectura captada en el sensor de flexión llega a tener mayor exactitud para proporcionar la posición del dedo. Adicional a esta solución se anexa la necesidad de utilizar potenciómetros para realizar un correcto control de la posición de los motores dado que tienen una estabilidad superior a la del sensor de flexión.

Para realizar los movimientos de muñeca es necesario que pueda rotar libremente el dispositivo junto con todos sus elementos, es decir, los sensores, la estructura y los actuadores. Por lo tanto, se propone utilizar una estructura semiesférica que contenga todos los componentes mencionados y de esta manera pueda rotar libremente sin tener que ser levantado por el usuario.

9 Diseño de configuración

A partir del concepto elegido con sus respectivas modificaciones y las pruebas conceptuales se procede a determinar la configuración final que tendrá el modelo funcional y los elementos que se emplearon para su construcción.

9.1 Aspectos generales

La anatomía de la mano tiene algunas características geométricas que se consideran para el diseño del soporte que se utilizará. Así como también para el diseño de los ejercicios que se plantean

El recorrido de la flexión de las falanges es de hasta 90° (como en la falange proximal en la Figura 9.1 Recorrido posible para una persona saludable en las falanges proximales.), sin embargo es a través de uno de los tendones que se hace la flexión de todas las falanges con un solo movimiento. [23]

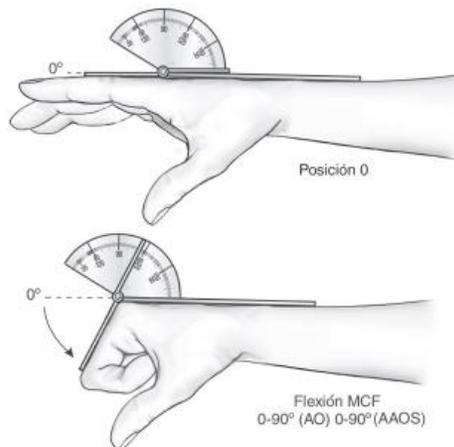


Figura 9.1 Recorrido posible para una persona saludable en las falanges proximales. [23]

Mientras que la muñeca tiene la posibilidad de rotar en la desviación radial aproximadamente 20° y la desviación cubital de aproximadamente 30° , considerando la posición inicial que se muestra en la Figura 9.2. Por otro lado la supinación y pronación hasta 80° de desplazamiento. [23]

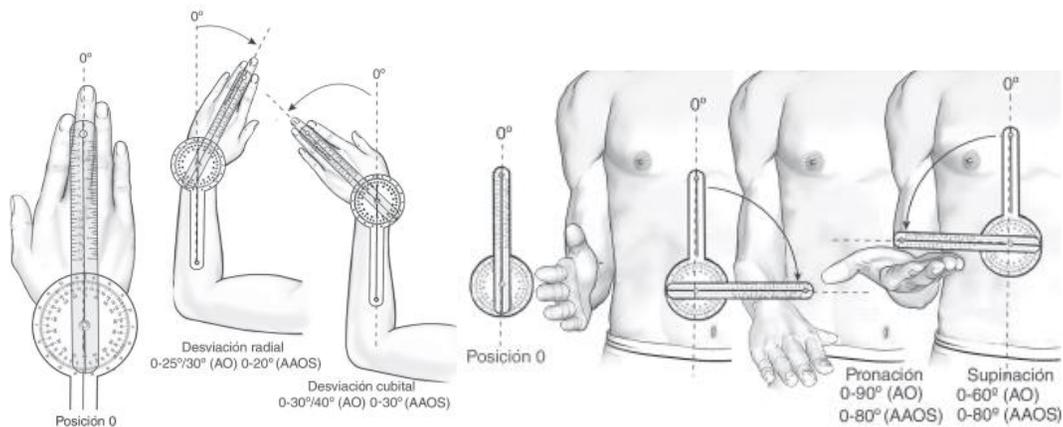


Figura 9.2 Recorrido en la muñeca con respecto a dos diferentes ejes. [23]

9.1.1 Consideraciones físicas del paciente

La artritis reumatoide (AR) es una forma común de artritis que causa inflamación en el revestimiento de las articulaciones, causando calor, reducción en el rango de movimiento, hinchazón y dolor en la articulación. Se puede presentar a cualquier edad, pero es más común en mujeres de mediana edad. Las mujeres resultan afectadas con mayor frecuencia que los hombres. La AR tiende a persistir durante muchos años, suele afectar diferentes articulaciones del cuerpo y puede causar daños en cartílagos, huesos, tendones y ligamentos de las articulaciones.

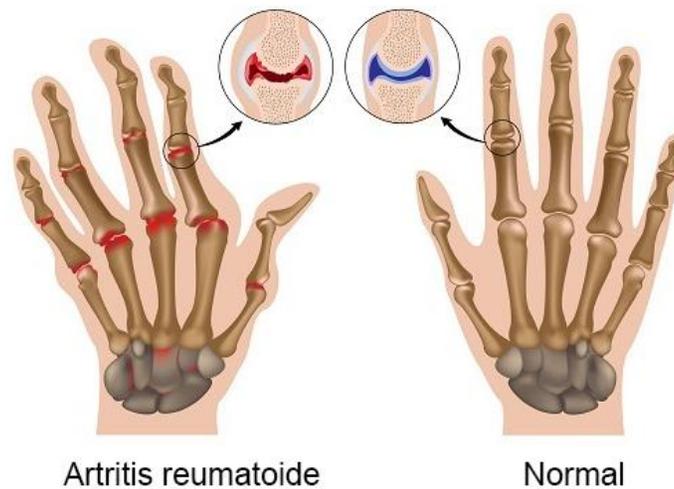


Figura 9.3 Visualización de las articulaciones en la mano en la enfermedad. [71]

Una manera de distinguir la AR de otros tipos de artritis es por el patrón de las articulaciones afectadas, afecta la muñeca y muchas de las articulaciones de la mano pero, por lo general, no afecta las articulaciones que están más próximas a las uñas. Por el contrario, la osteoartritis, un tipo de artritis más común, afecta más a menudo a las articulaciones más próximas a las uñas que otras áreas de la mano.

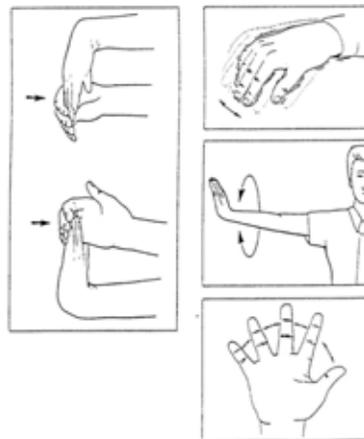


Figura 9.4 Ejercicios de rango para la mano. [72]

Los ejercicios de rango o amplitud de movimiento (Figura 9.4 Ejercicios de rango para la mano.) y los programas indicados por un fisioterapeuta pueden retardar la pérdida de la función articular y ayudar a mantener los músculos fuertes, algunos de ellos son mencionados a continuación.

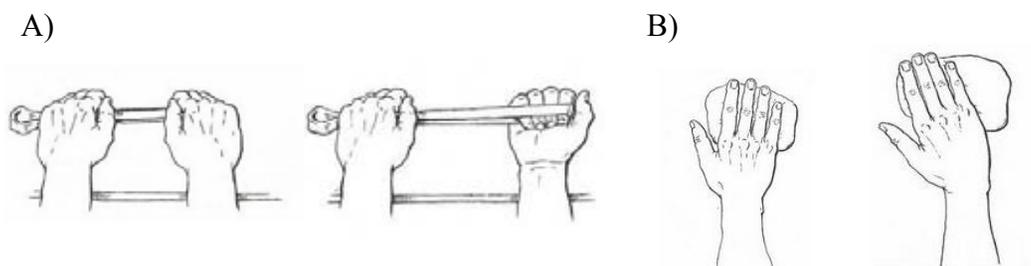


Figura 9.5 En (A) es un ejercicio de supinación con banda elástica y en (B), un ejercicio de desviación radial de la muñeca con plastilina. [73]

El ejercicio de la Figura 9.5 En (A) es un ejercicio de supinación con banda elástica y en (B), un ejercicio de desviación radial de la muñeca con plastilina..A consiste en girar la mano hasta apoyar el dorso sobre la mesa mientras se tensa la banda elástica mientras que en la Figura 9.5 En (A) es un ejercicio de supinación con banda elástica y en (B), un

ejercicio de desviación radial de la muñeca con plastilina..B el ejercicio es desarrollado a partir de desplazar la muñeca y los dedos venciendo la resistencia de la plastilina.

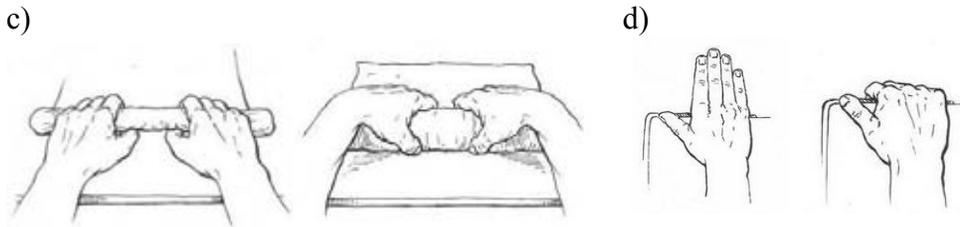


Figura 9.6 En (C) el ejercicio consiste en enrollar una toalla, mientras que en (D) consiste en flexionar las falanges proximales. [73]

El ejercicio de la Figura 9.6 En (C) el ejercicio consiste en enrollar una toalla, mientras que en (D) consiste en flexionar las falanges proximales. radica en tomar una toalla y enrollarla utilizando todos los dedos de ambas manos sin extender el pulgar, en el ejercicio de la Figura 9.6 En (C) el ejercicio consiste en enrollar una toalla, mientras que en (D) consiste en flexionar las falanges proximales. se basa en flexionar la metacarpofalángica de los dedos (II al V) manteniendo las demás articulaciones extendidas.

Se puede observar los ejercicios de la Figura 9.5 En (A) es un ejercicio de supinación con banda elastica y en (B), un ejercicio de desviación radial de la muñeca con plastilina. que corresponden a movimientos de la muñeca, mientras que en la Figura 9.6 forman parte de los movimientos de los dedos, éstos tienen la particularidad de utilizar objetos cotidianos para promover el fortalecimiento de las articulaciones, el dispositivo del proyecto presentado puede favorecer la motricidad de modo que se imitan las posiciones en las actividades mencionadas. [73]

9.2 Sistema de soporte

El ejercicio de las falanges involucra el abrir y cerrar la mano, para reducir el rango de movilidad que alcanzan las falanges se eligió en el concepto que fuese un agarre cilíndrico, este efecto también es útil como punto de apoyo para la realización de ejercicios resistivos. El agarre cilíndrico es logrado gracias a la forma de joystick del que se sostiene el dispositivo, este además promueve una posición más natural y cómoda para la mano. La disposición de los dedos, que al ser doblados, tienen la dirección hacia el hueso pisiforme en la muñeca. La transmisión de la fuerza es lograda gracias a un sistema de hilos y poleas. La polea fue elegida por una medida comercial cuyo tamaño fue el adecuado para el

propósito de colocarse dentro de las estructuras. Y de esta manera los hilos logran llegar a la parte inferior donde se transmite la fuerza de los motores.

El cable (o hilo) utilizado para la transmisión por medio de poleas, fue el hilo cáñamo cuyas características resaltan una alta resistencia a la tracción y al desgaste, además de estar cubierto de cera que favorece al mantenimiento de este en el dispositivo; las fibras con las que está hecho este material son las mismas con las que se fabrican las cuerdas de cáñamo, las cuales son utilizadas en la construcción, deportes, animales y actividades marinas. [74]

Se realizaron dibujos por computadora del joystick y la estructura posterior (Figura 9.7) para visualizar las mediciones que se emplearían para colocar la polea y que pudiese colocarse dentro de los elementos, además de considerar la distancia que existiría entre el joystick y la estructura posterior de manera que hubiese suficiente espacio para colocar la mano.

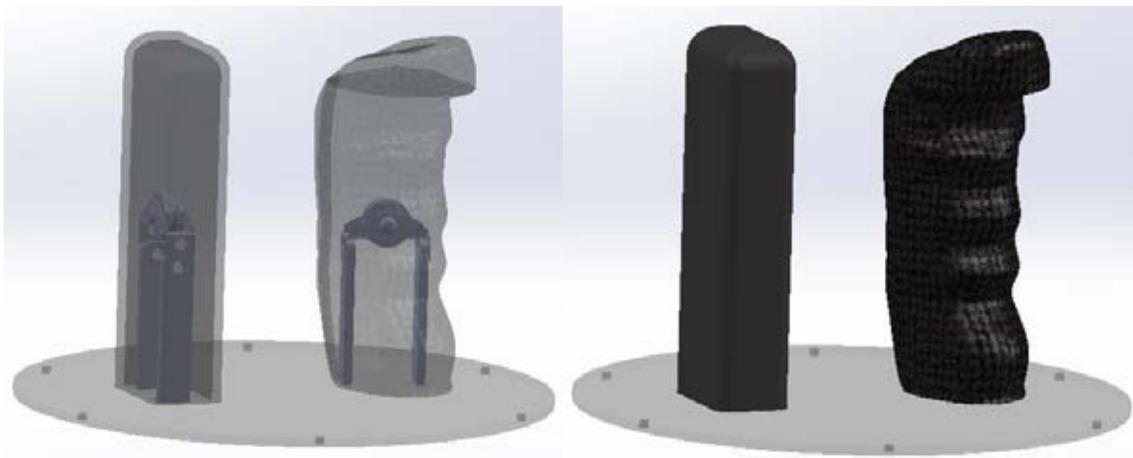


Figura 9.7 Dibujo asistido por computadora del joystick y la estructura posterior.

A partir de lo obtenido de las pruebas conceptuales se concluyó que tendría una estructura tipo joystick y una estructura de soporte para la polea opuesta de la mano. La estructura del joystick fue diseñado con dimensiones genéricas para la mano, de manera que fuese posible el agarre cilíndrico, para comprobar este punto se realizó en primera instancia un molde de plastilina regular para visualizar la forma y acabado que tendría, además de ser probado con diferentes personas; el material utilizado para realizarlo fue espuma de poliuretano, pues tiene unas características semi-rígidas que permiten mantener la forma que se necesite incluso después de una perforación, además de tener una textura suave al ejercer presión en el agarre cilíndrico.



Figura 9.8 Muestra del desarrollo del molde para trabajar la espuma de poliuretano.

Para lograr esta estructura se realizó un modelo a base de plastilina epóxica que fue dimensionado a partir del primer modelo de plastilina regular mencionado anteriormente, a partir del cual se realizó un molde de vaciado en yeso, como se muestra en la Figura 9.8.

La manera de utilizar la espuma de poliuretano es a partir de dos componentes, el componente A y B, en proporción de 1:3. El resultado que se obtiene es una estructura de espuma con textura suave, ésta es perforada para colocar en su interior la polea y es recubierta con imitación de piel, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 9.9. [75]



Figura 9.9 Joystick recubierto con la imitación de piel y la polea contenida en su interior.

Mientras tanto la estructura posterior, sostiene los puntos de cruce a una distancia cercana a las falanges distales, lo que permite la correcta transmisión de la fuerza hacia los dedos. Para asegurar que ésta parte de la estructura fuese rígida se utilizó aluminio comprimido con corta distancia para evitar deformaciones durante su uso. A modo de prototipo se utilizó plastilina epóxica para formar la estructura que se pretende obtener.



Figura 9.10 Estructura de soporte posterior con los hilos colocados.

Además la base donde se sostuviesen el joystick y la estructura tipo torre debía tener una geometría esférica permitiendo moverse libremente dentro de los márgenes de ángulos como se muestra en la figura, esto con la finalidad de que el usuario no tuviese que cargar la estructura con su brazo, de esta forma el brazo puede reposar y promover el movimiento.

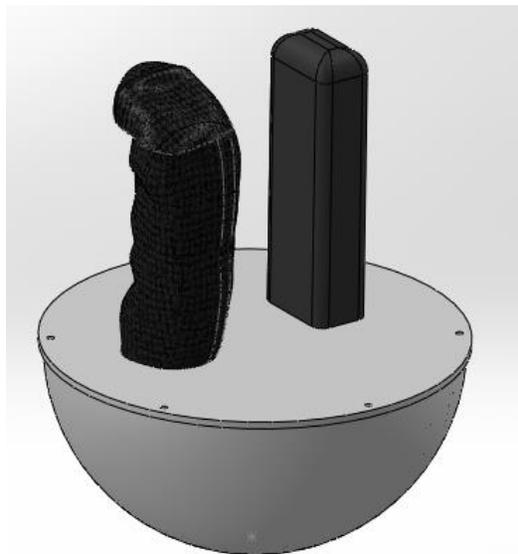
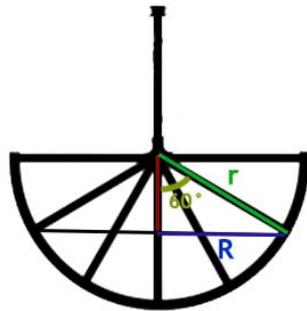


Figura 9.11 CAD de la estructura compuesta por el joystick, la estructura posterior y la base esférica.

Para lograr las limitaciones angulares se realizó una base que permitiera los movimientos de rotación de la semiesfera, esto a partir de una base plana con una abertura circular; a partir de las medidas de la esfera y los límites establecidos se realizan los cálculos pertinentes.



$$\text{Sen } \theta = \frac{\text{c.o.}}{\text{hip}}$$

$$R = r * \text{Sen } \theta$$

$$r = 7.5 \text{ [cm]}$$

$$R = 7.5 * \text{Sen}(60)$$

$$R = 6.49 \text{ [cm]}$$

Figura 9.12 Cálculos y visualización que se consideraron para la construcción de la base.

La consideración se realizó a 30° permitiendo que el usuario tuviese la oportunidad de realizar sus movimientos ajustados, excepto en el movimiento de flexión y extensión donde puede moverse libremente, sin embargo, requiere un esfuerzo superior.

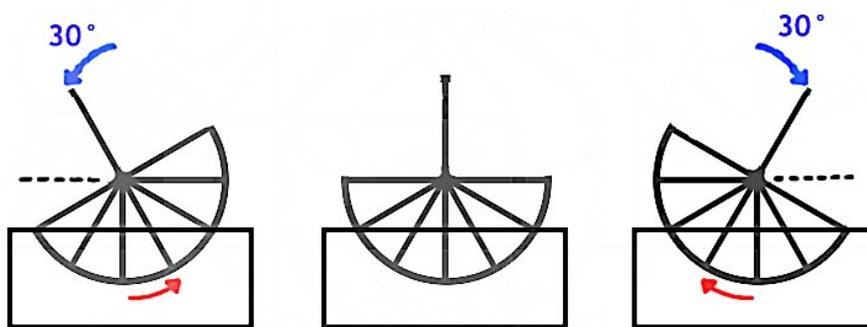


Figura 9.13 Visualización del límite angular de la base.

Con lo anterior se realizan los cálculos pertinentes para crear una base que pueda sostener al dispositivo y al peso de cargar la mano. Se considera que por la altura que obtuvo por la semiesfera empleada se requiere de una base para recargar el brazo de manera que los ejercicios no provoquen la necesidad de mover el brazo más allá de la posición de reposo.



Figura 9.14 Base para el elemento semiesférico en CAD.

9.3 Sistema de ajuste

El sistema es compatible a diferentes medidas de mano a partir de un guante genérico comercial, para ajustarse con las falanges cuenta con una serie de accesorios creados para adaptarse a los dedos, esto permite que el usuario logre conectarse al juego de hilos y poleas a través de los accesorios.



Figura 9.15 Guante comercial utilizado junto con los accesorios creados para adaptarse a los dedos.

Los accesorios fueron confeccionados a partir un material de imitación de piel, similar al joystick, dado que sus propiedades permiten que, con varios puntos de apoyo, no se rompa o deforme de una manera que afecte el desempeño del dispositivo. Con la implementación del velcro se puede variar entre la conexión directa con los hilos y un nivel intermedio como el mostrado en la Figura 9.16 además de ajustar a diferentes medidas.



Figura 9.16 Colocación de los accesorios con el guante puesto.

El accesorio que se encuentra montado sobre el dispositivo realiza su conexión con los hilos a través de argollas metálicas que permiten tener un acceso a los hilos (Figura 9.17) en caso de que necesiten cambiar su posición o ser remplazados.



Figura 9.17 Accesorios conectados al sistema de actuación.

9.4 Sistema de Actuación

La transmisión de las fuerzas hacia el usuario se realizan a través de cables y poleas, dicha fuerza proviene de motores colocados dentro de la estructura como se muestra en la figura.

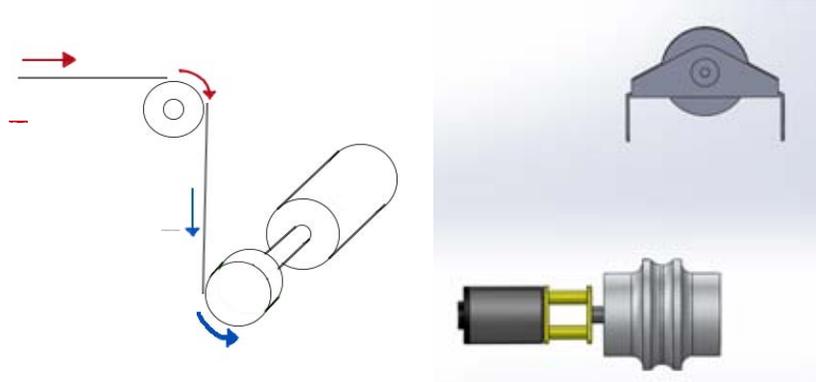


Figura 9.18 Visualización del sistema de transmisión de motor con poleas.

Las fuerzas que llegan a la mano son directamente la fuerza con la que jala el motor cuando se considera su brazo de palanca.

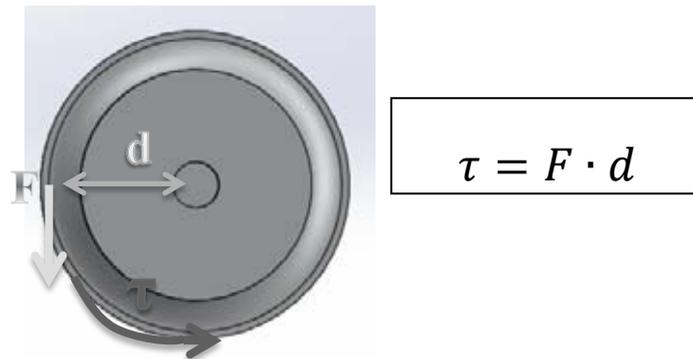


Figura 9.19 Análisis de fuerzas involucradas sobre la polea.

La fuerza del motor se eligió a partir de la información hallada en el estado del arte sobre el Finger Grip® donde varía el color dependiendo la cantidad de fuerza resistiva que se tiene que vencer, como se observó en el capítulo 3 Estado del Arte. Para el caso particular del proyecto se eligió el nivel mínimo por lo cual se requieren 3 [Kgf] como una medida aproximada. Los motores que se utilizarán serán los micromotorreductores metálicos de la marca Pololu®, sus especificaciones se muestran en la Figura 9.20. [76]



Especificación	Valor
Reducción	210:1
Voltaje	3 - 9[V]
Corriente	1600[mA]
Par	3.6 [kg cm]
Velocidad	140 [rpm]

Los datos son considerados a 6[V].

Figura 9.20 Motorreductor metálico de la marca Pololu®. [76]

Para la implementación de este motor de corriente directa se requiere de algún driver para la regulación de su velocidad así como el sentido de su giro, entre los más populares están L293D, L298, y la construcción de un puente H a partir de transistores MOSFET. Para su elección se consideran características como el consumo de corriente que en este caso supera los 0.5 [A] a rotor bloqueado por lo cual el L293D queda descartado dado que se requiere el control de dos motores simultáneamente.

Dadas las características del voltaje que se utilizará y la corriente que podría demandar al ser sujetas a rotor bloqueado se decidió implementar el integrado L298. Las características destacadas del L298 son el doble puente completo que tiene, el voltaje que puede manejar de hasta 46 [V] y la corriente de salida soportada de hasta 4 [A] considerando 2 [A] para cada puente, con lo que se descarta la necesidad de construir un puente H a partir de transistores. [77]

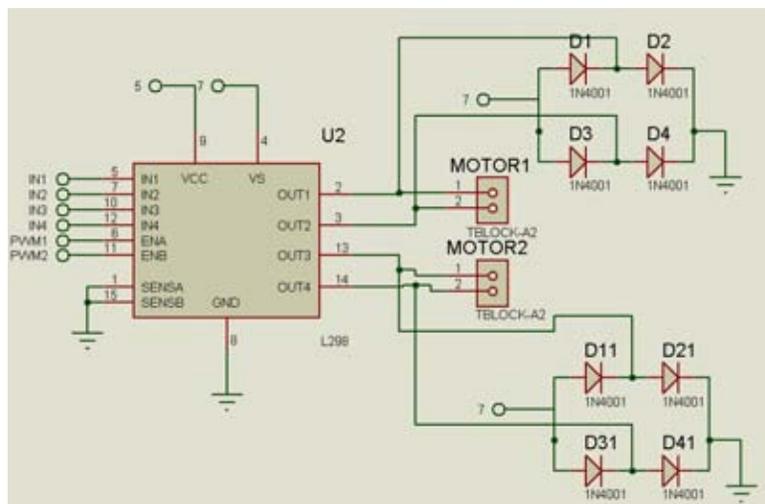


Figura 9.21 Circuito del driver para controlar dos motores DC.

Para controlar la variación de velocidad se implementa el principio del PWM (Modulación por ancho de pulso). Con el fin de evitar ruidos en el motor, se requiere que la frecuencia de trabajo este fuera del rango audible del ser humano (20 [Hz] a 20 000 [Hz]), en el caso de ser menor a los 20 [Hz] los pulsos son demasiado pausados de modo que el motor se mueve de forma incorrecta; entonces lo más factible es trabajar con una frecuencia de aproximadamente 20 [KHz] para lo cual se realiza el cálculo para el PIC18F4550, se puede observar a detalle en el Anexo IV Cálculo del PWM en el PIC. [78]

9.5 Sistema de Control

La posición del motor se regula con ayuda de un potenciómetro acoplado a su eje, se utilizó el potenciómetro rotatorio de precisión (Figura 9.22), esto permite un rango de movilidad angular más amplio.



Figura 9.22 Potenciómetro de precisión de la marca Suntan® [79]

Como parte del acoplamiento entre el motor y el potenciómetro se realizó una pequeña estructura para sostener dichos elementos y colocarlos dentro del sistema completo, se muestra su estado final en la Figura 9.23.

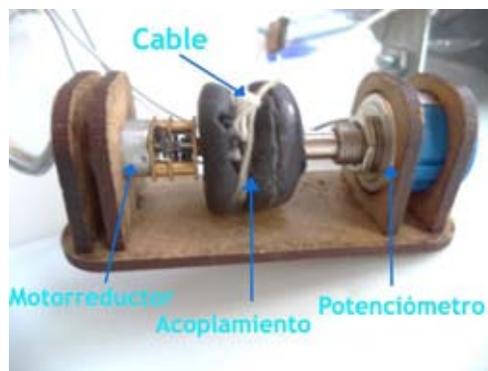


Figura 9.23 Estructura para el motor y el potenciómetro acoplados.

Para mantener la posición adecuada de este sistema dentro de la semiesfera se diseñó una estructura de costillas que aprovechara el espacio, estuviese adaptado a la forma y que todos los componentes mantuvieran la posición al estar cerrado y en funcionamiento (Figura 9.24 Estructura de las costillas con los motores acomodados en CAD.). De esta manera se cumple con el propósito de que el dispositivo pueda rotar libremente junto con todos los componentes contenidos.

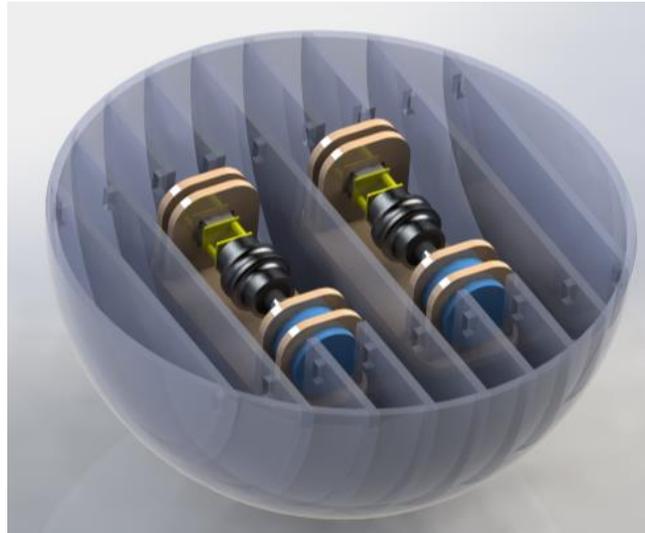


Figura 9.24 Estructura de las costillas con los motores acomodados en CAD.

Existen diversos métodos para obtener los valores de un controlador PID, como los métodos de Ziegler-Nichols, que a través de cálculos se obtiene una aproximación de los valores que dan la respuesta deseada, sin embargo, el comportamiento de los motores a usar no requieren un análisis tan profundo en el desarrollo del controlador. Para obtener los valores de las constantes de proporción se implementó una aproximación a partir de las reglas heurísticas en el diseño de controles PID; las cuales permiten, a partir de un método iterativo, obtener los valores cercanos para una respuesta con las características deseadas, sin necesidad de conocer el comportamiento de la planta. [80]

Tabla 10 Reglas heurísticas para el diseño de un control PID [81]

Constantes	Tiempo de subida	Sobrepaso	Tiempo de asentamiento	Error	Estabilidad
Kp	Disminuye	Aumenta	Cambio pequeño	Disminuye	Reduce
Ki	Disminuye	Aumenta	Incrementa	Elimina	Disminuye
Kd	Cambio Pequeño	Disminuye	Disminuye	No cambia	Aumenta

Para realizar el método por reglas heurísticas sigue el siguiente procedimiento:

1. Primero se coloca el tiempo integral a un valor máximo y el tiempo derivativo en un valor mínimo. Con una ganancia pequeña se va aumentando hasta obtener las características de respuesta deseada.
2. El siguiente paso consiste en reducir el tiempo integral hasta anular el error en estado estacionario, ignorando la oscilación. Si es posible se disminuye ligeramente la ganancia, y se repite hasta obtener las características deseadas.
3. Después se busca mantener la ganancia y el tiempo integral obtenidos anteriormente, mientras se aumenta el tiempo derivativo hasta obtener características similares pero con una respuesta más rápida, a fin de acercarse a los valores deseados. De ser necesario se puede aumentar ligeramente la ganancia.

9.6 Sistema de Sensores

El sistema de sensado involucra la medición de los grados de libertad especificados. Uno para todas las falanges y dos para la muñeca, el primero fue resuelto con un sensor de flexión y el resto se implementó una IMU para su solución.

9.6.1 Sensor de flexión

En el caso de las falanges se considera la flexión de los dedos puesto que las falanges tienden a desplazarse angularmente en cada articulación, sin embargo con un grado de libertad se puede realizar la flexión en gran medida de las falanges, que es medida a través de un sensor de flexión de una medida estandarizada (Figura 9.25).



Figura 9.25 Sensor de flexión de la marca Sparkfun® modelo 2.2". [82]

El sensor de flexión que se utilizará es el modelo Flex-Sensor de la marca Sparkfun® de 2 [in]. Este tiene una variación de 30 [K Ω] a 70[K Ω].

Para realizar la medición de su valor se implementa un divisor de voltaje con el fin de que sea un valor medible a través de un convertidor analógico digital.

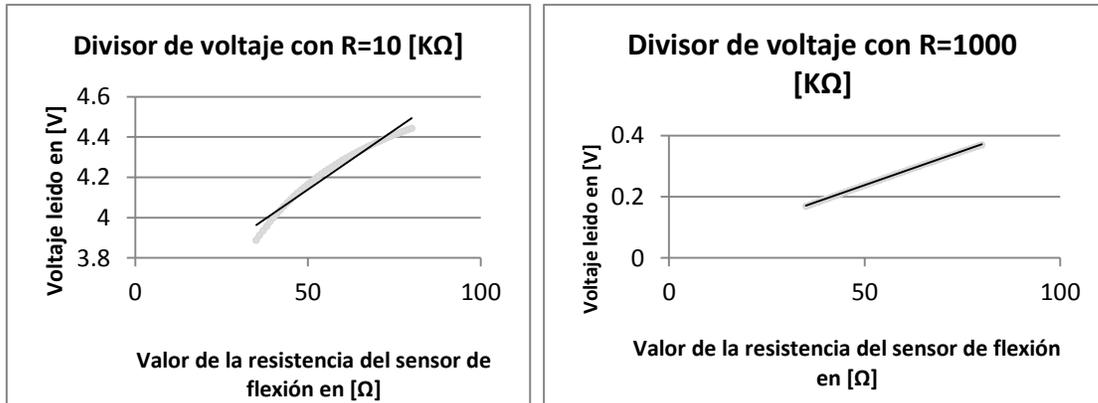


Figura 9.26 Datos obtenidos de un cálculo aproximado de la simulación de un divisor de voltaje.

El valor de la resistencia que completa el divisor de voltaje se elige a partir de su comportamiento esperado según las gráficas que se muestran. Donde se concluye que si el valor de la resistencia es mayor a 100 [KΩ] tendrá un comportamiento más lineal. Sin embargo se reduce su campo de operación, para mejorar este aspecto se implementa un arreglo de amplificación de voltaje por medio de un amplificador operacional. En el caso de este proyecto se eligió el LM324 por las características de operación: no requiere de una fuente simétrica para funcionar lo que reduce el diseño de la etapa de potencia y puede manejar un voltaje de hasta 32 [V]. Su circuito empleado se muestra en la Figura 9.27.

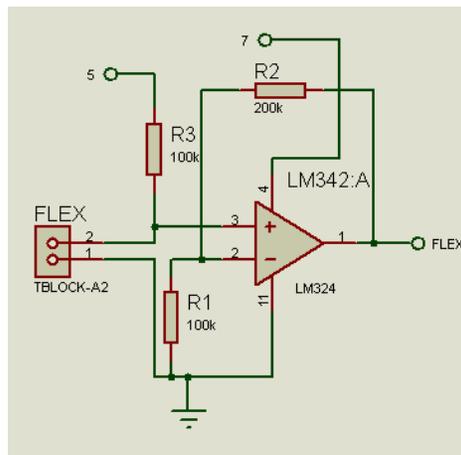


Figura 9.27 Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor de flexión.

9.6.2 IMU

Una IMU (por sus siglas en inglés: Inertial Measure Unit) o *unidad de medida inercial* es un dispositivo que combina un acelerómetro y un giroscopio y en ocasiones otros sensores. Estos sensores por separado tienen propiedades.

En el proyecto presente se implementó a modo de demostración el producto GY-80 (Figura 9.28) de 10 grados de libertad; debido a que contiene acelerómetro, giroscopio, magnetómetro; sin embargo, sólo son implementados el acelerómetro ADXL345 y el giroscopio L3G4200D, dado que son los componentes que permiten las mediciones angulares para la inclinación. El resto de los grados de libertad (que usa el magnetómetro) pueden ser implementados, en una futura iteración, para obtener la orientación del dispositivo de manera que complemente la información obtenida por los sensores propuestos inicialmente con un principio de funcionamiento diferente al planteado a continuación. [83]

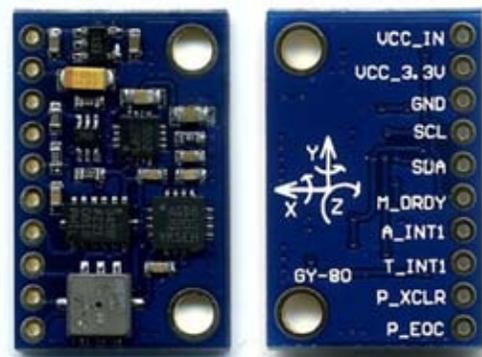
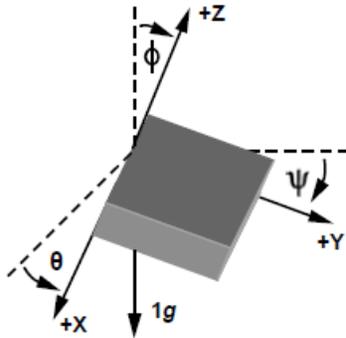


Figura 9.28 Placa electrónica GY-80. [84]

El principio de funcionamiento de un acelerómetro consiste en realizar medición de fuerzas de aceleración, a sea estática o dinámica, las fuerzas estáticas incluyen la gravedad mientras que las fuerzas dinámicas incluyen las fuerzas que se generan a partir de movimientos o vibraciones. Con el componente de la gravedad se puede obtener la variación de ángulo con respecto a los ejes X, Y y Z. Los ángulos θ , correspondiente al eje X; ψ , correspondiente al eje Y; además de φ , correspondiente al eje Z son calculados a través de las siguientes fórmulas a partir de las componentes de la gravedad en los ejes X (A_x), Y (A_y) y Z (A_z). [85]

Por otro lado el giroscopio mide las velocidades angulares $\dot{\theta}$, por lo que a partir de una integral del valor de se puede obtener el valor de las posiciones angulares θ .

$$\theta = \int \dot{\theta} dt$$



$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right)$$

Figura 9.29 Ángulos del acelerómetro. [77]

El acelerómetro como medidor de inclinación tiene problemas en el ruido que afecta a los ángulos y las componentes de fuerzas que se agregan a las mediciones, por lo tanto la señal es inestable. Por otro lado el giroscopio tiene la complicación de que al obtener los valores de las posiciones angulares a través de una integral, el valor del ruido puede afectar a esta operación, lo que provoca que la medida obtenida tenga deriva y pierda la referencia con la que comenzó.

Debido a lo anterior se recomienda utilizar los valores tanto del acelerómetro como del giroscopio en combinación, por lo tanto se puede implementar un filtro. Existen diferentes formas de resolverlo uno de ellos es el filtro de Kallman que a través de una matriz de observadores permite emular al sistema a partir de las variables obtenidas, sin embargo, el nivel de complejidad para implementarlo involucra un procesamiento de mayor cantidad de líneas de código, debido a las operaciones matriciales que involucra, por lo tanto es preferible utilizar un método más sencillo. Para los fines de este proyecto se decidió implementar un *filtro complementario*, que involucra la combinación de los valores del acelerómetro con los del giroscopio. El valor del ángulo θ en alguno de los ejes es calculado a partir de un porcentaje de la variación de la posición obtenida del giroscopio $d\theta_{Gyr}$ y agregando un porcentaje el valor del ángulo obtenido por el acelerómetro θ_{Acc} en cada iteración. [86]

$$\theta = 0.98 * (\theta + d\theta_{Gyr}) + 0.02 * \theta_{Acc}$$

A partir de esto se puede pasar a una ecuación en valores discretos para implementarse en un microcontrolador. Sin embargo, por los ángulos que se pueden obtener el acelerómetro únicamente se pueden obtener pitch, roll, el ángulo yaw no es posible de obtener con el acelerómetro, por lo tanto la información del giroscopio y acelerómetro solo pueden aprovechar dos de sus ángulos, por lo tanto debido a la posición de la mano en el dispositivo se valdrá de los movimientos de pronación y supinación, y los movimientos de abducción y aducción; mientras que el ángulo de *yaw* deberá ser reservado para una futura iteración, que involucre cambiar la posición de la IMU, incluir al magnetómetro (para obtener la orientación) y replantear la ecuación, o añadir un sensor adicional.

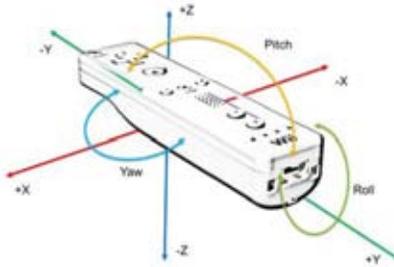


Figura 9.30 Ejemplificación de los ángulos Pitch, Roll y Yaw en un sistema coordinado. [87]

9.7 Sistema de Procesamiento

El procesamiento ocurre dentro de la programación del PIC18F4550, se emplean algunas de las características que éste contiene entre los que se destacan los módulos de temporizador (Timer), CCP en modo de PWM y algunos canales de ADC así como el protocolo de comunicación I2C; además de la comunicación vía USB que permitirá el vínculo del dispositivo con la interfaz por computadora, este apartado será tratado más adelante en la descripción del sistema de comunicación.

El diagrama de flujo de la Figura 2.1 muestra el desarrollo que tiene el programa al ser encendido y conectado a la computadora. Se inicia activando todas las características indispensables para que funcione y posteriormente al conectarse al puerto serial de la computadora se realiza la recopilación de datos de la IMU y los cálculos para la calibración de esta misma. La selección de la información que se obtendrá del microcontrolador es regulado por la comunicación serial a través del envío y recepción de caracteres.

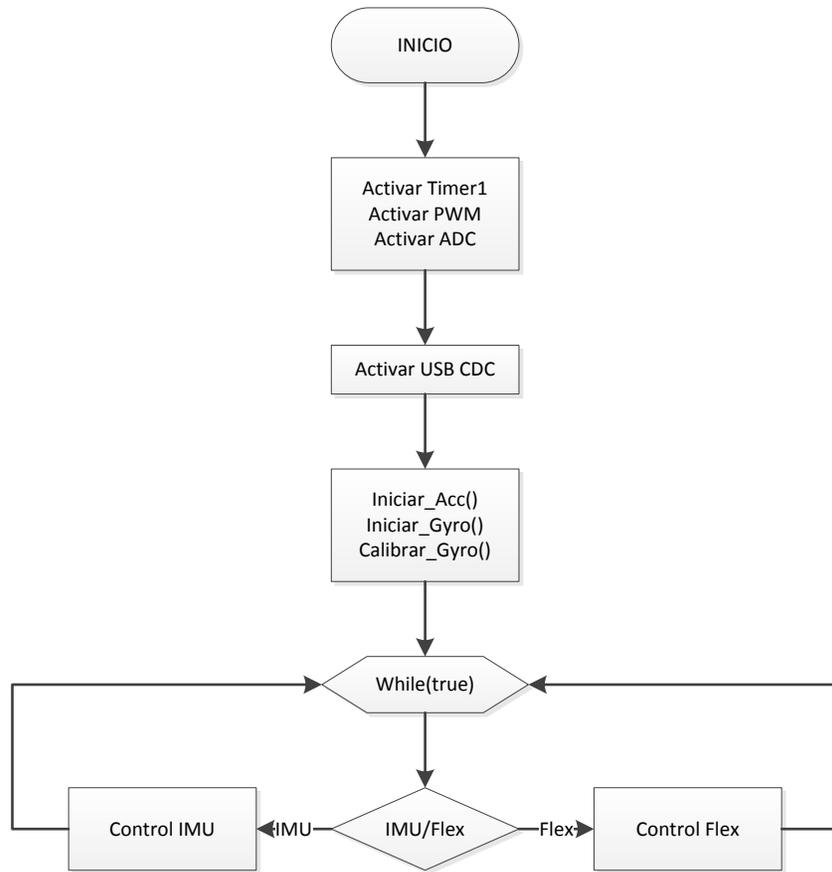


Figura 9.31 Diagrama de flujo principal para el procesamiento.

Además del diagrama principal en la Figura 9.31 se puede observar las operaciones necesarias para la obtención de los datos correspondientes al sensor deseado. Los métodos se pueden consultar en el Anexo V que contiene el código fuente utilizado para programar al microcontrolador.

Se puede destacar en la operación de la IMU que primero se obtienen los datos a través de la comunicación I2C, estos son obtenidos en dos palabras de datos: los más significativos y los menos significativos, esto debido a la resolución obtenida; todo esto se puede observar en el datasheet de los componentes.

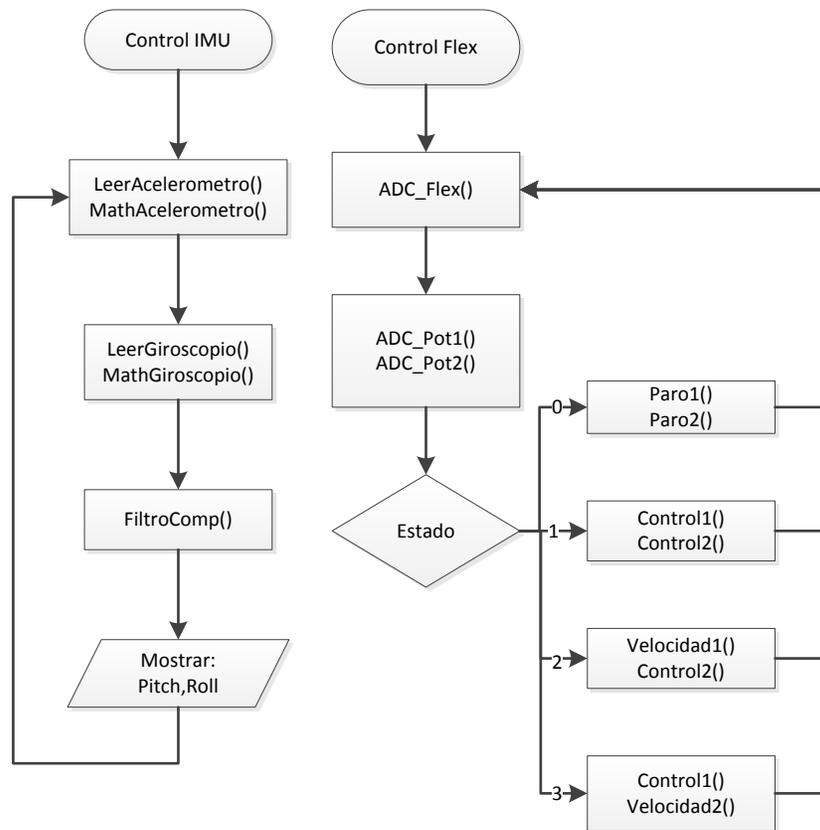


Figura 9.32 Diagramas de flujo de los submétodos incluidos para el sensor de flexión y la IMU.

Para el caso de los motores se tienen diferentes comportamientos, los cuales se describen a continuación:

1. Ambos motores se encuentran apagados para poder regular y preparar al usuario antes de comenzar la actividad correspondiente a este sistema, este es el estado inicial que se tiene al utilizar el sensor de flexión como medida de seguridad.
2. Los motores realizan su control de posición que se adaptan a la flexión que sufre el sensor promoviendo que los hilos sean enrollados pero que permita la movilidad de las articulaciones.
3. Los dos casos que involucran al método “velocidad” implica que uno de los motores continua con su control de posición mientras que el otro es obligado a utilizar una velocidad establecida previamente para obtener la fuerza deseada en la interacción con el usuario.

9.8 Sistema de Comunicación

El sistema de comunicación permite la transmisión bilateral de información entre el sistema de procesamiento del dispositivo y la interfaz por computadora, a través del protocolo USB integrado en el PIC18F4550, un adaptador hembra USB tipo B, y su cable correspondiente.



Figura 9.33 Visualización del conector y cable de USB tipo B. [75]

Para la composición de los elementos USB se adaptó a la base una ranura que tuviese la forma del adaptador, en su interior se utilizó una placa fenólica perforada como soporte para las conexiones con el sistema.



Figura 9.34 Conexión del cable USB en la estructura base del dispositivo.

Con los sistemas mencionados anteriormente se puede completar la comunicación entre todos los componentes electrónicos en una tarjeta de circuito impreso o por sus siglas en inglés PCB (Printed Circuit Board). En la Figura 9.35 se muestra el desarrollo obtenido en un software de CAD de tarea dedicada para circuitos. Se muestra el microcontrolador con sus componentes de circuito mínimo (conexiones a tierra y alimentación, el cristal como oscilador externo y un botón de reset), la comunicación con el driver de los motores que a su vez se comunica con la alimentación del sistema junto con el regulador de voltaje para los niveles lógicos. La posición para los potenciómetros, los motores y las conexiones para el sensor de flexión con su respectivo amplificador operacional así como también la comunicación I2C para la IMU junto con la comunicación USB para la computadora.

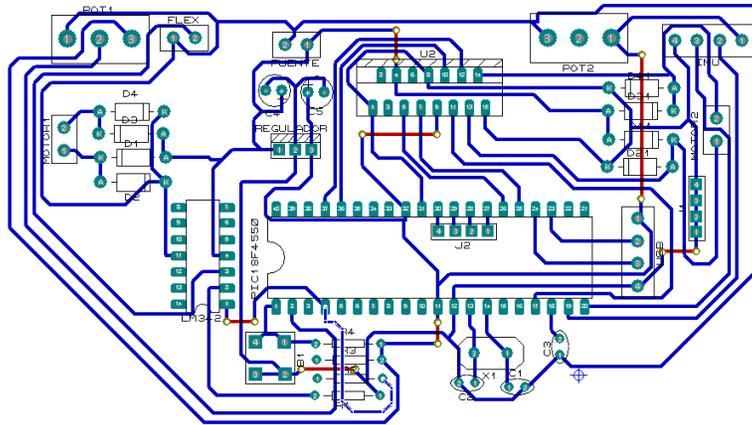


Figura 9.35 Diseño del circuito impreso implementado.

El circuito fue diseñado con las medidas adecuadas para ser colocado dentro de la semiesfera previamente diseñada, con el fin de que el usuario tuviese la menor cantidad de contacto con los circuitos para evitar desconexiones. Para ver más a detalle el circuito puede ser consultado el Anexo II y Anexo III correspondientes a las conexiones y al circuito impreso ampliado.

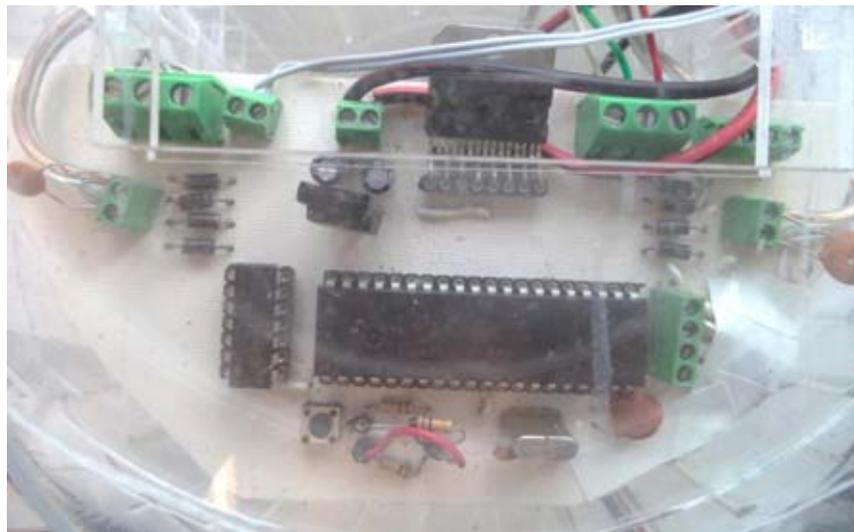


Figura 9.36 Circuito dentro de la estructura de esqueleto conectado.

Con la finalidad de que el circuito pudiese ser conectado a la comunicación USB así como a la alimentación, se realizó una perforación en la parte inferior de la semiesfera de manera que los cables permitieran libertad de movimiento y al mismo tiempo mantuviera la conexión con los componentes electrónicos.

9.9 Sistema de Alimentación

El microcontrolador funciona con un voltaje de 5 [v]. Así también dentro de este las lecturas del convertidor analógico-digital se realizan con la referencia de 5 [v]. El amplificador operacional maneja el valor de 9 [v] como se mencionó en el apartado del sistema de sensado. Los motores requieren de un voltaje superior para alcanzar la velocidad y el par necesario. En las pruebas realizadas se concretó que el valor del voltaje de alimentación sería 9 [v]. Cada motor requiere una corriente máxima de 0.8 [A].

Por lo tanto la alimentación requerida es de aproximadamente 7.5 [V] y 2 [A], para ello se busca un regulador comercial a toma corriente que entregue un valor superior o similar. Para el voltaje de 5 [V] se utiliza un regulador de voltaje LM7805. [88]

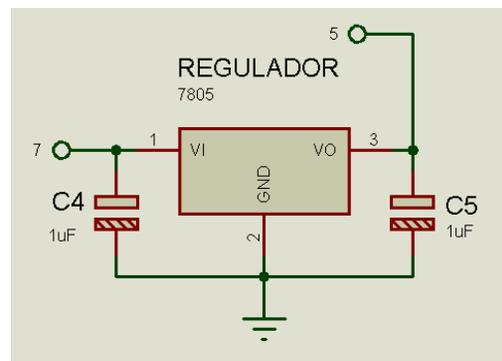


Figura 9.37 Circuito de LM7805.

Dado que la alimentación por un regulador comercial podría dar voltajes que varíen dependiendo el modelo y la carga que se conecte, es necesario implementar un regulador de voltaje que limite el voltaje para polarizar a los motores pues el control fue diseñado para actuar a un valor particular de velocidad y, por lo tanto, de nivel de voltaje. Es por ello que se aplicó un regulador de voltaje a 7.5 [V] y 2 [A].

9.10 Interfaz gráfica

La interfaz fue desarrollada con la visualización de que podrá ser utilizada por diferentes personas y se permitirá el registro y manejo de varios nombres de usuario así como la información que se guarda de cada uno de estos. La interfaz actualmente cuenta con dos juegos en desarrollo que pueden ser seleccionados por el usuario, además a medida que se utilice por un periodo de tiempo, el registro comenzará a crear una gráfica con el progreso que se ha tenido para que quien lo esté utilizando sea consciente de su avance.

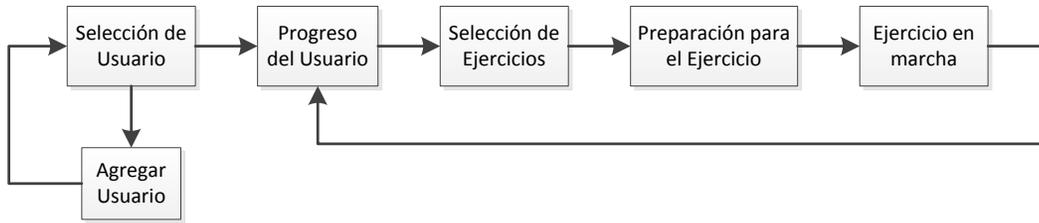


Figura 9.38 Diagrama del comportamiento que tiene la interfaz gráfica.

Los juegos en desarrollo fueron pensados para que tuviesen características como sencillez que permite que el paciente no se frustre y pierda el interés en realizar los ejercicios, así como también se agregó una puntuación para que el usuario tenga la intención de superarse al tratar de obtener una marca superior, dado que es uno de los elementos que aportan funciones lúdicas al sistema como los que ya han sido expresados en el capítulo 2.4.4 Psicología de los juegos de video.

1. La persona selecciona su nombre de usuario para ingresar al sistema si no cuenta con un nombre registrado, entra a una ventana para administrar y agregarlo.

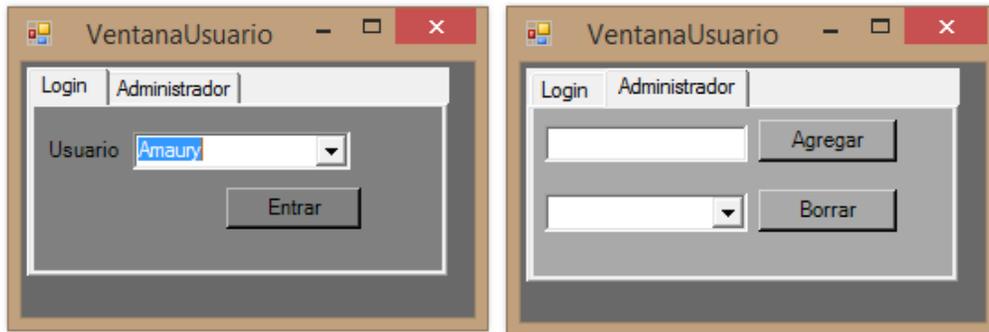


Figura 9.39 Se visualiza las ventanas de inicio de la interfaz.

2. El usuario entra a la ventana de contenido donde puede observar su nombre, la fecha del día, en esta ventana además se puede observar el progreso que ha tenido el usuario comparando los puntajes obtenidos con las sesiones anteriores; Así como también la selección de los juegos disponibles.



Figura 9.40 Ejemplo de la visualización de la Ventana de Usuario.

A partir de la ventana mostrada en la Figura 9.40 se puede proceder a las experiencias interactivas que se desarrollaron para este proyecto.

9.10.1 Sistema de Almacenamiento

La interfaz permite realizar una lista de usuarios que se pueden agregar y ser guardados al momento de cerrar la aplicación. Adicional a la función de registro, guarda la información de cada sesión de un respectivo usuario registrado, estos datos son recopilados por la interfaz y contienen: Fecha del día en que se realizó el ejercicio, puntaje obtenido, posiciones donde falló. Los datos son guardados en un archivo de texto que permite futuras revisiones tanto para el paciente como para el terapeuta que esté a cargo, de manera que se tiene en consideración el recorrido ejecutable de las articulaciones y las posiciones donde el paciente todavía tiene dificultad de movilidad, además de la relación de progreso y tiempo que se tiene.

El formato es el siguiente: DD/MM/AA, Puntos, 00000 (Posiciones, este último depende de las posiciones utilizadas).

9.10.2 Desarrollo de juegos de video

Los juegos fueron desarrollados en dos diferentes interfaces de programación, para uno de ellos se utilizó la SDK de desarrollo de XNA 4.0 para Visual Studio. Mientras que el otro fue creado por el software Unity3D. A pesar de esto, la programación de los juegos tiene tres elementos principales:

- **Load:** Este método se realiza una sola vez en el programa. Se recopila toda la información necesaria para realizar la interfaz: Imágenes, animaciones, sonidos, cálculos previos.
- **Update:** Este método se realiza todo el tiempo. Se implementa toda la lógica del juego para que funcione, el tiempo del juego se considera en este método.
- **Draw:** Este método se realiza con menos frecuencia. Permite que se visualicen las imágenes en 2D o 3D y se considera la posición.

Los objetos creados para el juego cuentan con sus respectivas propiedades y comportamientos, en este caso se implementó una máquina de estados a partir de ciertos eventos ocurridos durante el juego; estos eventos pueden ocurrir a partir de la naturaleza del juego (tiempo o posición alcanzada) o la interacción entre los objetos, esto es que uno de los objetos sufra un cambio que afecte a otro o que exista colisión entre sus gráficos.

Para detectar la colisión entre los objetos es necesario considerar que los gráficos 2D son considerados rectángulos a pesar de los colores vacíos. Es decir que la colisión entre estas geometrías consideraría siempre áreas cuadradas. En el caso de las figuras 2D las colisiones pueden ser a partir de figuras con geometrías más pequeñas simulando la figura completa. Además existe un método recomendado para detectar las colisiones para figuras irregulares sin perder el detalle de las formas que tienen (como en el caso de utilizar rectángulos de diferentes medidas para cubrir una imagen) o procedimientos de comparación de cada pixel en todo momento.

El método de colisión por pixel requiere obtener la información de la textura 2D que se esté contemplando y mantenerla en una matriz de datos, para determinar en qué puntos está coloreada la textura y en cuales es transparente; además de esto se emplean matrices de rotación y traslación para determinar su posición cada vez que sea necesario. [89]

En el caso de las colisiones en 3D se emplea el método de polígonos de colisión, como un ejemplo representativo están los juegos tipo *Combate* en los que la mecánica del juego está basada principalmente en la colisión de estos polígonos.



Figura 9.41 Visualización de las burbujas de colisión en el juego Super Smash Brothers Melee. [90]

Sin embargo, para que sea considerado un juego y no simplemente una animación debe existir una interacción de parte del usuario. Esta interfaz humano-computadora es creada gracias a la visualización programada del entorno virtual y la entrada de información del usuario a partir de los sensores involucrados, así como su debido procesamiento e implementación dentro de dicho entorno.

Se presenta continuación los juegos desarrollados durante el proyecto, para tener más detalle del código fuente consulte el Anexo VI.

9.10.3 Juego en 2D dinámica para ejercitar las falanges

En la ventana de control, a modo de preparación, se puede configurar la selección de los puertos, observar la recepción de los datos en la comunicación serial y calibrar la posición de los motores así como los límites inferior y superior que alcanza el sensor de flexión; estas configuraciones permiten asegurar que el usuario no sentirá las fuerzas en momentos equivocados, así como también observar que la comunicación esté ocurriendo correctamente (como observar si el cable USB está funcionando), e incluso realizar pruebas demostrativas de los actuadores previo a la utilización del paciente.

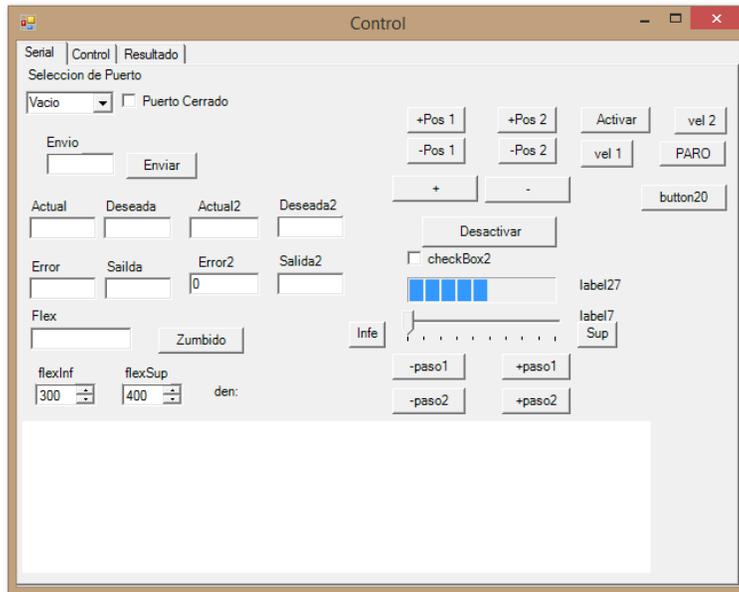


Figura 9.42 Ventana de control de la comunicación serial.

En la segunda ventana aparece el juego que utiliza la información que se observó en la ventana anterior con la comunicación serial como periférico de entrada para controlar al elemento protagonista de la actividad. En la Figura 9.43 se observa una serie de elementos de la naturaleza, el usuario es capaz de controlar la hoja verde a través de la flexión de los dedos dado que la información proviene del sensor de flexión. Antes de iniciar el juego se puede regular la cantidad de hojas cafés que aparecerán entre dos y cinco, al mismo tiempo la distancia entre las hojas y de esta manera se puede regular la flexión que alcanzarán los dedos.

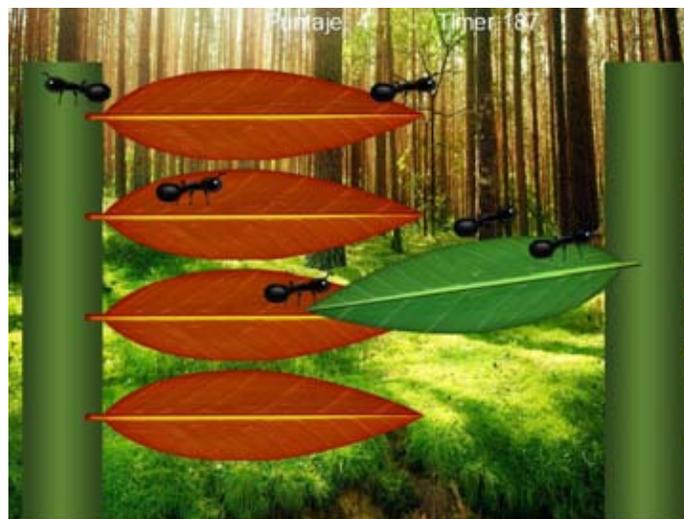


Figura 9.43 Impresión de pantalla de la interfaz gráfica del juego en 2D.

La mecánica del juego consiste en la aparición de las hormigas por el lado izquierdo que avanzan hasta la orilla de las hojas cafés y espera dos segundos, el usuario debe tocar a la hormiga para que avance a través de la hoja verde hasta llegar a la orilla de la derecha. Este proceso promueve la flexión de las falanges como ejercicio.



Figura 9.44 Captura de pantalla de la interfaz cuando aparece el objeto de la araña.

En un cierto tiempo aparece una araña que atrapa a la hoja verde lo que provoca que el usuario sienta la fuerza con ayuda del sistema de actuación, el usuario debe evitar alcanzar el límite que se muestra; esto puede provocar que ocurran dos casos, si la persona logra evadir el límite durante un periodo de diez segundos, por otro lado la persona puede fallar y no ganará el puntaje.

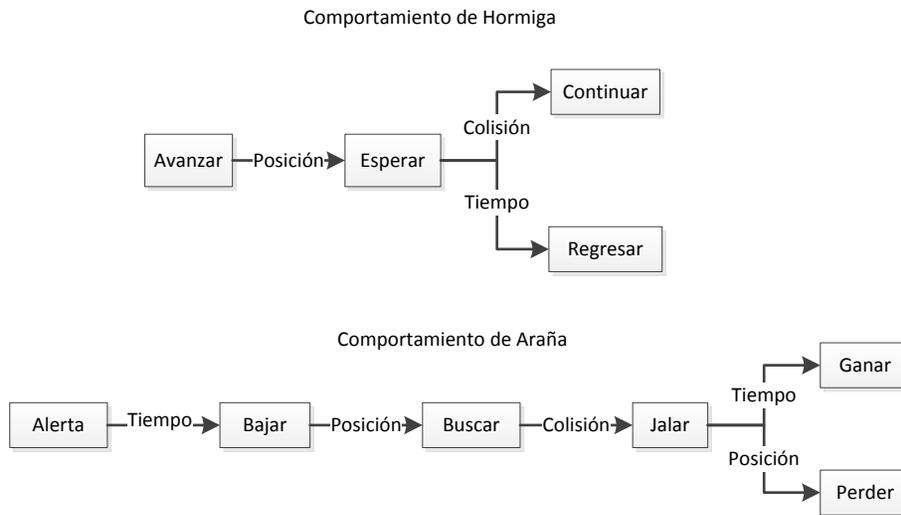


Figura 9.45 Diagrama del comportamiento de los objetos en el juego 2D.

A partir de lo mencionado se puede destacar la implementación de los objetos de “hormiga” y “araña”, estos objetos realizan un cierto comportamiento desde que son creados y puede ir cambiando a partir de los eventos que ocurran durante el juego (Figura 9.45).

Finalmente se puede decir que el ejercicio realiza la extensión y flexión de las falanges proximales, además de incluir la flexión del resto de las falanges, pues la promoción del agarre cilíndrico permite alcanzar estos movimientos; los cuales son obtenidos a partir de la variación en el sensor de flexión, a manera de que el usuario mantenga posiciones firmes durante la recolección de hormigas en cada hoja para su correcto traslado y de esta manera corroborar el rango de movilidad y la fuerza articular que tiene el paciente. El entorno en el que se desenvuelve la dinámica corresponde a la naturaleza y mantiene la atención mediante la aparición constante de las hormigas.

9.10.4 Juego en 3D dinámica para ejercitas la muñeca

En este juego se utiliza la información de los ángulos de la IMU para realizar los movimientos de una esfera, la comunicación serial se realiza sin visualizar la recepción de datos únicamente se muestra la interfaz gráfica. Se inicia con una pantalla para que el usuario se prepare y haga pruebas de movimiento de manera que al momento de pulsar comenzar el usuario aproveche el tiempo al máximo.

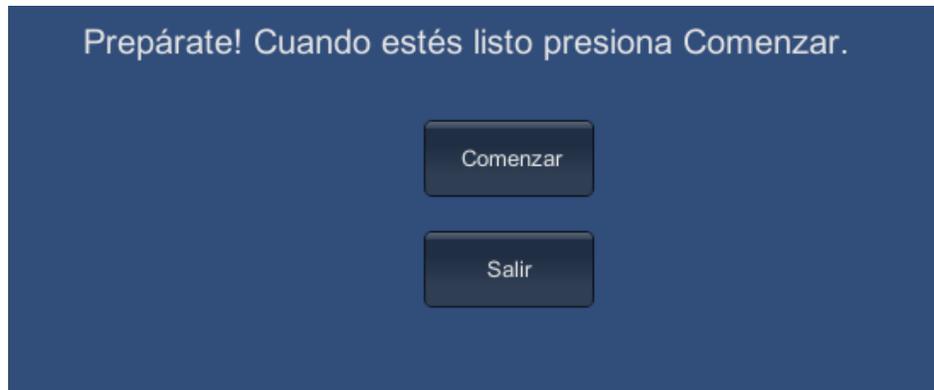


Figura 9.46 Ventana previa al juego para preparación.

La mecánica del juego consiste en memorizar una lista de colores que desaparecerá en un periodo de tiempo, el usuario debe buscar y hacer contacto en el orden de la lista. En cada nivel aumenta la cantidad de colores que deben ser memorizados, este mismo número equivale a los puntos que se pueden obtener al realizar correctamente los números.

Cuando el usuario falla vuelve a empezar en el nivel 1, el objetivo del juego es realizar la mayor cantidad de puntos durante el periodo dado. El juego permite la libertad de movimiento del usuario al grado de que puede alejarse de un bloque y volver a tocarlo para que registre su color.

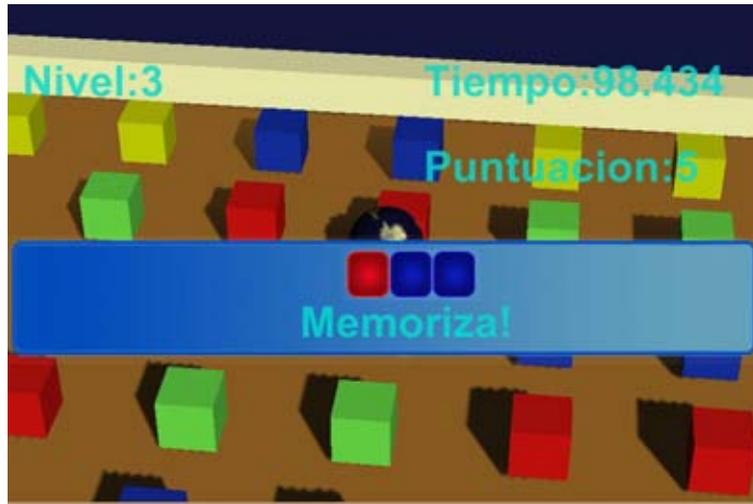


Figura 9.47 Captura de pantalla en el momento de memorizar.

El usuario realiza el movimiento de la esfera en dos tiempos: El primero, consiste en rotar a partir de la pronación y la supinación, lo permite rotar la esfera y la cámara; y el segundo, utiliza la aducción y abducción, lo que permite avanzar o retroceder en línea recta según la posición que se observa. La cámara fue programada de manera que siempre siga al usuario y que al girar el movimiento sea relativo a este sistema coordenado, permitiendo que siempre se avance en una línea de acción.

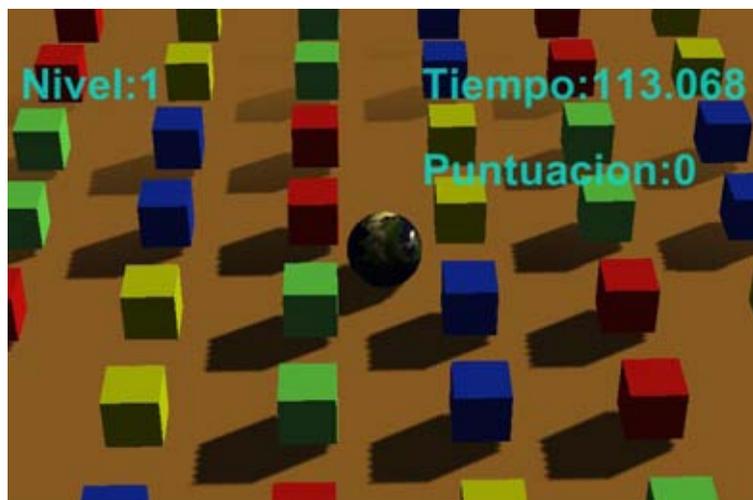


Figura 9.48 Captura de pantalla mientras el usuario mueve la esfera.

Los elementos contienen burbujas de colisión con la forma correspondiente de cubos y la esfera, cuando estos elementos hacen contacto se genera la señal, sin embargo para evitar que se activen en momentos inadecuados es necesario crear una inmovilización para que el usuario se coloque en la posición inicial y se enfoque en memorizar la lista de colores. Además para evitar que la colisión fuese detectada en la inmovilización se obliga a la esfera a moverse durante medio segundo más para evitar que al momento de moverse nuevamente fuese detectada una colisión tangente.

En la actividad planteada, los movimientos de pronación y supinación, así como los de aducción y abducción, son presentes gracias a la medición de los ángulos a través de la IMU; a manera de que se pueda revisar el rango de movilidad que se tiene con el dispositivo, considerando que las posiciones a la que es enfrentada la articulación de la muñeca deben ser alcanzadas y mantenidas en un corto periodo de tiempo, con el fin de rotar y trasladarse para seguir la secuencia sin errores, así el usuario debe matener en memoria la secuencia y concentrarse en realizar correctamente los movimientos.

Una vez concluido el desarrollo del modelo funcional se puede proceder a realizar pruebas que demuestren los objetivos planteados en la cuestión de los movimientos ejecutados y la participación de los elementos lúdicos, es por ello que se analizan los resultados y son comparados con lo que se planteó previo al desarrollo del concepto.

10 Resultados

El modelo funcional engloba la sinergia de todos los sistemas conectados con la configuración establecida por el diseño; este sistema, en operación, permite demostrar la viabilidad de la solución obtenida y la factibilidad del modelo funcional. Para comprobar la funcionalidad del modelo se plantearon dos situaciones: que sea lúdico y la correcta realización de los ejercicios.

10.1 Prueba de los elementos lúdicos

Para comprobar las características lúdicas de los ejercicios desarrollados se realizaron pruebas de funcionamiento con diferentes usuarios, alumnos y profesores pertenecientes a la Facultad de Ingeniería de manera que se recabara testimonios que pudieran avalar los puntos mencionados en el Capítulo 2.4.4 donde se mencionan las motivaciones que tienen las personas para usar videojuegos en su tiempo libre.



Figura 10.1 Pruebas de la interfaz completa con el dispositivo.

En la Figura 10.1 se puede visualizar la mano de una persona externa al proyecto que se encuentra utilizando el dispositivo, así como también se muestra en la pantalla de una computadora uno de los juegos en desarrollo.

A partir de la prueba se obtuvo una serie de puntos que se resaltan a continuación:

- La característica de competición se incluyó un sistema de puntuación que le permite al usuario guardar una puntuación máxima de manera que puede intentar superar el puntaje en cada nuevo intento. Dentro de este sistema, se incluye el apartado de desafío, pues el usuario solo podrá alcanzar la puntuación total si puede dominar las mecánicas de juego y la forma de interacción. Se observó que las personas tuvieron la intención de jugar nuevamente, a partir de estar conscientes de su puntaje, con el fin de superar su primer intento, esto comprueba que el usuario podría tener la intención de jugar al menos tres veces un mismo juego.
- La repetitividad es un punto importante para el juego, dado que el usuario debe ser capaz de alcanzar el tiempo indispensable para el aprovechamiento de los ejercicios, aproximadamente de 15 [min], los juegos están diseñados para durar al menos 6 [min] por dos de ellos (los desarrollados hasta el momento para ejemplificar), es decir que con tres series se alcanza el tiempo mínimo por las especificaciones y con cuatro se puede lograr un tiempo que demuestre la concentración del paciente por el proyecto.
- En el primer intento de cualquier juego el usuario debe acostumbrarse a las mecánicas y los dispositivos de entrada, es por ello que la curva de aprendizaje⁶ está presente en la interacción con los ejercicios. Además una vez que se ha considerado las limitaciones del paciente este aprendizaje es acompañado de un progreso en la movilidad de las articulaciones, esta adaptabilidad fomenta la diversificación de los juegos.
- Las pruebas demostraron la aceptación de que, al agregar diversas temáticas y retos en los juegos, el interés aumenta debido a la curiosidad que tiene el usuario de realizar nuevas actividades; es así como los pacientes estarían motivados a continuar realizando su terapia y, mientras la desarrollan, se distraerían de la enfermedad por la cual están pasando. La distracción es la que permite resaltar los puntos de fantasía y escape debido a los diferentes entornos desarrollados.

⁶ Una curva de aprendizaje representa el grado de éxito obtenido durante la etapa de aprendizaje a través del tiempo. Es decir se disminuye la cantidad de errores al realizar alguna tarea después de obtener más experiencia en una actividad.

- Finalmente las actividades fueron probadas en diferentes sectores de edades, por lo que se tiene una buena aceptación de los elementos lúdicos; sin embargo, es necesario realizar pruebas de una mayor cantidad de usuarios y pacientes para tener una mejor visualización de los datos.

10.2 Prueba de análisis biomecánico de los ejercicios

Los ejercicios planteados imitan y siguen los movimientos que se tienen en ejercicios recomendados para las articulaciones de la mano, es por ello que a pesar de la información arrojada por los sensores que capturan las posiciones angulares (utilizadas en la interfaz gráfica), se realizan pruebas para estudiar los movimientos que son efectuados en cada actividad.

Para visualizarlos se realizaron pruebas con referencias fijas que pudieran ilustrar cuantitativamente los ángulos.



Figura 10.2 Posición inicial de la muñeca en el experimento de medición.

En este primer experimento se visualiza los movimientos de pronación y supinación que realiza la muñeca (Figura 10.2). Además se realizaron las mediciones en los movimientos de abducción y aducción. Así como también se midió la flexión y extensión de las falanges como se muestra en la Figura 10.3.



Figura 10.3 Medida alcanzadas en el experimento de la extensión de los dedos.

En la prueba de la biomecánica el sensor de movimiento de la muñeca detectó una variación máxima aproximada de $30 [^\circ]$ en el *pitch* y el *roll*. En el experimento de pronación y supinación correspondiente al *pitch* alcanzó una medida de $50 [^\circ]$ de pronación y de $30 [^\circ]$ hacia el exterior, estos resultados varían con lo medido por los sensores debido a la posición actual del sensor que se encuentra en el punto medio de la semi-esfera, mientras que el centro de rotación de la muñeca se encuentra ligeramente desplazado hacia atrás por lo que el valor obtenido es diferente.

Mientras que la abducción y la aducción correspondiente al *roll*, tiene obtuvieron un valor de $15 [^\circ]$ y $20 [^\circ]$, estos resultados también dependen de la posición del centro de rotación de la muñeca y el resto del brazo que debe reposar sobre una superficie a la altura del dispositivo.

En el experimento del movimiento de la flexión y extensión de los dedos se obtuvo una variación angular de aproximadamente $80 [^\circ]$ en la falange proximal. El resto de las articulaciones de las falanges no son observadas debido a que se considera un único grado de libertad.



Figura 10.4 Medición de la abducción y aducción.

Una examinación de los resultados permite concluir que los ángulos obtenidos no abarcan los límites extremos de las articulaciones, que sin embargo la ejecución de los ejercicios se realiza correctamente con base a lo observado en el experimento y la implementación en la interfaz gráfica. El resto de las fotografías del experimento son mostradas en el Anexo VII.

10.3 Valores obtenidos en las especificaciones

De las especificaciones planteadas inicialmente se pueden realizar algunas observaciones con los valores obtenidos en el desarrollo del proyecto. Se realiza una tabla comparativa (Tabla 11) en la que se puede observar más detalladamente la relación que existe entre los valores obtenidos y los valores que se habían propuesto a través de un análisis de este resultado.

Tabla 11 Comparación de las especificaciones deseadas y obtenidas

Especificaciones	Valores deseados	Valores obtenidos
Tiempo tolerado mínimo	20 [min]	18 [min] (3 series de 6 [min])
Espacio requerido máximo	800 [cm ²]	1050 [cm ²]
Dimensiones máximas	Espacio en plano 30x30 [cm ²] Altura 30[cm]	28x28[cm ²] Altura 29[cm]
Peso o fuerza a vencer máxima	3 [kg]	2.75 [kg]
Velocidad de procesamiento mínimo	20 [Mhz]	48 [Mhz]
Grados máximos para los ejercicios	30 [°] para muñeca 80 [°] para falange proximal	25 [°] para la muñeca (en promedio) 80 [°] para la falange proximal
Cantidad mínima de indicadores	Un elemento por grado de libertad	*Depende la actividad

*El juego de las hormigas tiene cuatro posiciones visualices para indicarle al paciente la flexión que debe realizar con los dedos. En el juego de los cuadros de colores, el movimiento solo se realiza hasta alcanzar una posición de 20 [°] en la pronación, al aumentar el ángulo aumenta la referencia de velocidad de giro.

En el tiempo tolerado mínimo la diferencia de tiempo entre lo deseado y lo obtenido es de 2 [min] aproximadamente, existe un tiempo mínimo de 15 [min] donde existe ya un aprovechamiento de los ejercicios. Por lo cual el tiempo que no pudo obtenerse no afecta el desempeño del dispositivo.

El espacio requerido máximo es una aproximación del espacio que se requiere para tener el dispositivo y el antebrazo flexionado. Por lo cual puede variar dependiendo de la persona que lo esté utilizando.

Las dimensiones y el peso del dispositivo son cercanas a las dimensiones máximas establecidas inicialmente, lo cual cumple con el objetivo actual, más puede mejorarse en una iteración posterior para reducir el tamaño y peso para la comodidad del usuario.

La velocidad de procesamiento cumple satisfactoriamente lo establecido, en las pruebas con el microcontrolador se puede observar que no existen retrasos por parte del procesamiento, la comunicación serial es el punto más débil, sin embargo, no existen atrasos en la transferencia de la información.

Los grados máximos no son rebasados, sin embargo no se alcanza a abarcar todo el rango de movilidad de las articulaciones. El proyecto presente se considera dentro de una etapa de recuperación de la movilidad, por lo tanto, el rango de paciente será menor al establecido por las especificaciones que se encuentran referidas a los datos goniométricos obtenidos en la literatura.

Los indicadores de las posiciones correctas están establecidos por la visualización gráfica dentro de los juegos desarrollados. En el juego de las hojas y hormigas, que utiliza la flexión de los dedos, se utiliza las hojas de las posiciones de aparición de las hormigas, éstas son modificables antes de iniciar cada partida de juego. Mientras que en el juego de los cuadros de colores se obliga al usuario a alcanzar posiciones de 20 [°] al menos para comenzar a realizar los movimientos de rotación, y en el caso de la abducción de 15 [°] que corresponde al movimiento de avance.

10.4 Validación del modelo

Para obtener información respecto a la viabilidad del concepto representado como modelo funcional, se incursionó en una institución que se dedicara a la rehabilitación, esta indagación obtendrá retroalimentación para una iteración posterior de este proyecto. La institución con la cual se tuvo contacto para realizar una entrevista fue la “Dirección de Medicina del Deporte”.

La persona que fue entrevistada fue la Dra. Soledad Echegoyen, inicialmente hizo un planteamiento enfocado a que los ejercicios de movilidad de la mano son más comunes en enfermedades de tipo neurológico, es decir, afecciones en los nervios que controlan los músculos, dado que la mano debe recuperar funcionalidad a través de promover la comunicación entre las conexiones neuromusculares. En la institución aparecen con más frecuencia lesiones traumáticas de la mano y síndrome del túnel carpiano, las cuales involucran una terapia física con más movimientos de los que tiene actualmente el dispositivo.

Durante la entrevista la especialista mencionó que la intervención de la rehabilitación de un traumatismo ocurre en tres etapas: inmovilización, terapia pasiva y terapia activa. El dispositivo actualmente podría entrar en la etapa de terapia activa, dado que está contemplando el movimiento del usuario para la interacción con un juego. Ante la mención de que el dispositivo actualmente cuenta con la característica de tener actuadores, se podría extrapolar el proyecto a realizar cinesiterapia pasiva para los pacientes, que sin embargo, debe considerarse que los pacientes al pasar la etapa de inmovilización pierden comunicación con el músculo por el desuso, y requieren de una fuerza superior a la que podrían moverse normalmente; por lo tanto el sistema de actuación, de ser implementado

para estos fines, requeriría de la evaluación de las fuerzas necesarias para realizar estos movimientos así como un estudio de la forma en que terapeutas los realizan sobre sus pacientes.

La doctora además resaltó que durante la cinesiterapia pasiva los pacientes sienten dolor mientras realizan los movimientos de sus articulaciones dañadas, dado que en este punto los movimientos no dependen del usuario, no existe interacción como tal, la persona no tiene una forma de distraerse al realizar estos movimientos; por lo que, con el dolor presente, es preferible que los ejercicios estén en manos de un terapeuta dado que es consciente del dolor del paciente y tiene un mejor manejo de la situación.

Cuando se mencionó a la especialista los movimientos que son medidos en el dispositivo, se consideraron dos vertientes importantes. En primer lugar el pulgar resulta de gran importancia dentro de los usos de la mano en la vida cotidiana; por lo cual se indicó que dentro de la rehabilitación de la mano, los ejercicios del pulgar tienen mayor relevancia sobre los ejercicios del resto de los dedos, con esto se hizo la recomendación de implementar un sistema para ejercicios para los movimientos del pulgar.

En segundo lugar, dado que el dispositivo actualmente contiene un sensor de flexión, con el cual se puede medir la posición angular de todos los dedos (excepto el pulgar) a la vez, al ser único y separable cuenta con la versatilidad de que, al cambiar su localización, puede medir la flexión de cualquiera de los dedos (excluyendo al pulgar, que tendría un sensor independiente), pues el movimiento de los dedos se realiza en dos sesiones: primero se realiza el movimiento de todos los dedos a la vez, y después se involucran movimientos independientes para cada dedo.

Además la especialista hizo la aclaración del movimiento de pronación y supinación como tal, a pesar de formar parte de los grados de libertad de la mano como elemento final, no forma parte de la motricidad de la muñeca sino que el movimiento se realiza por parte de la rotación del brazo; sin embargo, esta medición podría ser implementada en alguna lesión de la inervación en el antebrazo. Es por ello que la doctora promovió un enfoque hacia los movimientos de la muñeca, es decir, además de la aducción y abducción, que se cuenta en el ejercicio desarrollado, incluir la flexión y extensión como los movimientos medidos y utilizados.

Dentro de la clínica los terapeutas mencionaron que cuentan con un sistema de ejercicio para los dedos, el cual consiste en primer lugar en la inmovilización del brazo hasta la muñeca con ayuda de una férula hecha en yeso, posteriormente se colocan argollas para cada dedo y a través de ligas incrementan la fuerza para cuando se realiza el movimiento en dirección interna de la palma, y se aludió a que requerían un método para las fuerzas en sentido contrario. La manera en que realizan la actividad fue comparada con el ejercicio que se realiza con el proyecto presentado, el resultado fue positivo dado que el dispositivo

puede generar fuerzas en ambas direcciones así como la participación en actividades de esparcimiento.

Ante la exhibición de los elementos lúdicos dentro de los ejercicios terapéuticos, la especialista resaltó la distracción de la enfermedad, de forma que el usuario no esté pensando en el dolor al momento de realizar la actividad, además de la posibilidad que, a través de la concentración en el juego, el usuario pueda realizar los movimientos de manera mecánica e inconsciente y de esta forma tener un progreso más rápido. La doctora hizo notar que debe ser considerada la curva de aprendizaje de los usuarios debido a las destrezas necesarias para los juegos, puesto que pueden variar entre los pacientes.

Como conclusión de la entrevista el dispositivo fue considerado como una buena alternativa a las terapias actuales, por los cuales el proyecto les pareció muy interesante pues puede complementar la forma de realizar los servicios que ofrecen en la institución. A partir de la información recabada cumple con la función para la cual fue creada, con lo que el concepto desarrollado en el modelo funcional es considerado factible en su estado actual y con una futura iteración, que considere los elementos mencionados en la entrevista, podría llegar a ser un dispositivo final que podría ser implementado en su institución.

10.5 Trabajo a futuro

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas, la validación del modelo funcional así como también las restricciones establecidas al momento de desarrollar el concepto, se destacan los apartados donde puede crecer el proyecto, así como mejorar sus características para futuras iteraciones.

- Desarrollar un sistema de medición angular para recabar información del movimiento de flexión – extensión de la muñeca.
- Ampliar el rango de movilidad de la supinación – pronación a través del empleo de un mecanismo de apoyo para la rotación del sistema.
- Realizar una caracterización más detallada de los movimientos que se están ejecutando.
- Aumentar la cantidad de sensores y actuadores para los ejercicios de las falanges.
- Implementar un sistema háptico para el sistema de los movimientos de la muñeca.
- Disminuir el tamaño del dispositivo, implementado un diseño de ensamble.
- Aplicar las técnicas de diseño de interfaces para mejorar la experiencia del entorno virtual para el usuario.

- Desarrollar diversos ejercicios gráficos-interactivos con el fin de ampliar el repertorio.
- Agregar nuevas entradas que permitan realizar otro tipo de ejercicios que los planteados, como los ejercicios del pulgar: Contacto en los dedos, Palanca analógica sobre el joystick.
- Implementar el uso de la comunicación USB HID en el PIC, para mejorar la experiencia de usuario, así como aprovechar la velocidad del protocolo.
- Aplicar la ergonomía para mejorar la comodidad de usuario al momento de usar el dispositivo.
- Implementar un sistema que controle la postura del usuario, para que se encuentre en la posición correcta inconscientemente mientras realiza la actividad.

11 Conclusión

El proyecto se basa en la implementación de las técnicas de gamificación en el ámbito de rehabilitación, a través del uso de tecnologías que permiten crear una interfaz humano computadora, el desarrollo de este concepto permitió observar la viabilidad de las técnicas lúdicas en los ejercicios de terapia de la mano. La implementación de juegos de video en áreas ajenas al entretenimiento, pueden funcionar de manera positiva debido a las características que tiene, y a la psicología del ser humano al realizar este tipo de actividades.

Los juegos permitirán que los ejercicios se realicen de manera inconsciente, pues se considera que se encuentran inmersos en un entorno virtual y concentrados en una actividad que los pone a prueba, y que además los ejercicios requieren de una precisión (no rigurosa) de las posiciones que deben ser ejecutadas, lo que provoca que la terapia se realice correctamente.

La interfaz desarrollada demostró la versatilidad que se tiene en la computación gráfica para crear diferentes entornos y actividades, que pueden adaptarse a las limitaciones de los pacientes, a partir de utilizar un mismo dispositivo de entrada que permite medir todas las variables indispensables. La interacción de los pacientes con la aplicación gráfica, a través del dispositivo, permite crear una inmersión a un entorno virtual que es intensificada por la aplicación de sistemas que involucren a más receptores sensitivos del ser humano, pues además de lo visual y auditivo, se cuenta con un sistema háptico que involucra la experiencia de usuario a través de la sensación de fuerzas.

Durante la investigación para la creación del concepto, se pudo observar que existe un amplio repertorio de tecnologías de sensores que pueden utilizarse para realizar las mediciones goniométrías, y de ellas debe seleccionarse las que se adecuen más a la configuración necesaria de manera que sea posible la retroalimentación para el paciente. El uso de la computadora como parte de la interfaz, permite realizar una base de datos y tratamiento de esta información de forma más automática, así se puede facilitar el trabajo a los fisioterapeutas que requieren hacer un estudio del progreso que tiene el paciente.

El dispositivo dejará una base para un hardware de libre acceso especializado en mediciones goniométricas de la mano y la muñeca. El sistema de comunicación plantea la creación de un sistema *plug and play* (que no requiera configuración o software específicos) que permita abarcar la necesidad de los usuarios de limitarse únicamente a la realización de los ejercicios.

El desarrollo de proyectos multidisciplinarios en ingeniería mecatrónica, que se valen de tecnologías actuales, concede la oportunidad a personas, ajenas a la ingeniería, tengan un acercamiento a estas nuevas formas de interfaz que complementan su trabajo; esto promueve la realización de proyectos en conjunto con instituciones especializadas en otras áreas del conocimiento.

En el ámbito de la rehabilitación se demostró que se pueden incluir interfaces computarizadas como una terapia diferente a la terapia ocupacional, que se tiene normalmente para motivar a los pacientes, dado que involucra actividades de esparcimiento o de la vida cotidiana.

El conocimiento en las áreas médicas, más específicamente las enfermedades y sus métodos de rehabilitación, que son estudiados tanto en la literatura como en el acercamiento a pacientes, permitirá crecer el proyecto de manera que se pueda adaptar a necesidades más detalladas con más consideraciones para una mejor experiencia de usuario.

El proyecto actualmente se encuentra dentro de la etapa de intervención, más en concreto en la sección de los ejercicios activos, donde el paciente está obligado a realizar los movimientos periódicamente. El modelo funcional cuenta con la capacidad de realizar mediciones angulares en las articulaciones, esta capacidad puede extrapolarse a ser usado en la etapa de evaluación y diagnóstico de las enfermedades, de manera que se pueda realizar una mejor prescripción de ejercicios, que se realizarán con el mismo dispositivo.

Dado que se tiene un sistema de actuación conectado directamente al sistema de sensado, es posible realizar un control de posición que, después de realizar los cambios pertinentes en el dispositivo, se podría implementar un sistema que ayude al fisioterapeuta a realizar los ejercicios pasivos, sin dejar a un lado el factor humano que representa este especialista, pues el paciente en esta etapa siente dolor y debe ser tratado con más cuidado, además de considerar su estado emocional.

El método que se adoptó para realizar el concepto de este proyecto puede ser implementado para el desarrollo de otros dispositivos para la rehabilitación, más allá de la fisioterapia. La metodología a seguir consiste en: investigar sobre una enfermedad en concreto, así como también la forma de rehabilitar dicha enfermedad, y de esta manera obtener necesidades; investigar las variables que necesitan ser medidas, de manera que se pueda proseguir a una búsqueda de las tecnologías de sensores que se tienen disponibles; posteriormente elegir la configuración más adecuada a las necesidades planteadas por la enfermedad y la tecnología elegida; con las variables, utilizadas como dispositivo de entrada, se puede realizar la programación de los ejercicios con las características necesarias para que sea adaptable a diferentes pacientes y crear librerías que permitan crecer el desarrollo de más actividades; finalmente se realizan pruebas para continuar un proceso iterativo hasta obtener un dispositivo que pueda ser certificado.

El proyecto, que fue descrito en el documento actual, fue diseñado para actuar en enfermedades como la artritis reumatoide y el síndrome del túnel carpiano; sin embargo, con las modificaciones pertinentes puede ser utilizado para rehabilitar a la mano de patologías de otras índoles, como por ejemplo la mano traumática.

A través de la metodología de diseño se logró obtener un modelo funcional de la solución para un sistema lúdico que permite realizar ejercicios terapéuticos para la mano, que cumple con la mayoría de las necesidades planteadas a partir de la problemática según los resultados obtenidos en las pruebas. Existen algunos dispositivos en el mercado internacional que funcionan como el sistema desarrollado en el proyecto, lo que permite tener un mejor panorama de dónde se puede crear impacto en la implementación de tecnología dentro de la rehabilitación, ya sea añadiendo contenidos lúdicos o variando el elemento anatómico donde se está actuando.

12 Bibliografía

- [1] Colegio Irabia. (2000) DIFERENCIAS BIOLÓGICAS ENTRE LOS HUMANOS Y EL RESTO DE LOS PRIMATES. [Online]. <http://www.irabia.org/web/sociales1eso/822difereshumanos.htm> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [2] Wikipedia®. (2014, Enero) Aparato Locomotor. [Online]. http://es.wikipedia.org/wiki/Aparato_locomotor [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [3] Dr. Ricardo J. Monreal. (2007, noviembre) La mano, origen, evolución y su papel en la sociedad. [Online]. http://www.bvs.sld.cu/revistas/ort/vol21_2_07/ort01207.htm [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [4] © Amputee Coalition. (2007, Septiembre) Aprehendiendo la importancia de las manos. [Online]. http://www.amputee-coalition.org/spanish/inmotion/nov_dec_06/our_hands.html [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [5] A. Wayne Vogl, Adam W. M. Mitchell Drake, *Gray's Anatomy for Students Richard*, 2nd ed. Filadelfia, EUA: Elsevier Health Sciences, 2009.
- [6] Luz Amparo Arias López, "Biomecánica y patrones funcionales de la mano," *Morfología*, vol. 4, no. 1, p. 11, Abril 2012.
- [7] Dr. José Juan Pascual García. (2012, Marzo) Rehabilitación de la mano. [Online]. <http://files.sld.cu/boletincnscs/files/2012/03/respub-jose-pascual.pdf> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [8] Blogspot Victor. (2012) Articulaciones. [Online]. <http://articulacionesafa.blogspot.mx/2012/06/la-muneca-une-el-resto-de-la-mano-con.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [9] Julio García. (2012) Miología. [Online]. <http://juliogmijares.blogspot.mx/2012/11/miologia-partede-la-anatomia-que.html>

[Fecha de consulta: Marzo, 2014]

- [10] Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas. (2011) Diseño mecánico y cosmético de una prótesis parcial de mano. [Online]. <http://scielo.sld.cu/pdf/ibi/v30n1/ibi03111.pdf> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [11] Universidad Politecnica de Chiapas. (2009) Propuesta de banco de pruebas para prótesis de manos. [Online]. <http://dc161.4shared.com/doc/OPWVaFrU/preview.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [12] DR. SANTOS PALAZZI. (2013, Enero) TRAUMATOLOGÍA Y CIRUGÍA ORTOPÉDICA ADULTOS. [Online]. <http://www.teknon.es/web/santos-palazzi/cirugia-de-la-mano> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [13] Escuela de Medicina UC. (1998, Septiembre) Patología Traumática. [Online]. http://escuela.med.puc.cl/publ/OrtopediaTraumatologia/Trau_Secc01/Trau_Sec01_3_6.html [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [14] MD C. Benjamin Ma. (2010, Enero) Síndrome del túnel carpiano. [Online]. <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/000433.htm> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [15] Dr. Manuel Romero Jurado. (2010, Enero) Artritis Reumatoide Información actualizada para pacientes y familiares. [Online]. http://www.conartritis.org/wp-content/uploads/2012/05/informacion_actualizada_pacientes_familiares.pdf [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [16] DMedicina. (2009, Enero) Artrosis tratamientos, síntomas e información. [Online]. <http://www.dmedicina.com/enfermedades/musculos-y-huesos/artrosis> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [17] Lic. Mudkay Rojas Ortiz. (2009, Marzo) Rehabilitación a pacientes con enfermedad de Parkinson. [Online]. <http://www.efdeportes.com/efd130/rehabilitacion-a-pacientes-con-enfermedad-de-parkinson.htm> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [18] Comité de Expertos de la OMS en Rehabilitación. (1969, Enero) Serie de Informes

Técnicos N 419. [Online]. http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_419_spa.pdf
[Fecha de consulta: Marzo, 2014]

[19] J.M. Pastor Vega, F. Sendra Portero M. Martínez Morillo, *Manual de Medicina Física*, Primera ed. Madrid, España: Harcourt Brace, 1998.

[20] H. Shewe, W. Heipertz A Hüter-Becker, *Fisioterapia: Descripción de las técnicas y tratamientos*, Primera ed. Barcelona, España: Paidotribo, 2003.

[21] Fisioterapia Online JMGR. (2008) Cinesiterapia. [Online]. <http://fisioterapiaonline.com/tecnicas/cinesiterapia/cinesiterapia.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]

[22] AITOR JAÉN SÁNCHEZ. (2010) Exploración preventiva de las extremidades superiores. [Online]. <http://www.elergonomista.com/funcional.htm> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]

[23] Claudio H. Taboadela, *Goniometría Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales*, Primera ed. Buenos Aires, Argentina: Asociart SA, 2007.

[24] Carrie M. Hall, *Ejercicio Terapeutico, Recuperación Funcional*. Badalona, España: Editorial Paidotribo, 2006.

[25] Carolyn Kisner and Lynn Allen Colby, *Ejercicio terapéutico. Fundamentos y técnicas*. Barcelona, España: Paidotribo, 2005.

[26] Esclerosis Multiple España. (2010) Ejercicios de Fisioterapia para personas con EM. [Online]. <http://www.esclerosismultiple.com/pdfs/Comprender%20la%20EM/EJERCICIOS%20DE%20FISIOTERAPIA%20PARA%20PERSONAS%20CON%20EM.pdf> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]

[27] Gamificación S.L. (2013) Qué es la Gamificación. [Online]. <http://www.gamificacion.com/que-es-la-gamificacion> [Fecha consulta: Mayo, 2014]

- [28] José Palacios Aguilar. (2000) Técnicas Lúdicas. [Online]. http://iesordonosegundo.centros.educa.jcyl.es/sitio/upload/Microsoft_Word_Tema_.pdf [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [29] Real Academia Española. (2001) Definición: Juego. [Online]. <http://lema.rae.es/drae/?val=juego> [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [30] Nadia Carolina Rodríguez Ledezma María Isabe Gálvez Sosa. (2005, Mayo) La importancia del juego. [Online]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/ldf/galvez_s_mi/capitulo3.pdf [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [31] Laurie M. Stewart. (2013, Noviembre) Los adultos también necesitan jugar. [Online]. <https://www.achievementsolutions.net/achievementsolutions/es/tlc/Content.do?contentId=7861> [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [32] Gloria Elena GÓMEZ ESCOBAR. (1999) LUDOMÁTICA. [Online]. <http://www.gloriagomez.com/pdfs-ciudad/DocumentYR.pdf> [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [33] Wikipedia. (2014, Enero) Juego Serio. [Online]. http://es.wikipedia.org/wiki/Juego_serio [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [34] Samuel Franco Domínguez. (2010, Febrero) Videojuegos utilizados en la rehabilitación. [Online]. <http://www.rehabilitacionblog.com/2010/02/videojuegos-utilizados-para.html> [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [35] Sanyres Aravaca Joana Gómez. (2013) Rehabilitación virtual para personas mayores. [Online]. <http://gruposanyres.es/rehabilitacion-virtual-para-personas-mayores/> [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [36] Microsoft. (2014, Marzo) Nuevo centro de rehabilitación virtual con Kinect para personas con esclerosis múltiple. [Online]. <http://www.microsoft.com/spain/prensa/noticia.aspx?inford=2012/03/n016-nuevo-centro-de-rehabilitacion-con-kinect-para-personas-con-esclerosis-multiple> [Fecha

consulta: Mayo, 2014]

- [37] Lynnda M. Dahlquist, Karen E. Weiss Charles E. Rutter, "Sustained Efficacy of Virtual Reality Distraction," *The Journal of Pain*, vol. 10, no. 4, pp. 391–397, Abril 2009.
- [38] Leonard S. Milling Kevin M. Malloy, "The effectiveness of virtual reality distraction for pain reduction: a systematic review.," *Clinical Psychology Review*, vol. 30, pp. 1011-1018, 2010.
- [39] N. Shah, Hatfield, UK Univ. of Hertfordshire, F. Amirabdollahian, and A. Basteris, "Designing Motivational Games for Stroke Rehabilitation," in *Human System Interactions (HSI), 2014 7th International Conference on*, Costa da Caparica, 2014, pp. 166-171.
- [40] J.W. Burke, Univ. of Ulster, Coleraine Sch. of Comput. & Inf. Eng., M.D.J. McNeill, D.K. Charles, and P.J. Morrow, "Serious Games for Upper Limb Rehabilitation Following Stroke," in *Games and Virtual Worlds for Serious Applications, 2009. VS-GAMES '09. Conference in*, Coventry, 2009, pp. 103-110.
- [41] S. & Ryan, R. Rigby, *Glued to Games: How videogames draw us in and hold us spellbound*, Primera ed. California, EUA: ABC-CLIO, 2011.
- [42] Juan José Igartua Perosanz Diego Rodríguez de Sepúlveda Pardo. (2012, Octubre) Creación y validación de una escala de motivos para videojugar. [Online]. <http://campus.usal.es/~comunicacion3punto0/comunicaciones/039.pdf> [Fecha consulta: Mayo, 2014]
- [43] TensMexico. (2011) Mesa de Kanavel. [Online]. http://www.tensmexico.com/mesa_de_kanavel.php [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [44] ReabFísica. (2013) Mesa de mano con pedal económica. [Online]. http://www.reabfisica.com/catalog/product_info.php?products_id=1111&osCsid=fu9a9bpiflr9rqren4k8cu3g4 [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [45] ACA Sports Limited. (2001) Martial Arts Accessory : Heavy Tension Hand Grip.

- [Online]. http://www.acasports.co.uk/product_info.php?products_id=10083 [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [46] Handhealth. (2007) Fiddllink. [Online]. <https://www.handhealth.com/fiddllink> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [47] Power Web International and its licensors. (2014) Power-Web International. [Online]. <http://www.pwrwebintl.com/> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [48] Electro Medical. PowerWeb Yellow Green Light 2010. [Online]. http://www.electro-medical.com/product_images/large/Power-Web-Combo-Yellow-Green-Light-Heavy-0225310.jpg [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [49] Lacasadelfisio. (2000) HandMaster. [Online]. <http://www.lacasadelfisio.com/es/manos/305-handmaster-plus.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [50] Lacasadelfisio. (2000) Digi Extend. [Online]. <http://www.lacasadelfisio.com/es/manos/299-digi-extend.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [51] Amazon. (2013) Gripmaster. [Online]. <http://www.amazon.com/Gripmaster-MEDICAL-Hand-Exercisers/dp/B00BAZW0ZC> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [52] ProHands. (2010) Product Info GripMaster. [Online]. <http://www.prohands.eu/productinfo.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [53] Thinkgeek. (2012) VariGrip Hand Exerciser. [Online]. <http://www.thinkgeek.com/product/efe9/> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [54] Clinically Fit. (2014) XTENSOR. [Online]. <http://clinicallyfit.com/xtensor/the-xtensor> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [55] ThinkGeek. (2013) Xtensor Gamer Hand Excerciser. [Online]. <http://www.thinkgeek.com/product/a33b/> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]

- [56] Tyromotion GmbH. (2010) AMADEO® -FINGERS IN MOVEMENT. [Online]. <http://tyromotion.com/en/products/amadeo/overview> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [57] Tyromotion GmbH. (2010) THE PABLO® SYSTEM. [Online]. <http://tyromotion.com/en/products/pablo/overview> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [58] Tyromotion GmbH. (2010) DIEGO® – TRAINING IN SPACE. [Online]. <http://tyromotion.com/en/products/diego/overview> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [59] Hocoma. (2012) ARMEO®BOOM - OVERHEAD SLING SUSPENSION SYSTEM. [Online]. <http://www.hocoma.com/products/armo/armeoboom/> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [60] Easy Tech. (2013) Sistema de rehabilitación mano / configurado para ordenador. [Online]. <http://www.medicaexpo.es/prod/easytech/sistemas-rehabilitacion-mano-configurado-ordenador-68295-524983.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [61] Inc. Kinetic Muscles. (2012) Hand Mentor™. [Online]. <http://www.medicaexpo.es/prod/kinetic-muscles/sistemas-rehabilitacion-mano-configurado-ordenador-84107-533513.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [62] MediTouch. (2012) HandTutor™. [Online]. <http://www.medicaexpo.es/prod/meditouch/sistemas-rehabilitacion-mano-configurados-por-ordenador-69333-471962.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [63] Idrogenet. (2012) GLOREHA PROFESSIONAL. [Online]. <http://www.medicaexpo.es/prod/idrogenet/sistemas-rehabilitacion-mano-configurados-por-ordenador-74722-454792.html> [Fecha de consulta: Marzo, 2014]
- [64] Christopher C. Painter, Clifton T. Pang David J. Reinkensmeyer, "Method and apparatus for mass-delivered movement rehabilitation," Grant US6613000 B1, Septiembre 2003.
- [65] Hiroshi Ogisawa, Akio Ishida Sakumi Kanamoto, "Separable type elastic finger

rehabilitation device," Grant US 4220334 A, Septiembre 1980.

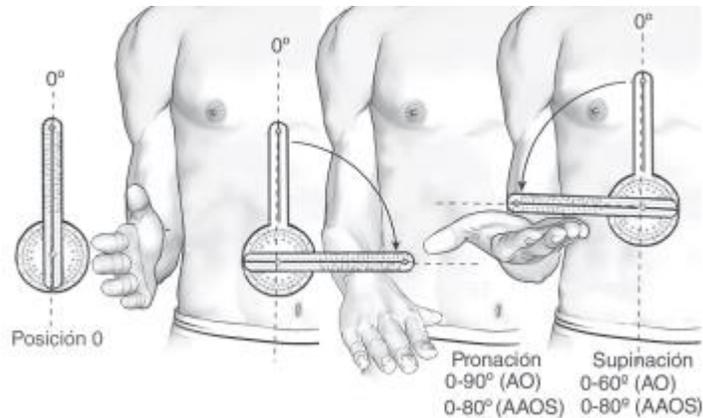
- [66] et at. Mark Sivak, "Multi-user smartglove for virtual environment-based rehabilitation," Application US 20120157263 A1, Junio 2012.
- [67] Kai Yu Tong Michael Kam Fai TSUI, "Wearable power assistive device for hand rehabilitation," Application US20130261514 A1, Octubre 2013.
- [68] James H. Williams, "Weighted finger exercise/rehabilitation glove," Grant US 5768710 A, Junio 1998.
- [69] Steven D. Eppinger Karl T. Ulrich, *Diseño y desarrollo de productos*, Cuarta ed. México: Mc Graw Hill, 2009.
- [70] Innovaforum. (2000) Técnicas de creatividad: Análisis morfológico. [Online]. http://www.innovaforum.com/tecnica/morfolog_e.htm [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [71] Look for Diagnostic. (2013) Artritis Reumatoide. [Online]. http://www.lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Artritis+Reumatoide&lang=2 [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [72] Arthritis Foundation. (2014) Ejercicios para las manos y los dedos. [Online]. <http://www.arthritis.org/espanol/ejercicio/ejercicios-acuaticos/ejercicios-acuaticos-ejemplos/ejemplos-ejercicios-acuaticos-jacuzzi/ejercicios-jacuzzi-manos/> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [73] Sociedad española de rehabilitación y medicina física. (2010, Junio) Programa de Ejercicios: Muñeca y Mano. [Online]. <http://www.sermef-ejercicios.org/webprescriptor/index.php?lang=&action=muestraSeleccionEjercicios&show=grupo&cmd=®ionid=6&grupoid=31&patologiaid=&sustituircesta=1&lang=> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [74] Cuerdas Valero. (2014) Cuerdas de Cáñamo. [Online]. <http://www.cuerdasvalero.com/category/cordeleria-de-canamo/> [fecha de consulta: Junio, 2014]

- [75] Poliformas Plásticas. (2010) ESPUMA DE POLIURETANO. [Online]. http://www.poliformasplasticas.com.mx/Multi_Archivos/fichas_tecnicas/ESPUMA_DE_POLIURETANO_PARA_VACIADOS.pdf [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [76] Pololu. (2010) Micro Metal Gearmotors. [Online]. <http://www.pololu.com/category/60/micro-metal-garmotors> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [77] ST Microelectronics. (2000) L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER. Datasheet.
- [78] Microchip. (2006) PIC18F4550. [Datasheet].
- [79] Suntan. Precision Multiturn Wirewound Potentiometer – 3590 [Datasheet]. [Online]. <http://www.agspecinfo.com/pdfs/3/3590.PDF> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [80] Jinghua Zhong. (2006) PID Controller Tuning: A Short Tutorial. [Online]. <http://saba.kntu.ac.ir/eecd/pcl/download/PIDtutorial.pdf> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [81] Matlab. (2012) Introduction: PID Controller Design. [Online]. <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [82] Sparkfun. (2012) Flex Sensor 2.2". [Online]. <https://www.sparkfun.com/products/10264> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [83] Analog Devices. (2013) ADXL-345 Accelerometer. [Datasheet].
- [84] Technovade. (2013) Moduł IMU GY-80. [Online]. <http://technovade.pl/produkty/modu%C5%82-imu-gy-80-9-cio-osiowy-akcelometr-%C5%BCyroskop-barometr-magnetometr> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [85] Analog Devices. (2010) AN-1057. Application Note.

- [86] Pieter Jan. (2013) Reading a IMU Without Kalman: The Complementary Filter. [Online]. <http://www.pieter-jan.com/node/11> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [87] Synopsys Achim Nohl. (2012) Android hardware/software design using virtual prototypes - Part 3. [Online]. <http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4401419/Android-hardware-software-design-using-virtual-prototypes---Part-3--Integrating-Android-s-HAL> [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [88] Fairchild Semiconductor. (2013) LM78XX. Datasheet.
- [89] Microsoft Xbox Live Tutorial Series. (2007) Collision Series 3: 2D Collision with Transformed Objects. [Online]. http://xbox.create.msdn.com/en-US/education/catalog/tutorial/collision_2d_perpixel_transformed [fecha de consulta: Junio, 2014]
- [90] Nintendo. (2001) Super Smash Brothers Melee. Videojuego.

ANEXO I Imágenes de goniometría de la mano

Pronación – Supinación



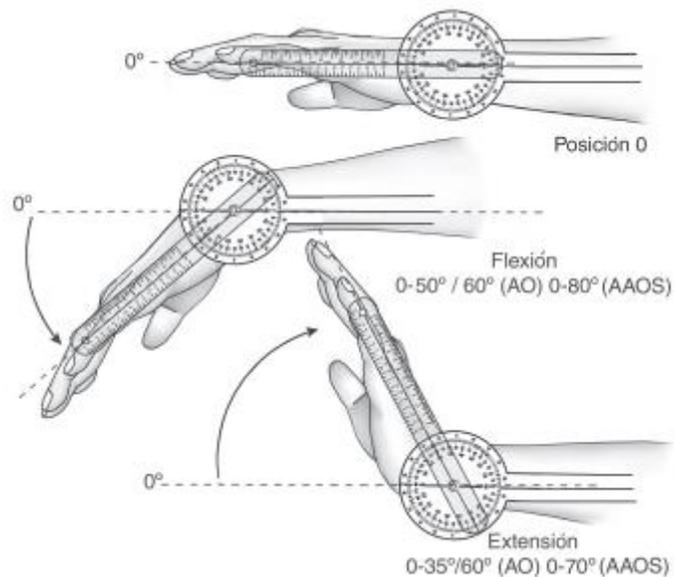
Pronación-supinación de antebrazo derecho a partir de la posición 0 (paciente con codo en 90° de flexión y pulgar hacia arriba).

Valores normales:

Supinación: 0-90° (AO) y 0-80° (AAOS).

Pronación: 0-90° (AO) y 0-80° (AAOS).

Muñeca: Flexión-Extensión



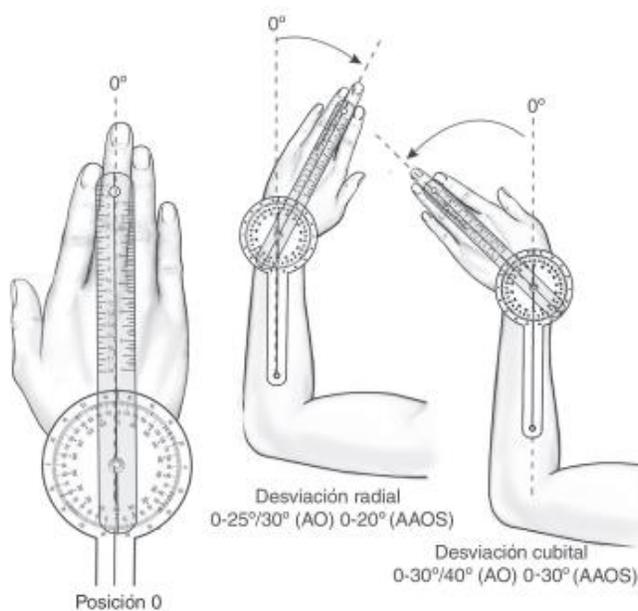
Flexión-extensión de la muñeca a partir de la posición 0 (antebrazo en pronación).

Valores normales:

Flexión: 0-50°/60° (AO) y 0-80° (AAOS).

Extensión: 0-35°/60° (AO) y 0-70° (AAOS).

Desviación radial-cubital



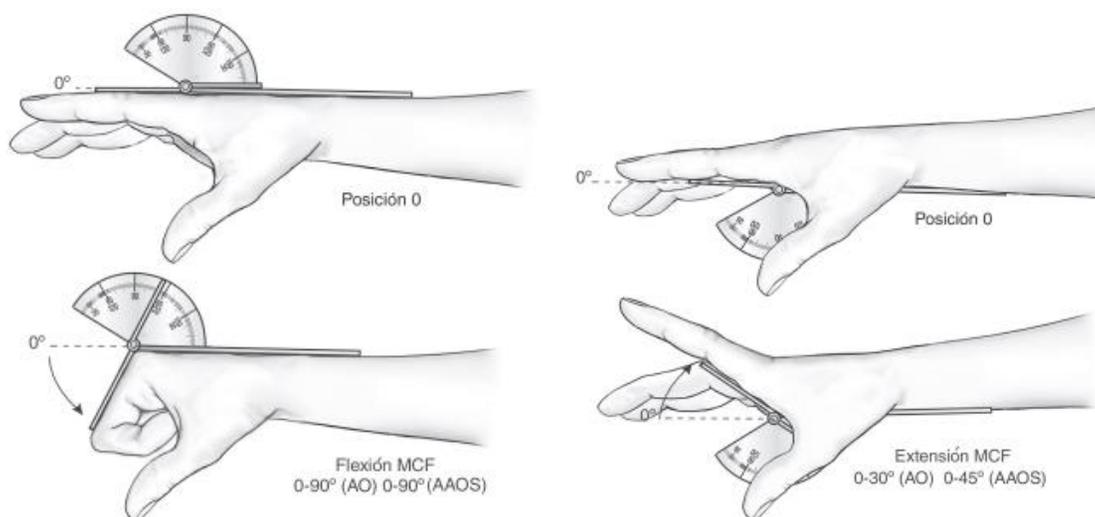
Desviación radial y cubital de la muñeca a partir de la posición 0.

Valores normales:

Desviación radial: 0-25°/30° (AO), 0-20° (AAOS).

Desviación cubital: 0-30°/40° (AO), 0-30° (AAOS).

Articulación metacarpofalángica: Flexión- Extensión



Flexión y extensión metacarpofalángica del dedo índice a partir de la posición 0.

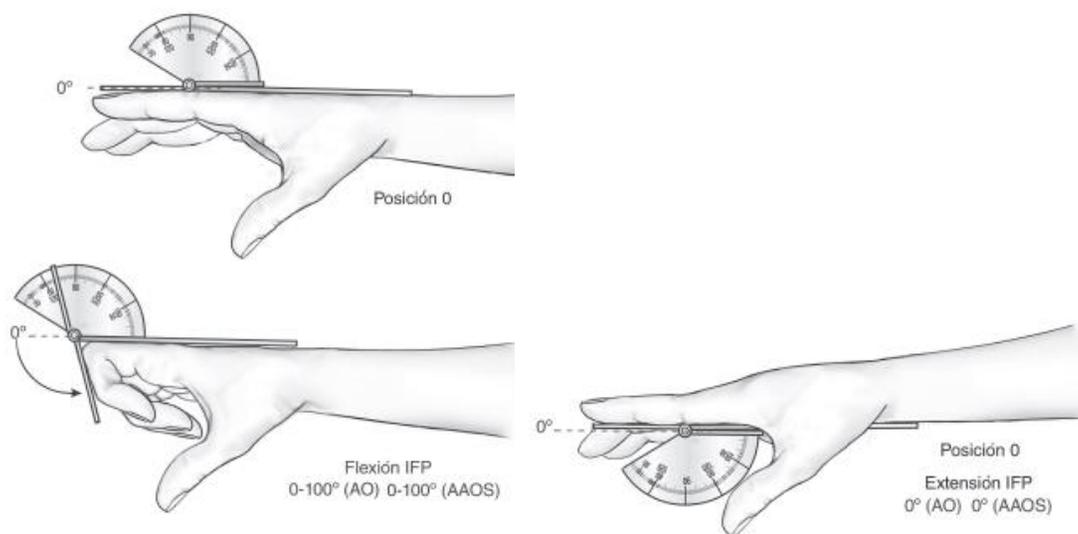
Valores normales:

Flexión MCF de los dedos de la mano: 0-90° (AO) y 0-90° (AAOS).

Extensión MCF de los dedos de la mano: 0°-30° (AO) y 0-45° (AAOS).

La evaluación de la abducción y de la aducción interfalángica de los dedos de la mano no se investiga habitualmente. Los valores normales son desconocidos.

Articulación interfalángica proximal



Flexión de la articulación interfalángica proximal del dedo índice a partir de la posición 0.

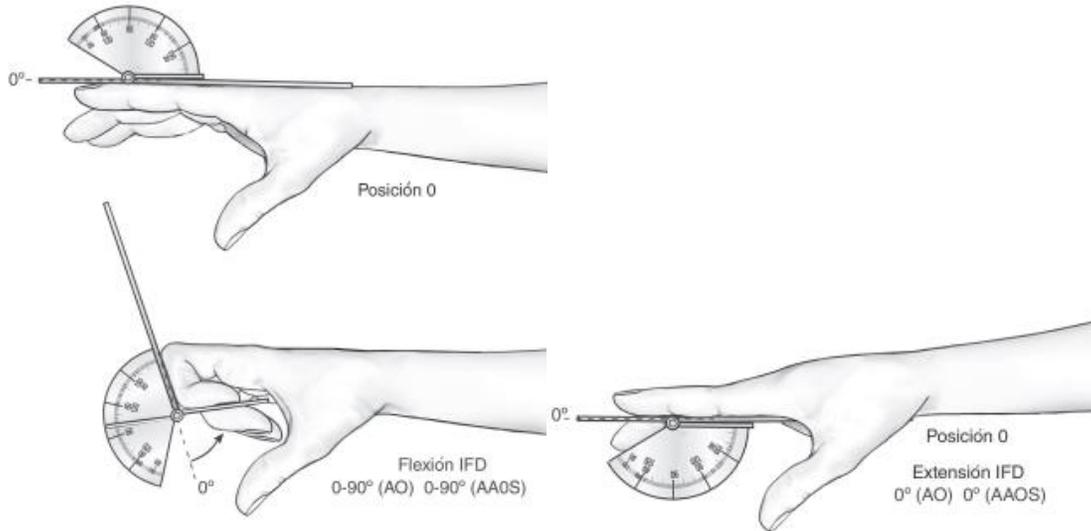
Valores normales:

Flexión IFP de los dedos de la mano: 0-100° (AO) y 0-100° (AAOS).

Extensión IFP: 0° (AO) y 0° (AAOS).

Las articulaciones IFP de los dedos de la mano no tienen movimiento de extensión.

Articulación interfalángica distal



Flexión interfalángica distal del dedo índice a partir de la posición 0.

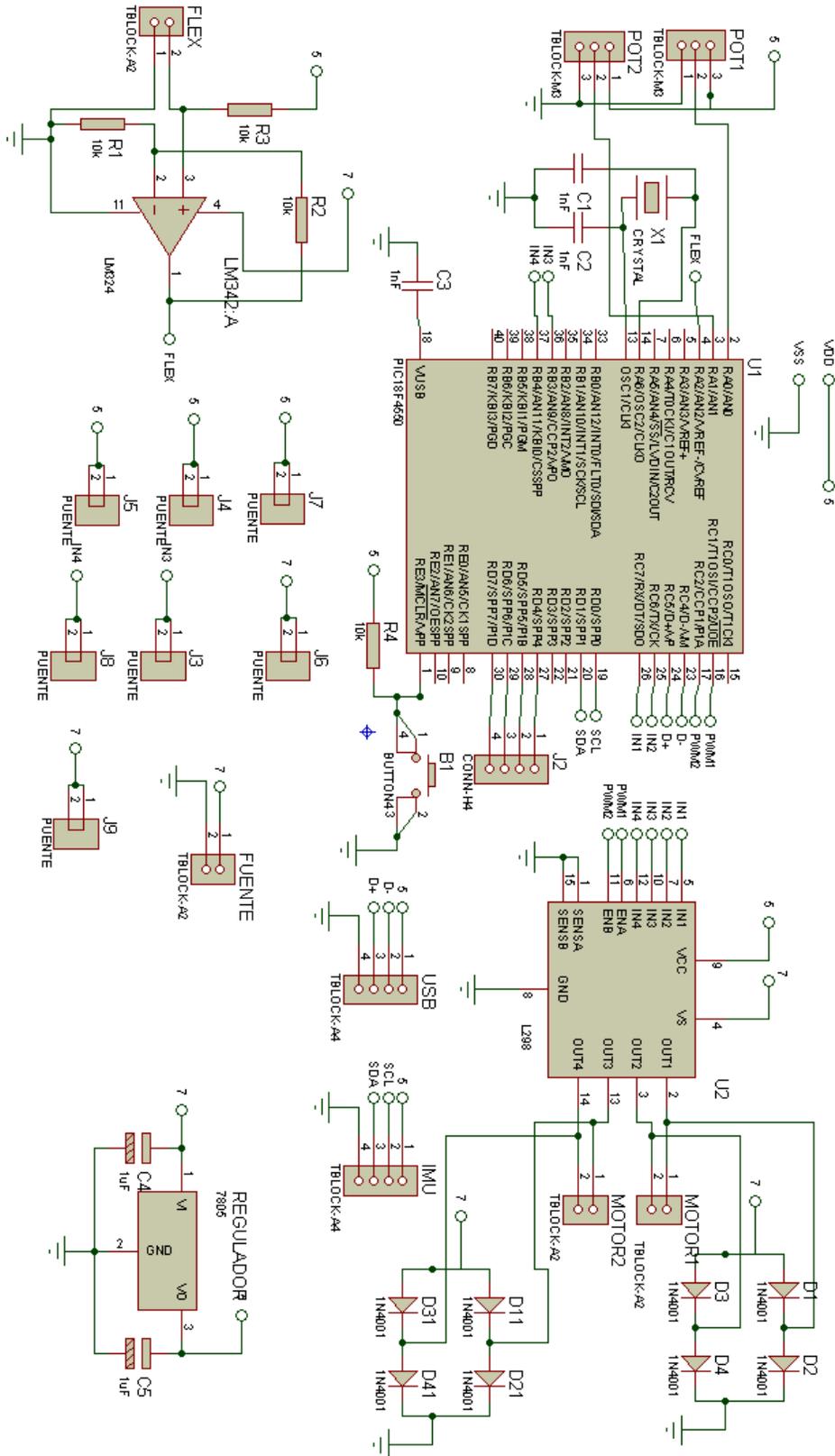
Valores normales:

Flexión IFD: 0-90° (AO) y 0-90° (AAOS).

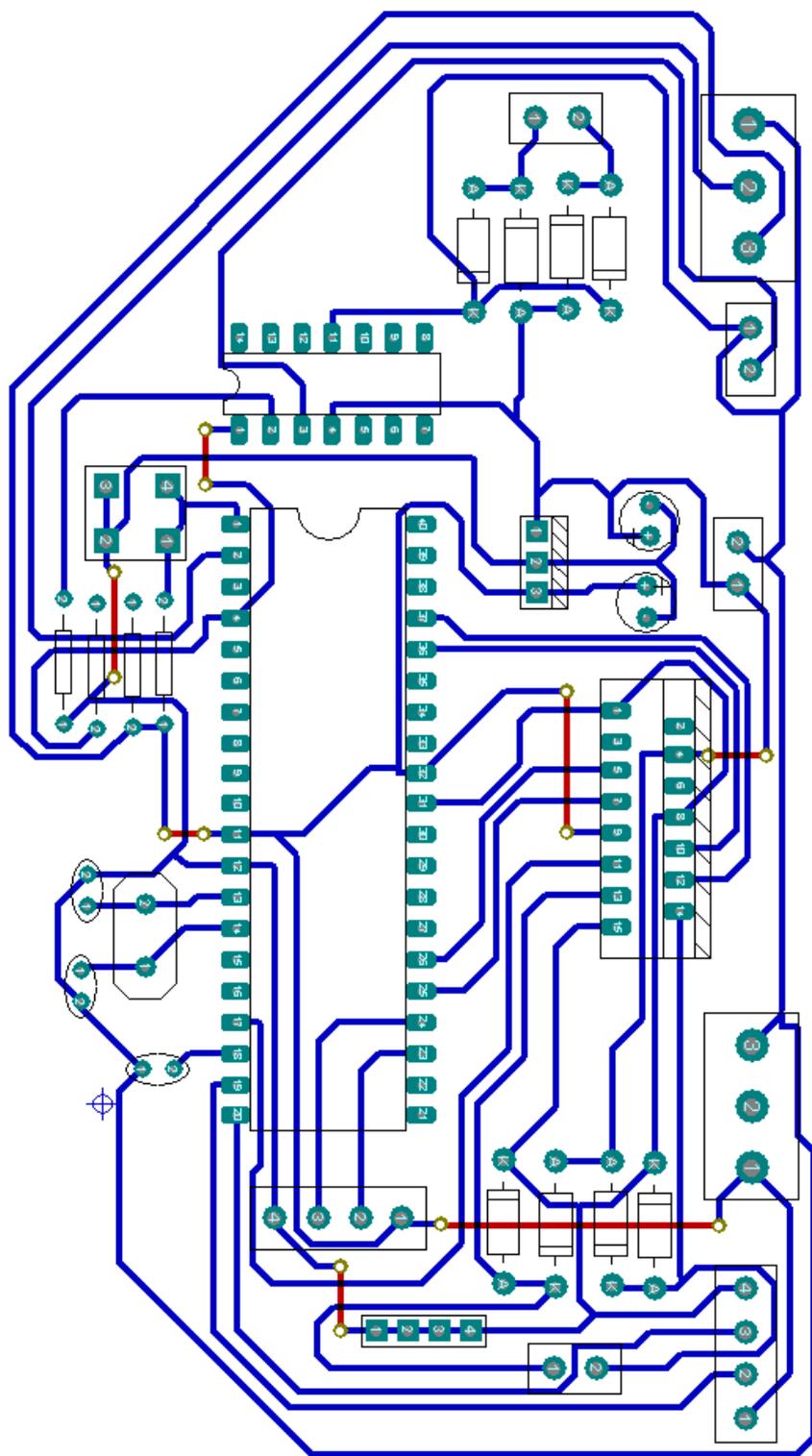
Extensión IFD: 0° (AO) y 0° (AAOS).

Las articulaciones IFD de los dedos de la mano no tienen movimiento de extensión.

ANEXO II Esquemático del circuito



ANEXO III Diagrama del circuito electrónico



ANEXO IV Cálculo del PWM en el PIC

Para realizar el cálculo se implementan las ecuaciones que se encuentran en el *datasheet* del PIC18F4550.

Ecuación 1

$$PWM_{period} = [(PR2) + 1] * 4 * T_{OSC} * (TMR2_{Pre})$$

Ecuación 2

$$PWM_{Resolution} = \frac{\log(\frac{F_{osc}}{F_{PWM}})}{\log(2)} \text{ bits}$$

De la Ecuación 1 se despeja PR2 y se obtiene:

Ecuación 3

$$PR2 = \frac{PWM_{period}}{4 * T_{OSC} * (TMR2_{Pre})} - 1$$

Para obtener el valor del periodo se utiliza la frecuencia requerida:

Ecuación 4

$$PWM_{period} = \frac{1}{PWM_f} = \frac{1}{20KHz} = 50 \text{ us}$$

Mientras que para obtener el valor del periodo del oscilador se utiliza la frecuencia utilizada:

Ecuación 5

$$T_{OSC} = \frac{1}{f_{osc}} = \frac{1}{48MHz} = 2.08 * 10^{-8}$$

El valor de TMR2 puede cambiar entre 1, 2, 4 o 16 y se elige arbitrariamente el 4.

Así se puede sustituir en la Ecuación 3 y se obtiene que:

Ecuación 6

$$PR2 = \frac{50 * 10^{-6}}{4 * 2.08 * 10^{-8} * (4)} - 1$$

$$PR2 = 149$$

Y con ese valor se puede completar la instrucción para programar el PWM.

ANEXO V Código del programa en CCS para PIC

El archivo que contiene el código completo implementado en el PIC18F4550 utilizado en el proyecto presente se encuentra en el CD de *Complementos* que se encuentra junto con el documento en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería.

ANEXO VI Código de la interfaz gráfica en C# para XNA y Unity

El archivo que contiene el código completo utilizado para interfaz completa así como los juegos desarrollados en el proyecto presente se encuentra en el CD de *Complementos* que se encuentra junto con el documento en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería.

ANEXO VII Fotografías de las pruebas realizadas

En la prueba de pronación y supinación



Se muestra la posición inicial de esta prueba, se ha marcado la muñeca para tener una referencia del giro.



Se puede apreciar el resultado del movimiento obtenido con la pronación, con 40 [°] de desplazamiento angular.



Se puede apreciar el movimiento obtenido con la supinación, con 25 [°] de desplazamiento angular.

En la prueba de aducción y abducción



En la imagen se muestra la posición inicial de la prueba de aducción y abducción. La marca está basada en la inclinación que tiene la mano con punto de referencia en el cruce de la muñeca.



En la imagen se puede observar la variación en la inclinación de la desviación radial, de aproximadamente 25 [°] de desplazamiento angular.



En la imagen se puede observar la variación en la inclinación de la variación cubital, de aproximadamente 25 [°] de desplazamiento angular.

En la prueba de flexión y extensión de los dedos



Se muestra la extensión de los dedos que será tomado como la referencia 0 [°], cabe destacar que en el caso particular del proyecto los dedos deben moverse juntos por lo que, a pesar de que el dedo índice cuente con una mayor extensión, se considera la extensión en conjunto de los dedos.



Se muestra una posición de reposo de la mano, donde se muestra una inclinación de 25 [°] con respecto a la posición inicial planteada en la articulación metacarpofalángica (conecta al metacarpo con la falange proximal).



Se muestra a la mano para realizar el movimiento que permite un agarre cilíndrico, la desviación con respecto al punto anterior varía aproximadamente 10 [°], se puede apreciar que es la articulación interfalángica proximal la que realiza el mayor desplazamiento.



Se muestra la mano realizando el agarre cilíndrico considerado el límite de movilidad del ejercicio. El desplazamiento total obtenido a partir de la posición inicial es de aproximadamente 80 [°]. Cabe señalar que las mediciones fueron realizadas sin el guante o accesorios para facilitar su visualización.