

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

Escuela de Ingeniería

Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica



Prototipo 3D e interfaz de usuario para rehabilitación de hombro tras cirugía de cáncer de
mama

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta la estudiante

Laura Valeria Pérez Herrera

152653

De la licenciatura en Ingeniería Biomédica

Asesor: Dr. Rubén Alejos Palomares

San Andrés Cholula, Puebla.

Primavera 2019

Hoja de firmas

Tesis que, para completar los requisitos del Programa de Honores presenta el
estudiante Laura Valeria Pérez Herrera, 152653

Director de Tesis

Dr. Rubén Alejos Palomares

Presidente de Tesis

Dr. José Luis Vázquez González

Secretario de Tesis

Dr. Juan Horacio Espinoza Rodríguez

Agradecimientos

Sin duda no habría podido lograr todo esto sin el apoyo de tres personas esenciales en mi vida, mis padres y mi hermano, a mis padres quiero agradecerles especialmente por todo su amor y comprensión, y a mi hermano por todos sus consejos; pero sobre todo quiero agradecerles por nunca dejarme renunciar. Todo lo que soy es gracias a ellos y todo lo que hago es para hacerlos sentir orgullosos y agradecerles todo lo que hacen por mí.

Quiero agradecerle a Dios por permitirme todo lo que he logrado, por permitirme vivir y que no me falte nada esencial en la vida.

También quiero agradecerle al Dr. Rubén Alejos Palomares por todo su apoyo y guía durante este trabajo, al igual que a todos los profesores que me enseñaron tantas cosas a largo de mi carrera. Además, a Natalia Alarcón por su ayuda en el diseño del riel y su buena disposición.

Finalmente, gracias a mi novio por estar a mi lado cada día y ayudarme a seguir adelante cuando ya no podía, gracias a mis amigos por estar conmigo y apoyarme en este camino y gracias a Fer por ser una gran amiga y por impulsarme a salir adelante, creo que es una excelente persona y espero que estemos en contacto toda la vida para que logremos cumplir nuestras metas. Creo que hacemos un gran equipo y si nos esforzamos estoy segura que podremos lograr que el mundo sea un mejor lugar.

Índice

<i>Agradecimientos</i>	3
<i>Índice de Figuras</i>	7
<i>Índice de Tablas</i>	9
<i>Resumen</i>	10
<i>Abstract</i>	11
<i>Introducción</i>	12
<i>Capítulo I. Antecedentes</i>	13
1.1 Justificación	13
1.2 Objetivos	14
1.3 Alcances y limitaciones	14
1.4 Hipótesis	15
1.5 Planteamiento del problema. Pregunta de la investigación	16
<i>Capítulo II. Cáncer de mama</i>	17
2.1 Tratamientos y consecuencias en el paciente	20
2.2 Ejercicios para rehabilitación de cáncer de mama	23
<i>Capítulo III. Complejo articular del hombro</i>	27

3.1 Anatomía del hombro	27
3.2 Osteología	27
3.2.1 Clavícula	28
3.2.2 Escápula	28
3.2.3 Húmero	29
3.3 Miología.....	29
3.4 Artrología	31
3.4.1 Articulación glenohumeral	32
3.4.2 Articulación acromioclavicular	32
3.4.3 Articulación esternoclavicular	33
3.4.4 Articulación subdeltoidea	33
3.4.5 Articulación escapulotorácica	33
3.5 Movimientos del hombro.....	33
3.5.1 Flexión/extensión	34
3.5.2 Abducción/adducción.....	34
3.5.3 Rotación interna y externa	35
3.5.4 Circunducción	36
<i>Capítulo IV. Equipos de rehabilitación, captura de movimiento y monitoreo.</i>	<i>37</i>
4.1 Dispositivos para rehabilitación de hombro	37
4.2 Dispositivos para monitoreo y captura de movimiento	40
<i>Capítulo V. Impresión 3D.....</i>	<i>44</i>
<i>Capítulo VI. Evaluación de sistema de rehabilitación previo y rediseño.....</i>	<i>52</i>

6.1 Diseño de carrito.....	59
6.2 Diseño de riel	62
<i>Capítulo VII. Diseño de interfaz para usuario con Visual Studio.....</i>	<i>67</i>
7.1 Desarrollo de la interfaz	69
<i>Capítulo VIII. Análisis e interpretación de resultados.....</i>	<i>77</i>
<i>Capítulo IX. Conclusiones y recomendaciones</i>	<i>81</i>
<i>Referencias bibliográficas</i>	<i>87</i>
<i>Anexos</i>	<i>92</i>
Anexo 1. Código para desarrollo de interfaz.....	92
Anexo 2. Planos de sistema de rehabilitación (carrito y secciones del riel)	100
2.1 Plano de carrito	100
2.2 Plano de sección 1 del riel	100
2.3 Plano de sección 2 del riel	101

Índice de Figuras

Figura 1. Anatomía de la mama.....	17
Figura 2. Ejercicios para favorecer el flujo linfático.....	24
Figura 3. Ejercicios de prevención de linfedema.....	25
Figura 4. Flexión/extensión de hombro.....	34
Figura 5. Abducción/adducción de hombro.....	35
Figura 6. Rotación interna y externa de hombro.....	35
Figura 7. Rueda de hombro.....	38
Figura 8. Loopliner.....	38
Figura 9. Curamotion.....	39
Figura 10. Equipo de rehabilitación multifuncional.....	40
Figura 11. Goniómetro.....	40
Figura 12. Marcadores reflectantes para sistema optoelectrónico.....	41
Figura 13. Sensor inercial.....	42
Figura 14. Dinamómetro.....	43
Figura 15. Etapas de impresión.....	44
Figura 16. Impresora Ultimaker Original.....	46
Figura 17. Base graduada para ejecución de movimiento.....	53
Figura 18. Gráfica del modelo.....	54
Figura 19. Plano de bases del riel.....	55
Figura 20. Primera sección del riel.....	56
Figura 21. Segunda sección del riel.....	56

Figura 22. Plano del carrito.	57
Figura 23. Riel para sistema de rehabilitación.	58
Figura 24. Carrito para sistema de rehabilitación.....	58
Figura 25. Primer prototipo de carrito.	60
Figura 26. Vistas superior, inferior y lateral de carrito.	60
Figura 27. Carrito.	61
Figura 28. Carrito con instrumentación.....	62
Figura 29 Sección 1 del riel.....	63
Figura 30. Sección 2 del riel.....	64
Figura 31. Impresión 3D de primera sección del riel.	64
Figura 32. Impresión 3D de segunda sección del riel.....	65
Figura 33. Diseño final de sistema de rehabilitación.....	66
Figura 34. Interfaz de Visual Studio.....	69
Figura 35. Opciones de niveles.....	70
Figura 36. Información al seleccionar nivel.	71
Figura 37. Información de movimiento.....	72
Figura 38. Componentes de mouse óptico.....	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación entre mastectomía parcial y total.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2. Costo de riel.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3. Costo de carrito con circuito para retroalimentación.**¡Error! Marcador no definido.**

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de rehabilitación de bajo costo para mujeres que sufrieron una cirugía por cáncer de mama que permita obtener retroalimentación de la misma, es decir, se busca proporcionar información de relevancia sobre la ejecución de un ejercicio de rehabilitación.

Para el diseño de este sistema se hizo uso de la impresión 3D y del funcionamiento de un mouse óptico para obtener información relevante del movimiento, como el número de repeticiones realizadas, la trayectoria seguida, el tiempo de ejecución del movimiento, la distancia recorrida y la velocidad a la que se realiza el movimiento.

Se logró el cumplimiento de los objetivos y de la hipótesis, al hacer un análisis de costos, se determinó que efectivamente el sistema se encuentra en un precio razonable y más bajo comparado a los sistemas de rehabilitación existentes en el mercado, cabe destacar que no existen dispositivos enfocados en la rehabilitación de cáncer de mama.

Abstract

The objective of this research is to develop a low-cost rehabilitation system for women who underwent surgery for breast cancer to obtain feedback on it, that is, to provide relevant information on the execution of an exercise in rehabilitation.

For the design of this system, 3D printing and the operation of an optical mouse were used to obtain relevant information about the movement, such as the number of repetitions made, the trajectory followed, the execution time of the movement, the distance traveled and the speed at which the movement is made.

The fulfillment of the objectives and the hypothesis was achieved, when making a cost analysis, it was determined that the system is actually at a reasonable and lower price compared to the existing rehabilitation systems in the market, it should be noted that there are no devices focused on the rehabilitation of breast cancer.

Introducción

El proyecto consiste en el diseño de un sistema de rehabilitación compuesto por (1) prototipo 3D para la rehabilitación de mujeres que han sufrido una cirugía de cáncer de mama y se encuentran en la etapa de rehabilitación e (2) interfaz gráfica de usuario que permita obtener retroalimentación de los diferentes ejercicios de rehabilitación.

El presente trabajo de investigación se divide en nueve capítulos, dentro de los cuales el capítulo I pretende contextualizar el problema de investigación, planteando la problemática a solucionar y los objetivos que se pretenden alcanzar dentro del proyecto. Los capítulos II a V forman parte del marco teórico, describiendo la información necesaria para el desarrollo del trabajo y una completa comprensión del mismo. La información presentada hace referencia al cáncer de mama, el complejo articular del hombro, los dispositivos de rehabilitación existentes en el mercado actualmente y la impresión 3D.

Posteriormente, los capítulos VI y VII presentan la metodología seguida para el diseño del sistema propuesto. Los capítulos VIII y IX describen los resultados, conclusiones y recomendaciones con lo que se busca informar sobre los posibles inconvenientes encontrados en el desarrollo del trabajo, alternativas de solución de los mismos y mejoras a implementar en el sistema desarrollado. Finalmente, se presentan los anexos con el código utilizado en el desarrollo de la interfaz de usuario y los planos del diseño 3D de cada parte del sistema de rehabilitación.

Capítulo I. Antecedentes

En este capítulo se presenta la relevancia del trabajo de tesis y el impacto social, indicando que la población a la que se encuentra dirigido corresponde a mujeres que sufrieron una cirugía por cáncer de mama y comenzarán la etapa de rehabilitación de la misma, además se plantean los objetivos del trabajo y se propone el desarrollo de un sistema de rehabilitación que permita obtener un seguimiento de las terapias.

1.1 Justificación

El cáncer de mama representa la mayor causa de mortalidad en mujeres mayores a 25 años en México, a nivel mundial se detectan 1.38 millones de casos nuevos, de los cuales 458 mil terminan en la muerte de la persona [1].

El tratamiento para cáncer de mama puede incluir cirugía, radioterapia y quimioterapia, lo cual puede resultar en dolor, limitación de movimiento, hinchazón en el brazo y debilidad muscular, factores que requieren de una rehabilitación efectiva para lograr restaurar la función normal del individuo para que éste pueda realizar sus actividades de la vida diaria de manera normal, debido a que sin tratamiento, la movilidad del hombro y brazo se van limitando.

La rehabilitación es una parte fundamental debido a que su objetivo es restaurar la función normal de la persona y permitir que pueda realizar las actividades de su vida diaria de manera normal. Sin embargo, una de las mayores limitaciones de este proceso de recuperación se encuentra relacionada directamente con esta área, pues es fundamental que el paciente realice ejercicios indicados por el terapeuta constantemente.

La presente investigación, por lo tanto, pretende desarrollar un dispositivo de rehabilitación de bajo costo que permita al paciente cumplir con los ejercicios en casa, de una manera más constante y que proporcione resultados positivos.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de investigación consiste en desarrollar un dispositivo para la rehabilitación del hombro que proporcione retroalimentación útil tanto para el terapeuta como para el paciente.

Por lo tanto, dentro de los objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- Determinar si el dispositivo considerado, inicialmente propuesto por la estudiante Natalia Alarcón Zamora [2], cumple con las características necesarias para realizar una correcta rehabilitación del hombro.
- Proponer e implementar mejoras al diseño mecánico inicial.
- Diseñar un sistema de retroalimentación fácil de manejar y con información útil.
- Proveer un sistema de rehabilitación completo que permita obtener retroalimentación y que sea de bajo costo para que se encuentre accesible a las personas que lo usen.

Todos los objetivos se basan en el propósito de que el paciente se sienta motivado a realizar sus ejercicios en casa y de esa manera se logre una recuperación completa.

1.3 Alcances y limitaciones

La fase final de este trabajo comenzó en otoño de 2018 y los resultados se están obteniendo en abril de 2019, dentro de las instalaciones de la Universidad de las Américas Puebla. Este proyecto se basó fuertemente en el trabajo previo realizado por [2], el cual se desarrolló en

coordinación con un instituto de rehabilitación y con apoyo de un terapeuta especializado en la rehabilitación por cirugía de mama.

La principal contribución respecto al trabajo inicial que consistía de un riel guía y un carrito, es dotar al carrito de un sistema de medición de la posición que permita capturar el movimiento en una computadora como meta inicial, quedando como una posibilidad capturar el movimiento en dispositivos móviles.

Dentro de las limitaciones del presente trabajo se encuentra que no ha sido validado por parte del terapeuta, la simulación del movimiento sí se realizó bajo supervisión, pero el resultado final no ha sido probado con mujeres que hayan sufrido la intervención quirúrgica previamente descrita. Por otra parte, los datos de retroalimentación proporcionados por el sistema son generales, para obtener una mejor retroalimentación deberían considerarse más parámetros como el rango de movimiento, entre otros.

Se pretende que el sistema de retroalimentación sea útil para movimientos diferentes al propuesto por el riel, de manera que se pueda contar con dos tipos de rehabilitación: (1) movimiento asistido con el riel y; (2) movimiento aleatorio únicamente con el carrito, con el cuál se podrían observar las características de los diferentes ejercicios realizados.

1.4 Hipótesis

Mediante el sistema de rehabilitación propuesto, con una parte mecánica y otra electrónica, se considera que es posible capturar el movimiento natural del brazo, con el propósito de rehabilitación y hacer una medición cuantitativa de los logros obtenidos a lo largo de la misma.

1.5 Planteamiento del problema. Pregunta de la investigación

La rehabilitación del hombro después de sufrir cáncer de mama es una tarea difícil si el paciente no realiza los ejercicios de rehabilitación correctos, debido a eso se pretende desarrollar un dispositivo de bajo costo que permita facilitar la rehabilitación de los pacientes, motivándolos mediante aplicaciones con la obtención de un progreso cuantificable para que el paciente pueda retomar su estilo de vida normal y realizar sus actividades diarias.

Actualmente existen una gran variedad de equipos destinados a la rehabilitación del hombro, sin embargo, muy pocos se encuentran destinados a la rehabilitación del mismo cuando se sufrió una cirugía de cáncer de mama, además, estos dispositivos son muy caros, lo que dificulta su acceso.

El dispositivo de bajo costo propuesto se encuentra basado en el trabajo previo de la tesis de Natalia Alarcón Zamora [2] sobre el diseño de un equipo integral de fisioterapia para personas con amputación por cáncer de mama.

Partiendo del supuesto de una cirugía de cáncer de mama ¿Es posible recuperar el movimiento natural del brazo después de haber sufrido una cirugía de cáncer de mama?

Capítulo II. Cáncer de mama

En este capítulo se hace una breve descripción de la anatomía de la mama, el cáncer de mama, sus tratamientos y consecuencias en el paciente, además se incluye la rehabilitación seguida por el paciente después de una cirugía de cáncer de mama.

Para comprender qué es el cáncer de mama y los tipos que existen es necesario conocer un poco sobre la anatomía de la mama.

Las mamas (figura 1) se encuentran ubicadas por delante de los músculos pectoral mayor y serrato anterior. Cada mama posee una proyección pigmentada que corresponde al pezón, el cual cuenta con aberturas de conductos, conductos galactóforos, que permiten el paso de la leche. Alrededor del pezón se encuentra la aréola, piel pigmentada circular, de apariencia rugosa [3].

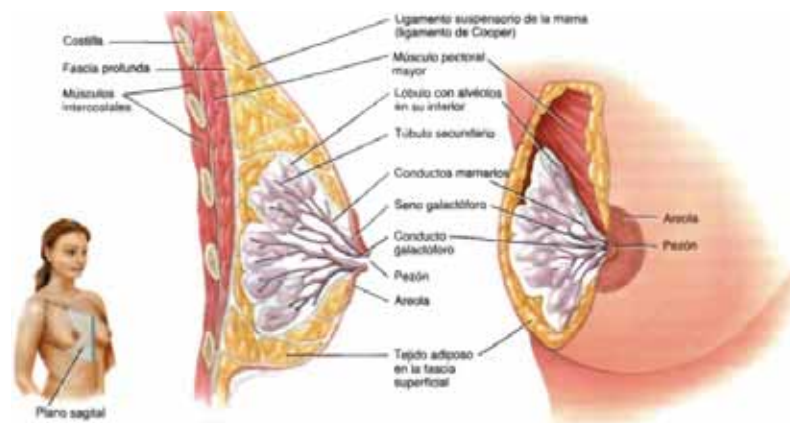


Figura 1. Anatomía de la mama.

Además, la mama cuenta con hebras de tejido conectivo que corresponden a los ligamentos suspensorios de la mama o ligamentos de Cooper, que como su nombre lo indica, sostienen a la mama [3].

La glándula mamaria se encuentra dentro de cada mama y es una glándula sudorípara modificada que se encarga de la producción de leche. Cada glándula mamaria se forma por 15 a 20 lóbulos, y cada lóbulo cuenta con compartimentos pequeños denominados lobulillos que a su vez se componen por racimos de glándulas secretoras de leche, alveolos [3].

Nuestro cuerpo contiene células que crecen y se dividen para formar nuevas células en base al ciclo celular y a las necesidades del cuerpo, por lo tanto, cuando una célula envejece o se daña, ésta se muere y nuevas células las remplazan, sin embargo, cuando hay presencia de cáncer las células se proliferan anormalmente, de acuerdo al Instituto Nacional del Cáncer:

“El cáncer es el nombre que se da a un conjunto de enfermedades relacionados. En todos los tipos de cáncer algunas de las células del cuerpo empiezan a dividirse sin detenerse y se diseminan a los tejidos del alrededor. En el cáncer el proceso ordenado de crecimiento, proliferación celular, se descontrola y conforme las células se hacen más anormales, las células viejas o dañadas que deberían morir, sobreviven y se forman células nuevas sin ser necesarias, que pueden dividirse sin interrupción y formar masas que son llamados tumores.” [4]

Muchos de los tipos de cáncer que existen forman tumores sólidos; los tumores cancerosos son malignos debido a que pueden extenderse a los tejidos cercanos o los pueden invadir y otras células cancerosas pueden desprenderse y moverse a lugares lejanos del tumor original y formar nuevos tumores en ese lugar.

El cáncer de mama, también conocido como adenocarcinoma, es una enfermedad muy frecuente en mujeres, esta enfermedad consiste en un tumor que se origina en las células y estructuras de la glándula (mama). Dependiendo de las características del tumor se puede presentar carcinoma *in situ* o carcinoma invasivo o infiltrante [5].

El carcinoma *in situ* corresponde a la proliferación celular maligna que ocurre en el interior del conducto mamario, su principal característica es que no traspasa la pared del mismo, por lo que no se presenta invasión o infiltración en el tejido que lo rodea. Este tipo de carcinoma puede subclasificarse en dos tipos que son el ductal *in situ* y lobulillar *in situ* [5].

Como su nombre lo indica el ductal ocurre dentro de un ducto, mientras que el lobulillar es dentro de un lobulillo. El segundo tipo mencionado es considerado un marcador que suele indicar cuando una mujer presenta un mayor riesgo de desarrollar cáncer de mama invasivo y también se conoce como neoplasia lobular [5].

El carcinoma invasivo o infiltrante consta de las mismas subclasificaciones, sin embargo, esta proliferación celular maligna sí traspasa la frontera anatómica del ducto o el lobulillo (dependiendo del tipo que se presente) e invade el tejido circundante [5].

El carcinoma ductal invasivo se origina en las células que revisten los conductos galactóforos y es el más frecuente de los cánceres infiltrantes. El carcinoma lobulillar, por otra parte, se origina en las células de los lobulillos mamarios y tiene una menor frecuencia [5].

2.1 Tratamientos y consecuencias en el paciente

Para el tratamiento del cáncer de mama existen diferentes opciones de tratamiento con diferentes beneficios, posibles riesgos y efectos secundarios asociados.

Los tratamientos pueden ser locales o sistémicos, el primero trata al tumor sin afectar el resto del cuerpo, mientras que el segundo hace uso de medicamentos que pueden alcanzar las células cancerosas en prácticamente cualquier parte del cuerpo [6].

Para decidir el tratamiento más adecuado es necesario considerar el tipo de cáncer de seno y la etapa en la que se encuentra.

Dentro de los tratamientos se encuentra la cirugía, radiación, quimioterapia, terapia hormonal y terapia dirigida. Sin embargo, en ocasiones se requiere del uso de más de un tipo de tratamiento, en la mayoría de las mujeres que presentan esta enfermedad suele emplearse la cirugía como parte del tratamiento [6].

La quimioterapia se utiliza en muchos tipos de cáncer y suele usarse como tratamiento sistémico debido a que los medicamentos viajan a través del cuerpo para llegar a las células del cáncer [7]. La radioterapia, por otra parte, busca curar o disminuir el tamaño de un cáncer en etapa temprana, evitar que el cáncer regrese o tratar los síntomas una vez que éste se ha propagado [8].

Existen diferentes tipos de cirugía dependiendo del objetivo de la misma. Dentro de la cirugía para extraer el cáncer de seno se presentan dos alternativas que son la cirugía con conservación del seno y la mastectomía [9].

En la cirugía con conservación del seno o mastectomía parcial únicamente se extirpa la parte del seno que presenta cáncer debido a que su objetivo es extraer el cáncer y algo de tejido normal circundante, dependiendo del tamaño y la ubicación del tumor será la cantidad que se extirpa [9].

Por otra parte, en la mastectomía se extirpa el seno en su totalidad, lo que incluye el tejido mamario y tejidos cercanos.

Dependiendo del tipo de cirugía se presentan diferentes ventajas y desventajas presentadas en la tabla 1, sin embargo, una mastectomía parcial con radiación suele ser una buena opción si el tamaño del tumor y el tipo de cáncer lo permiten [10].

Tabla 1. Comparación entre mastectomía parcial y total.

	Mastectomía	Mastectomía parcial
Ventajas	No suele requerirse tratamiento con radiación.	Se preserva la mayor parte del seno.
Desventajas		En la mayoría de los casos se necesita radiación como tratamiento adicional.

En algunas ocasiones el cáncer puede propagarse a los ganglios linfáticos axilares, localizados debajo del brazo, y esto podría ocasionar la necesidad de realizar una cirugía para extirpar ganglios linfáticos adyacentes [11].

Para conocer si el cáncer de seno se ha propagado a éstos es necesario extirpar uno o más de los ganglios y examinarlos con el microscopio. Para la extirpación de los ganglios linfáticos existen dos principales tipos de cirugía.

La biopsia de ganglio linfático centinela (SLNB) es la más utilizada actualmente, en ella, el cirujano extirpa sólo los ganglios más cercanos a donde es más probable que se extienda el cáncer inicialmente, ésta es la más utilizada debido a que disminuye el riesgo de efectos secundarios. La alternativa a esta cirugía corresponde a la disección de ganglios linfáticos axilares (ALND), en donde el cirujano extirpa muchos ganglios linfáticos [11].

Una posible consecuencia del tratamiento de cáncer de mama por cirugía y radiación suele ser el linfedema, el cual puede aparecer en algunas personas meses o años posteriores al tratamiento [12].

Para conocer qué es el linfedema primero debemos definir la linfa y un edema. La linfa es un líquido transparente que se encarga de eliminar residuos, bacterias y otras sustancias de los tejidos, éste se encuentra circulando en el cuerpo para realizar su función. Por otra parte, un edema es la acumulación de líquido [12].

El linfedema es producido por una acumulación de linfa en una zona del cuerpo, generalmente cuando una persona recibió tratamiento de cáncer de mama, éste aparece en el brazo y la mano, sin embargo, en ocasiones puede llegar a afectar tanto la mama, como la axila, el tórax y el torso [12].

El linfedema suele aparecer como consecuencia de la extirpación de ganglios linfáticos por cirugía o incluso, en ocasiones, por la radiación, debido a que éstos cortan o

dañan algunos ganglios. Conforme el tiempo pasa el volumen de linfa excede la capacidad de drenaje de las vías restantes y el líquido comienza a acumularse en las extremidades superiores produciendo hinchazón [13].

Se considera que de cada ocho mujeres que se someten a tratamiento de cáncer de mama, cuatro pueden desarrollar el linfedema inmediatamente y dentro de un plazo de cinco años el 70% u 80% lo desarrollará, cuando el procedimiento involucra la extracción de los ganglios linfáticos, la presencia de linfedema es casi un hecho [13].

Otras posibles consecuencias de la cirugía son alteraciones del aparato locomotor que ocasionaría una disminución en la movilidad del brazo o del hombro, contracturas musculares y atrofia del pectoral mayor, limitaciones en tareas que requieran fuerza de miembros superiores o precisión con la mano afectada y adherencias o fibrosis en la cicatriz. [10]

2.2 Ejercicios para rehabilitación de cáncer de mama

La rehabilitación después de haber sufrido cáncer de mama puede variar dependiendo del terapeuta, sin embargo, el objetivo de los diferentes ejercicios son los mismos. La intervención del fisioterapeuta es muy importante y debe iniciarse lo más pronto posible, debido a que se pueden crear las complicaciones previamente mencionadas como adherencias y pérdidas de movilidad en la articulación del hombro [14].

Para evitar la aparición del linfedema algunos especialistas recomiendan el uso de programas de entrenamiento con pesas de intensidad progresiva, es decir, se comienzan los ejercicios con pesas muy livianas y se va aumentando el peso gradualmente. De esta manera

se logra disminuir la aparición del linfedema en personas con riesgo permitiendo soportar mejor los esfuerzos diarios que conducen a éste [15].

Después de la intervención quirúrgica, el fisioterapeuta debe iniciar una serie de ejercicios que ayuden a la prevención del linfedema, es necesario que se comience con ejercicios respiratorios y conforme se avanza se introduzca un mayor número de ejercicios, como los mostrados en las figuras 2 y 3 [16].

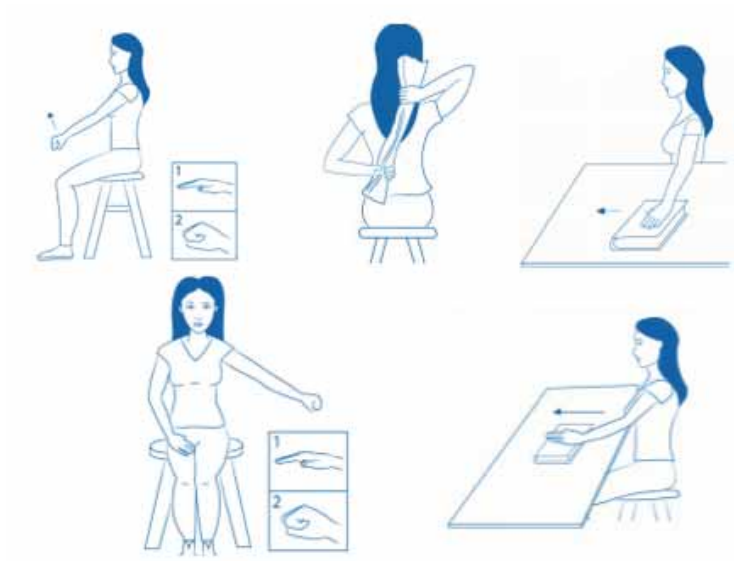


Figura 2. Ejercicios para favorecer el flujo linfático.

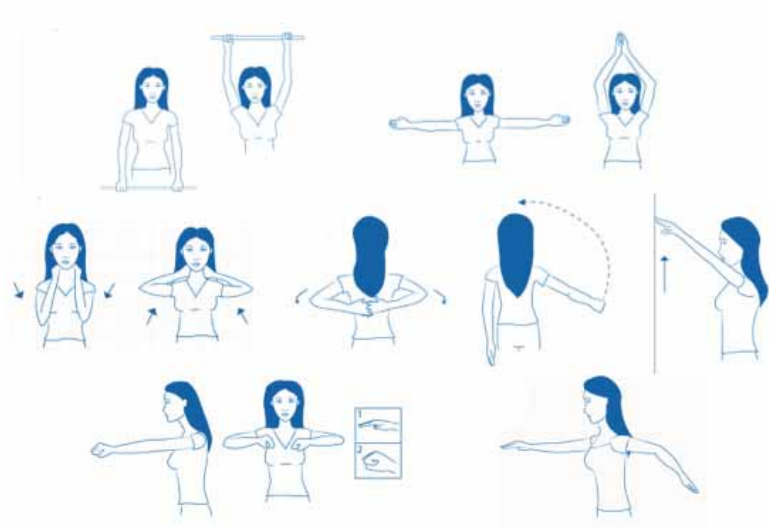


Figura 3. Ejercicios de prevención de linfedema.

La rehabilitación juega un papel fundamental debido a que a las mujeres que sufrieron una cirugía les resulta mucho más complicado realizar movimientos normales, además cuando la cirugía involucra la extirpación de ganglios o tejidos que ayudan al movimiento natural del brazo, realizar el movimiento se vuelve mucho más complejo.

De acuerdo a la American Cancer Society cualquier procedimiento como biopsia de seno, extirpación de ganglios linfáticos, cirugía de conservación del seno, mastectomía o reconstrucción del seno puede afectar al movimiento del hombro y brazo, además de a respirar profundamente o realizar actividades cotidianas como peinarse y vestirse. Estos procedimientos ocasionan un dolor y rigidez que causa debilidad y limita el movimiento del brazo y hombro [14].

Cuando la persona se somete a radioterapia después de la cirugía es aún más importante la ejecución de ejercicios que permitan preservar la flexibilidad del brazo y el

hombro. En la mastectomía radical se hace una extirpación de seno, ganglios linfáticos axilares y músculos pectorales, sin embargo, esta cirugía ya no es tan común.

Los músculos que comúnmente se ven afectados después de una cirugía de cáncer de mama son principalmente los pectorales y en menor medida el deltoides y el trapecio superior. El pectoral mayor se encuentra involucrado en muchos movimientos como la aducción, flexión, extensión y rotación interna, mientras que el deltoides se relaciona con la abducción, flexión y rotación externa, y el trapecio superior con la circunducción (movimiento del hombro).

Capítulo III. Complejo articular del hombro

En este capítulo se presenta la anatomía del hombro obtenida de [3], presentando una descripción de los principales músculos, huesos y articulaciones que conforman la articulación de éste, y se define el tipo de articulación que es cada una de ellas. Finalmente, se muestran los cuatro tipos de movimientos que corresponden a la flexión/extensión, abducción/aducción, rotación interna/externa y circunducción (combinación de los tres movimientos anteriores).

3.1 Anatomía del hombro

El miembro superior se caracteriza por su movilidad y capacidad para realizar acciones motoras finas como lo son la manipulación, éste se conforma por cuatro segmentos que son el hombro, brazo, antebrazo y mano. El hombro, entre otras articulaciones del miembro, se encarga de situar la mano en la posición adecuada para que ésta realice la función deseada.

El hombro es el segmento proximal del miembro que se encarga de unirlo al tronco y es la articulación más móvil e inestable del cuerpo humano. La amplitud de movimiento con la que cuenta se distribuye en tres articulaciones diartrodiales que son la glenohumeral, acromioclavicular y esternoclavicular [17].

A continuación, se detallarán la osteología, miología y artrología del hombro.

3.2 Osteología

La articulación del hombro se compone de tres estructuras óseas que son la escápula, la clavícula y el húmero. Del húmero surgen el troquín y el troquíter, mientras que de la escápula se pueden resaltar la apófisis coracoides, el acromion y la espina de la escápula. [17]

3.2.1 Clavícula

La clavícula es un hueso largo, par, asimétrico, que se encuentra situado entre el acromion y el manubrio del esternón, sobre la primera costilla y conecta al miembro superior con el tronco. Cuenta con dos caras (superior e inferior), dos bordes (anterior y posterior), y dos extremidades (interna y externa). Este hueso se encuentra directamente relacionado con la articulación acromio-clavicular, mediante la extremidad externa.

3.2.2 Escápula

La escápula es un hueso triangular plano que se encuentra en la cara posterolateral del tórax y descansa sobre las costillas 2 y 7. La función principal de ésta es actuar de anclaje para la inserción muscular. Cuenta con dos caras y tres bordes, y es más gruesa en los lugares en que se insertan los músculos más potentes, como los ángulos superior e inferior y el borde lateral. La cara anterior es cóncava y se conoce como fosa subescapular porque está ocupada por ese músculo.

De la escápula surgen la apófisis coracoides, la espina de la escápula y el acromion. La apófisis coracoides está unida a la parte superior de la escápula en una posición lateral. De ella surgen los tendones de la cabeza corta del bíceps y del coracobraquial. La espina de la escápula divide la superficie posterior de la escápula y forma las fosas supra e infra espinosas, que se encuentran ocupadas por los músculos del mismo nombre. El acromion es la apófisis de la escápula más estudiada ya que es de las regiones más patológicas.

3.2.3 Húmero

El húmero (hueso del brazo) es el hueso más grande del miembro superior, se articula con la escápula en la articulación del hombro y con el radio y la ulna en la articulación del codo.

El húmero presenta un cuerpo y dos extremidades, se estudian tres caras una antero medial, una antero lateral y la cara posterior. Sin embargo, la extremidad superior es la única relevante para este estudio, ya que es la que se encuentra directamente involucrada con el hombro.

Del húmero surgen el troquín y el troquíter, tubérculos menor y mayor, respectivamente. El tubérculo menor o troquín se encuentra insertado en el tendón del músculo subescapular y el tubérculo mayor o troquíter se encuentra insertado en el tendón supraespinoso, infraespinoso y redondo menor (manguito rotador). Ambas tuberosidades se encuentran separadas por el canal bicipital, que es donde pasa la porción larga del bíceps braquial.

Debajo de las tuberosidades se encuentra el llamado cuello quirúrgico del hombro, el cual es una región con una alta frecuencia de fracturas.

3.3 Miología

El miembro superior está unido al esqueleto axial por la cintura escapular. Los principales elementos estabilizadores son los músculos periarticulares que intervienen en diferentes grados del movimiento. Estos músculos representan más de la mitad del peso de toda la masa muscular del miembro superior y cuentan con gran relevancia por la necesidad de realizar grandes fuerzas [18].

A continuación, se presenta la información resumida sobre los principales músculos del hombro.

- El **romboide** se encarga de la abducción, flexión y rotación del brazo medialmente, además de la extensión y rotación lateralmente; por lo tanto, es un músculo aductor, rotador externo y retropulsor. La estructura ósea que mueve corresponde a la escápula.
- El **trapecio** se encarga del desplazamiento hacia delante de la escápula, por lo que es un tipo de músculo aductor, rotador externo y retropulsor. La estructura ósea que mueve corresponde a la escápula.
- El **serrato anterior** se encarga del desplazamiento hacia delante de la escápula y contribuye a la rotación de la misma en dirección superior, éste es un músculo rotador interno y antepulsor. La estructura ósea que mueve corresponde a la escápula.
- El **pectoral menor** se encarga del desplazamiento hacia delante de la escápula y es un tipo de rotador interno. La estructura ósea que mueve corresponde a la escápula.
- El **deltoides** es un tipo de músculo antepulsor y retropulsor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **redondo menor** se encarga de la estabilización de la cabeza humeral y de la rotación lateral del brazo, es un tipo de rotador externo y retropulsor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **pectoral mayor** participa en la flexión, extensión y aducción, además de intervenir en la rotación interna contra la resistencia; debido a ello se considera un tipo de

músculo aductor, rotador interno y antepulsor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.

- El **subescapular** se encarga de la rotación medial del brazo y de ayudar en la estabilización de la cabeza humeral en la cavidad glenoidea. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **supraespinoso** se encarga de la estabilización de la cabeza humeral y de comenzar la abducción, debido a ello se considera un tipo de músculo aductor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **infraespinoso** se encarga de la estabilización de la cabeza humeral y de la rotación lateral del brazo, el tipo de músculo es rotador externo. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **redondo mayor** realiza la aducción y rotación del brazo medialmente; por lo tanto, se considera un aductor, rotador interno y retropulsor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **dorsal ancho** se encarga de la rotación interna y aducción del húmero, además de realizar la extensión del hombro. El tipo de músculo al que corresponde es aductor, rotador interno y retropulsor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.
- El **coracobraquial** realiza la flexión y aducción del hombro y es considerado un antepulsor. La estructura ósea que mueve corresponde al húmero.

3.4 Artrología

El hombro cuenta con cinco articulaciones principales de las cuales tres se consideran articulaciones verdaderas y dos pseudo articulaciones. Una articulación para ser verdadera

debe cumplir características tanto fisiológica como anatómicamente, sin embargo, hay articulaciones que no cumplen las características anatómicas y es lo que ocasiona que se consideren articulaciones falsas. [17]

Una articulación verdadera cuenta con dos superficies óseas articuladas entre sí, del punto de vista anatómico, mientras que fisiológicamente debe tener dos superficies deslizantes entre sí. Las articulaciones verdaderas del hombro son la glenohumeral, la acromioclavicular y la esternoclavicular; entre las articulaciones falsas se encuentran la subdeltoidea y la escapulotorácica. [17]

3.4.1 Articulación glenohumeral

La articulación glenohumeral, también conocida como escapulohumeral, se encuentra formada por el húmero y la escápula. Su relación se puede comparar a la de una pelota dentro de una copa de boca ancha, esferoidal y multiaxial, y es debido a su forma que posee gran movilidad.

Esta articulación es la principal del hombro y cuenta con una gran amplitud de movimiento, su función principal consiste en dar movilidad al miembro superior. Además, se clasifica dentro de las articulaciones diartrodiales debido a que se forma por dos superficies óseas unidas con un amplio rango de movimiento y estabilidad.

3.4.2 Articulación acromioclavicular

La articulación acromioclavicular se encuentra formada por la unión entre la clavícula y la escápula. Esta articulación puede desplazarse en dos direcciones que son anterior/posterior y

superior/inferior. La estabilidad de esta articulación se debe a estabilizadores estáticos y dinámicos, ligamentos y músculos respectivamente [19].

3.4.3 Articulación esternoclavicular

La articulación esternoclavicular, también conocida como esternocostoclavicular, se encarga de facilitar la movilidad de la cintura escapular. Esta articulación cuenta con una gran estabilidad debido a fuertes ligamentos que la unen a la primera costilla [19].

3.4.4 Articulación subdeltoidea

Esta articulación se forma por la cabeza del húmero y el acromion, se encuentra debajo del deltoides y actúa en la separación y flexión del hombro. Entre los dos segmentos se cuenta con una bolsa serosa que impide el contacto y el cizallamiento, cuando se presenta una lesión se produce cicatrización que ocasiona la unión de las estructuras adyacentes generando que la articulación se fije [20].

3.4.5 Articulación escapulotorácica

Esta articulación es parte de las no verdaderas y se forma por la escápula y el tórax, su movimiento depende de las articulaciones acromioclavicular y esternoclavicular [21].

3.5 Movimientos del hombro

Como se ha mencionado en numerosas ocasiones, el hombro cuenta con una gran amplitud de movimiento, dentro de los cuales se encuentran flexión/extensión, abducción/aducción, rotación externa/interna y circunducción.

3.5.1 Flexión/extensión

Estos dos movimientos se efectúan sobre el plano sagital que corresponde a un plano vertical que atraviesa longitudinalmente el cuerpo y lo divide en dos mitades, derecha e izquierda [3].

La extensión es un movimiento de poca amplitud de 45° a 50° , mientras que la flexión es de gran amplitud, de hasta 180° [27]. La flexión corresponde a un movimiento de disminución del ángulo entre los huesos o partes del cuerpo y la extensión al aumento del mismo. Ambos movimientos se presentan en la figura 4.

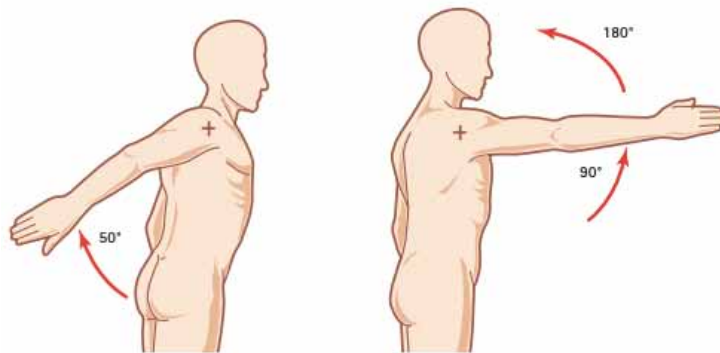


Figura 4. Flexión/extensión de hombro.

3.5.2 Abducción/adducción

La abducción y aducción (figura 5) se realizan en el plano frontal que corresponde a un plano vertical que atraviesa el cuerpo en ángulo recto con plano medio y lo divide en dos partes: anterior (frontal) y posterior (dorsal) [3].

La abducción cuenta con una amplitud de 180° que hace al brazo quedar vertical por arriba del tronco, mientras que la aducción alcanza entre 30° y 45° [22]. Es importante definir

que la abducción es alejamiento del plano medio y la aducción hace referencia al acercamiento hacia el cuerpo.

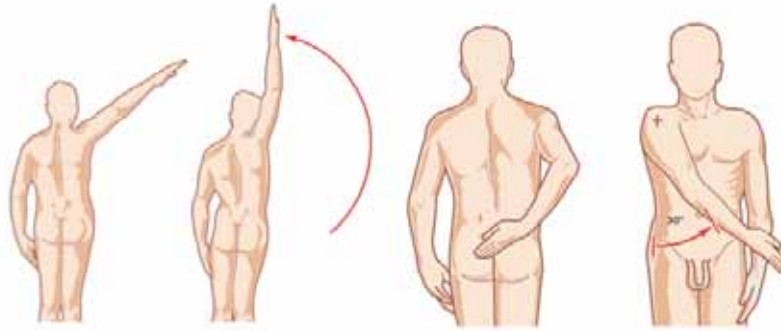


Figura 5. Abducción/aducción de hombro.

3.5.3 Rotación interna y externa

La rotación del brazo (figura 6) se trata de la rotación voluntaria de las articulaciones con tres ejes y tres grados de libertad. La rotación externa cuenta con una amplitud de 80° , mientras que la interna con una de 100 a 110° , sin embargo, para alcanzar esta rotación el antebrazo debe pasar por detrás del tronco [22].

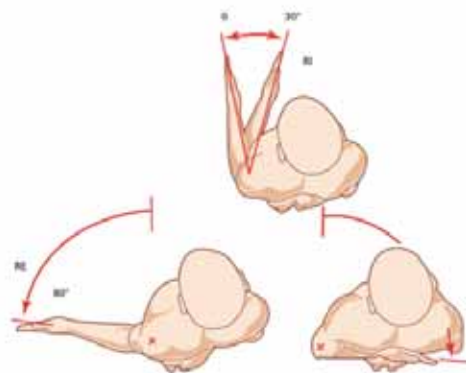


Figura 6. Rotación interna y externa de hombro.

3.5.4 Circunducción

La circunducción del hombro es la combinación de cuatro de los movimientos articulares previamente mencionados, es decir, combina la flexión, abducción, extensión y aducción.

Capítulo IV. Equipos de rehabilitación, captura de movimiento y monitoreo.

En este capítulo se busca presentar información acerca de los diferentes equipos de rehabilitación que existen y son comúnmente utilizados en la rehabilitación de la articulación del hombro, además se describen los diferentes sistemas de captura de movimiento y monitoreo que permiten obtener una retroalimentación objetiva de la rehabilitación.

En la actualidad existen una gran variedad de dispositivos que asisten la rehabilitación del hombro, sin embargo, no se encontró alguno con el fin específico de asistir su rehabilitación después de haber sufrido una cirugía de cáncer de mama, en la sección *4.1 Dispositivos para rehabilitación de hombro* se describirán brevemente alguno de estos dispositivos.

Adicionalmente, debido a que con el dispositivo propuesto se busca proporcionar una retroalimentación útil tanto para el paciente como para el terapeuta es necesario conocer de los dispositivos actuales que permiten la recuperación de información importante como el rango de movimiento, fuerza, resistencia muscular, entre otros. Esta información se presentará de manera resumida en la sección *4.2 Dispositivos de monitoreo y captura de movimiento*.

4.1 Dispositivos para rehabilitación de hombro

Dentro de estos dispositivos probablemente el más utilizado por las clínicas de rehabilitación consiste en la rueda de hombro (figura 7) debido a que ésta permite trabajar el hombro simulando todos los movimientos, además de que se puede agregar resistencia para lograr

ejercitar y aumentar la amplitud de los movimientos. Su costo es de 14,760.08 pesos mexicanos [23].



Figura 7. Rueda de hombro.

Otro dispositivo conocido como Loopliner (figura 8) permite el movimiento del hombro mediante una secuencia de movimientos, en otras palabras, se cuenta con un patrón de alambre y una pieza sobre el que debe recorrer toda la secuencia, este dispositivo se utiliza para recuperación de lesiones o enfermedades de hombro, permitiendo un movimiento controlado con un radio de 40 a 80°. Su costo aproximado es de 2,852.73 pesos mexicanos [24].



Figura 8. Loopliner.

Curamotion (figura 9) es un dispositivo similar a la rueda de hombro que permite trabajar la articulación del hombro de manera que se aumente la amplitud de movimiento, se logra un fortalecimiento muscular y una mejora en la circulación. Este dispositivo además cuenta con una pantalla informativa. Su costo aproximado es de 11,468.43 pesos mexicanos [25].



Figura 9. Curamotion.

Finalmente, otro dispositivo que asiste en la rehabilitación de esta articulación es un equipo de rehabilitación funcional (figura 10) el cual es adaptable a las necesidades del paciente debido a que puede construirse de diferentes formas logrando una gran variedad de movimientos. Es útil para realizar movimientos de aducción/abducción y para aumentar la amplitud del movimiento conseguida al levantar el brazo. Su costo aproximado es de 14,235.98 pesos. [26]

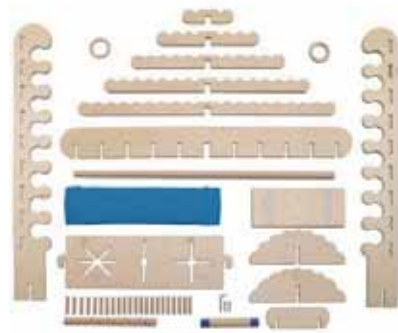


Figura 10. Equipo de rehabilitación multifuncional.

4.2 Dispositivos para monitoreo y captura de movimiento

Una herramienta muy importante para la fisioterapia es el rango de movimiento (ROM) de las articulaciones, para lo que el goniómetro es el instrumento más utilizado, éste tiene forma de semicírculo o círculo graduado en 180 ó 360° y se utiliza para medir ángulos de manera objetiva. El goniómetro se observa en la Figura 11 y cuenta con dos brazos articulados que se unen en el centro del semicírculo graduado, previamente mencionado [27].

Para la medición del ángulo de se ubican los brazos del goniómetro sobre el eje medio de los huesos proximal y distal de la articulación que desea medirse, de esta manera el centro se encuentra en el centro del goniómetro sobre el eje del movimiento a realizar [27].



Figura 11. Goniómetro.

Para la medición de los rangos de movimiento actualmente se cuenta con otras tecnologías, como lo son el uso de sistemas optoelectrónicos basados en vídeo y de sensores inerciales.

Los sistemas optoelectrónicos actualmente están comenzando a ser muy utilizados especialmente en el análisis de la marcha. El sistema funciona mediante el uso de marcadores esféricos reflectantes que se deben colocar en la persona en puntos anatómicos específicos dependiendo de lo que se desea medir (figura 12). Una vez que se colocan los marcadores, las cámaras infrarrojas recogen la reflexión sobre los marcadores y se logra la grabación tridimensional de las regiones corporales [28].

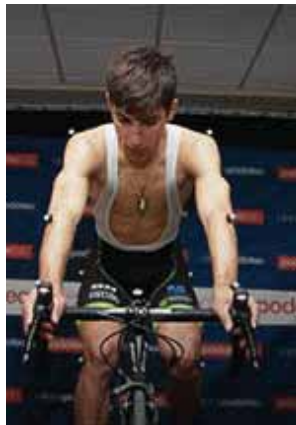


Figura 12. Marcadores reflectantes para sistema optoelectrónico.

Una desventaja del sistema previamente descrito es que debido a las cámaras infrarrojas es necesario que la medición se realice dentro de un laboratorio y que no haya luces que puedan reflejar y tomarse como un marcador, entre otros aspectos. Es precisamente debido a estos problemas que los sensores inerciales están comenzando a utilizarse en mayor medida.

Los sensores inerciales (figura 13) pueden ser de diferentes tipos, uno de éstos cuenta tanto con acelerómetros como con giroscopios y se denominan Unidad de Medida Inercial. La función del giroscopio es medir el movimiento angular, mientras que la del acelerómetro consiste en medir la aceleración, lo que se logra mediante una masa que se encuentra suspendida sobre un muelle en el interior del acelerómetro, que al existir una fuerza externa (movimiento) la masa se desplazará hasta equilibrar el muelle con la fuerza, el sensor interno entonces se encargará de medir el desplazamiento y traducirlo a aceleración [29].

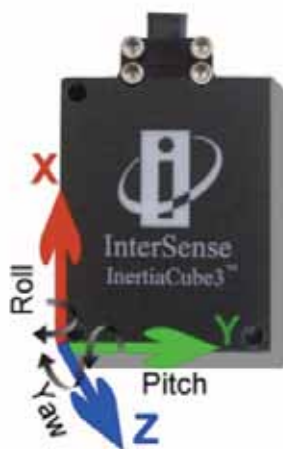


Figura 13. Sensor inercial.

Además del rango de movimiento, otro valor de relevancia para la fisioterapia consiste en la fuerza y la resistencia muscular de una persona, para obtener estos valores objetivamente suele utilizarse un dinamómetro.

El dinamómetro (figura 14) se usa para medir la fuerza y la resistencia estática de los músculos de prensión. Existen diferentes tipos de dinamómetros, el más común es el manual

que cuenta con una manija ajustable y se adapta al tamaño de la mano, este permite realizar mediciones entre 0 y 100 kg [30].



Figura 14. Dinamómetro.

Capítulo V. Impresión 3D

En este capítulo se presenta una definición de la impresión 3D, debido a que el sistema propuesto se diseña por medio de esta técnica, además se presenta la metodología normalmente seguida para lograr el diseño e impresión de un prototipo y los diferentes tipos de métodos para la impresión. El presente capítulo se basa en la teoría provista por [31].

La impresión 3D es una técnica para creación de prototipos rápidos que nos permite fabricar objetos de manera distinta a las formas tradicionales como son la sustracción de materia hasta formar la pieza final, combinación de materiales y deformación de la materia para adquirir la forma deseada.

Por otra parte, la impresión 3D permite reducir la cantidad de herramientas y materiales a utilizar debido a que la pieza es creada en un solo paso, capa por capa, a un ritmo medio de aproximadamente dos centímetros de altura por hora. A pesar de que existen una gran variedad de procesos de impresión 3D, todos se basan en la creación de objetos por superposición de capas sucesivas, denominado fabricación aditiva, debido a que la creación se realiza mediante la adición de materia, un ejemplo de este proceso se muestra en la Figura 15.

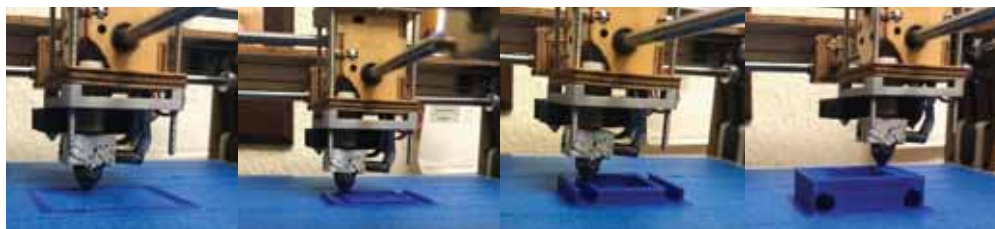


Figura 15. Etapas de impresión.

Para poder realizar la impresión de una pieza es necesario hacer uso de una impresora 3D, la cual puede ser de diferentes tamaños, aspectos, y programas informáticos, que permiten preparar el archivo 3D del objeto a fabricar y controlar la máquina durante la impresión. La impresora 3D se puede definir como una máquina capaz de fabricar un objeto físico a partir de un modelo 3D.

Los materiales más utilizados actualmente son los plásticos y metales, sin embargo, también se puede imprimir con cerámicas y materias orgánicas; cada material se encuentra relacionado con un proceso de fabricación aditiva. Para lograr la impresión 3D se puede hacer uso de diferentes técnicas de impresión, las cuales pueden ser clasificadas en tres grandes grupos que son: 1) procesos basados en fotopolimerización (material líquido que se solidifica por la acción de la luz) 2) procesos basados en ligar polvo y 3) procesos basados en depósito progresivo de material.

La técnica basada en depósito progresivo de material es conocida como FDM (Fuse Deposition Modelling, Depósito de Filamento Fundido en español) y fue desarrollada en 1980 por S. Scott Crump. La técnica consiste en el depósito progresivo de un filamento de plástico o metal, lo cual se logra mediante el uso de una boquilla de extrusión por donde pasa el filamento, el depósito de material se realiza siguiendo el trazado definido por el archivo CAD y la temperatura que se utiliza es superior a 185 grados centígrados para lograr fundir el material conforme se avanza en la impresión; el material se deposita en capas muy finas, de aproximadamente 0.04 mm de grosor, por lo tanto, el material se construye capa por capa, desde la base hasta la cima.

Dentro de los materiales utilizados por esta técnica se encuentran los termoplásticos, como ABS o PLA (poliácido láctico). La calidad de la impresión, el costo y la elección del material de esta técnica depende en gran medida del tipo de máquina utilizada. Dentro de las principales ventajas de la FDM se encuentra su facilidad de uso y versatilidad, además de ser una técnica más rápida comparada con otras. Sin embargo, también existen una serie de desventajas como lo son la precisión, en ocasiones no tan adecuada, y la manipulación del filamento que en ocasiones es complicada.

Actualmente existen una gran variedad de impresoras en un rango muy amplio de precios dependiendo de su objetivo, el cuál puede ser personal, para particulares que desean fabricar piezas en su hogar, profesionales, y de producción. La impresora utilizada para este proyecto es una Ultimaker Original, mostrada en la Figura 16, de la compañía Ultimaking, la cual cuenta con una gran velocidad de desplazamiento del extrusor, entre 30 y 300 mm/s, un gran volumen de impresión y proporciona una buena calidad de impresión.

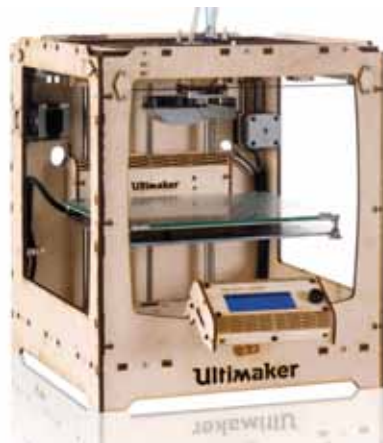


Figura 16. Impresora Ultimaker Original.

Como se mencionó previamente el material a utilizar depende en gran medida del tipo de impresora, debido a que dependiendo de la técnica se admiten materiales específicos.

Dentro de los materiales de impresión de plástico más utilizados son ABS, PLA, PET, poliamida, PMMA y PC.

El PLA se funde a una temperatura entre 160 y 220 grados centígrados y generalmente es más difícil de manipular que el ABS debido a que se suele enfriar y endurecer con rapidez. Sin embargo, también posee la ventaja de no requerir una bandeja de impresión térmica, la impresión se hace directamente en una placa acrílica o en una plataforma de madera recubierta de adhesivo.

Otra ventaja del PLA es que al originarse del almidón de maíz no usa ninguna energía fósil y posee excelentes propiedades medioambientales, como biodegradabilidad y compostabilidad. Este material puede ser de diferentes colores como negro, blanco, rojo, amarillo, verde e incluso transparente.

Para realizar la impresión 3D de un objeto es necesario seguir un proceso que consta de 3 etapas:

1. Creación o descarga de modelo 3D
2. Exportación de modelo 3D a formato STL
3. Laminado del archivo STL y exportación a la impresora

El primer paso consiste en la creación o descarga del archivo, el cual hace referencia a un modelo virtual del artículo a imprimir y se conforma por aristas, vértices y diferentes formas como triángulos o polígonos. Para la creación de este archivo se requiere de un programa de modelado 3D, de un escáner 3D o de un sitio web que permita realizar intercambio de archivos.

Algunos de los programas existentes para realizar el modelado 3D son AutoCAD, Blender, CATIA, Maya, SolidWorks, Creo Parametric, entre otros; el programa a utilizar se encuentra comúnmente relacionado al ámbito al que se encuentra dirigido como ingeniería, arquitectura, diseño, animación, etc.

Dentro de los modeladores 3D se encuentran tres clasificaciones que corresponden a los modeladores de volumen, modeladores de superficie y modeladores paramétricos. Los modeladores de volumen consisten en la definición y composición de objetos utilizando cuerpos geométricos básicos como cubos y esferas, y se conocen como sólidos 3D, este tipo de modelado es comúnmente utilizado en piezas mecánicas y permite la adición y sustracción de material.

Los modeladores de superficie suelen emplearse para formas orgánicas y se basa en la definición matemática de la envoltura del objeto. Finalmente, los modeladores paramétricos permiten la creación de modelos 3D mediante programación, es decir, la definición de los objetos se hace comúnmente mediante ecuaciones cuyos parámetros son fácilmente modificables.

Como se indicó previamente, otra forma de adquisición de un modelo 3D se basa en el escaneo 3D, el cual suele requerir de un proceso de eliminación de ruido y datos parásitos, triangulación de una nube de puntos, orientación de normales, cierre de las caras y reparación de superficie. El escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto y su entorno para la recolección de datos precisos sobre su forma y en ocasiones su apariencia. La mayoría de los escáneres hacen uso de técnicas ópticas donde se miden la posición de una muestra de puntos y posteriormente se realiza una extrapolación a partir de la nube de puntos. La operación se

repite una gran cantidad de veces desde diferentes perspectivas y de esta manera se logra la eliminación de zonas de sombras y ángulos muertos.

El tercer método de adquisición de un modelo 3D mencionado consiste en el uso de un archivo 3D ya existente, actualmente, existen una gran variedad de sitios web de intercambio de modelos de objetos.

El segundo paso consiste en la exportación al formato STL que se encarga de describir la geometría de superficie del objeto en 3D por medio de un mosaico de triángulos, donde cada uno comparte dos aristas con los triángulos adyacentes. El tercer y último paso antes de la impresión es el laminado del archivo STL donde pasa por un software (slicer) que lo secciona en láminas de arriba abajo y realiza las indicaciones de la impresión, como el posicionamiento de la pieza, grosor de la capa, cantidad de material a depositar, velocidad del extrusor, velocidad del desplazamiento, temperatura de impresión, densidad de llenado de los objetos, localización de soporte, entre otros. Una vez que se obtiene este archivo codificado se coloca en la impresora.

Dependiendo de la especificación de algunas de las propiedades previamente indicadas es el tiempo de impresión o la calidad del objeto. La resolución hace referencia al grosor de las capas de material depositado y mientras más fina sean, más láminas se deben calcular y más lenta se realiza la impresión. La densidad indica la cantidad de material y se recomienda especificar en base al uso final de la pieza debido a que es necesario considerar aspectos como tensión a la que será sometido, si se carece de ésta, la densidad puede ser muy baja, al aumentar la densidad del material, el tiempo de impresión también incrementa.

El soporte o raft suele ser necesario en la técnica FDM, éste es una rejilla de fabricación sobre la cual se construye el modelo y se calcula mediante el *slicer*, donde el objetivo consiste en proveer de mayor estabilidad a la impresión. Otra utilidad del soporte es en el objeto donde puede funcionar como andamiaje. Dentro de los softwares de laminados más utilizados se encuentran Slicer, Cura, Skeinforge, entre otros.

Una vez que se realiza el laminado del archivo el resultado es un archivo G-code que puede ser exportado a la impresora por una tarjeta SD, un cable USB o una conexión Wi-Fi. Después de tener listo el archivo a colocar en la impresora, se debe pasar a la fase de impresión, donde se deben realizar ajustes a la impresora y posteriormente preparar la pieza.

Los ajustes de impresión se realizan en el software de control de impresión el cual permite calentar el cabezal de extrusión, controlar los desplazamientos de la impresora durante las fases de prueba, comenzar la impresión y obtener información del proceso. El software de impresión utilizado en este trabajo fue Cura, éste es compatible con impresoras personales FDM como Ultimaker y con sistemas operativos como Linux, Mac OS X y Windows, además permite la gestión del laminado del archivo y la visualización de la pieza en 3D.

Antes de comenzar a imprimir es importante realizar una correcta calibración de la impresora y después precalentar el material. Además, en ocasiones la plataforma de impresión o el eje se deslizan con menos facilidad, por lo que se requiere lubricar ligeramente las barras de deslizamiento para facilitar los desplazamientos.

Para la calibración del equipo se debe colocar una hoja de papel debajo de la cabeza de extrusión, sobre la plataforma de impresión y esta hoja debe deslizarse, si la impresora se encuentra calibrada adecuadamente, la hoja debe pasar justa, sin dejar espacio entre el cabezal y la plataforma, la medida debe ser idéntica en toda la superficie. Para verificar que el filamento no se quede pegado al cabezal ni enroscado, una vez que se tiene la temperatura deseada se debe extrusionar unos centímetros de filamento y ver que salga con fluidez.

Finalmente, para preparar la pieza pueden realizarse diferentes procesos con el objetivo de que quede limpia y lisa. La mayoría de los artículos suelen ser porosos cuando están recién impresos. La primera parte de la preparación suele ser la fase de lijado que permite alisar la superficie, esta fase es esencial debido a que el resultado debe ser la pieza con estrías atenuadas, pero sin una eliminación innecesaria de material, por lo tanto, el lijado se debe limitar a un solo grosor de la capa.

La segunda etapa comúnmente realizada corresponde a la fase de pulido, en la cual se busca reducir las irregularidades surgidas durante el proceso de extrusión. En muchas ocasiones el proceso realizado es sumergir la pieza en acetona, o en otras se suele cepillar con una mezcla que contenga acetona para reducir las huellas blancas en la pieza. Después de las fases de lijado y pulido, dependiendo del material, puede aplicarse una masilla que busca cubrir las zonas irregulares y unificar la pieza.

Capítulo VI. Evaluación de sistema de rehabilitación previo y rediseño

Este capítulo busca realizar la evaluación del sistema de rehabilitación propuesto en un trabajo de tesis previo por otra estudiante de la Universidad de las Américas Puebla, con el objetivo de obtener el sistema con las modificaciones pertinentes, se encontró que las dimensiones del dispositivo eran inadecuadas, además de que el perfil era incorrecto por lo que el movimiento realizado con el riel no correspondía al movimiento deseado.

El sistema de rehabilitación previamente propuesto por Natalia Alarcón en la tesis Diseño de un Equipo Integral de Fisioterapia para Personas con Amputación Por Cáncer de Mama consiste en un riel que sirve como guía del movimiento a realizar y un carrito para facilitar el seguimiento.

El diseño del riel se realizó basándose en el modelado de movimientos naturales del brazo que una persona con alguna extremidad atrofiada debe adquirir mediante una rehabilitación constante, por lo tanto, el objetivo de la rehabilitación es que las personas sean capaces de realizar acciones de la vida diaria como pasar la página de un libro, abrir una puerta, planchar, entre otros [2].

El ejercicio seleccionado se basó en uno comúnmente utilizado en la rehabilitación de mujeres que tienen una cirugía por cáncer de mama, y el movimiento consistió en un movimiento hacia delante y hacia atrás como si se remara, este movimiento se seleccionó debido a que ejercita los músculos supraespinoso, al hacer abducción, subescapular, en la

rotación interna, redondo menor, en la rotación externa, redondo mayor, con la extensión y abducción, y pectoral mayor con aducción, flexión y extensión [2].

La trayectoria propuesta para el riel incorpora la posibilidad de desplazarse en el plano YZ y en el plano XY, el inicio es desde una posición de descanso del brazo y termina con la extensión total del mismo de manera simultánea, por lo que se presenta un ligero giro durante el movimiento. Para la adquisición de la trayectoria se simuló el movimiento deseado en 20 mujeres sanas sin restricciones en el movimiento de extremidades superiores y se utilizó una base graduada que delimita el plano XY [2].

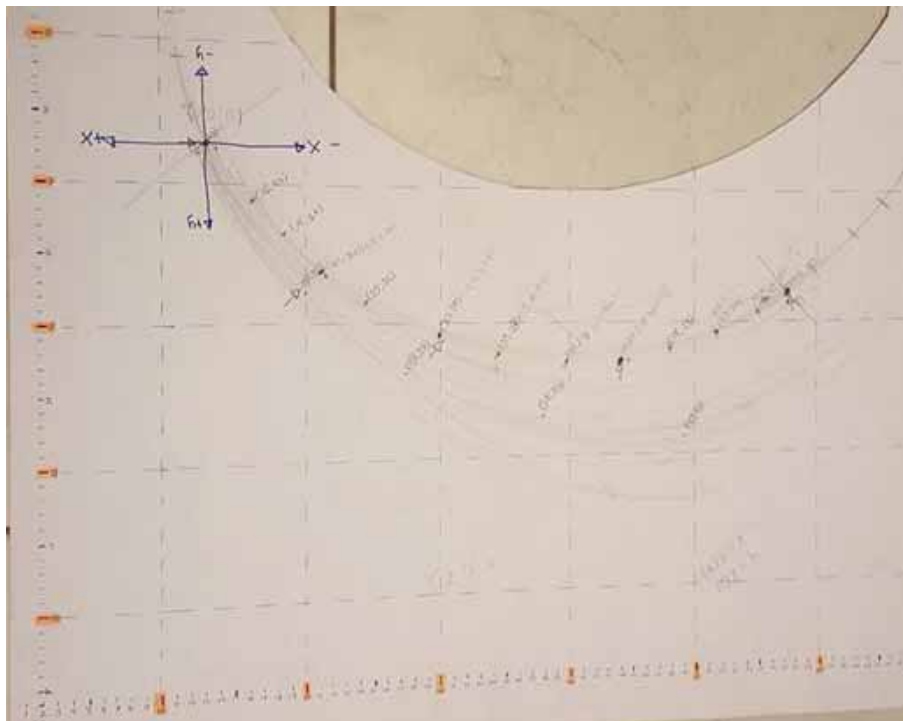


Figura 17. Base graduada para ejecución de movimiento.

Cada voluntaria realizó el movimiento entre 7 y 8 veces desde una posición natural de descanso. A partir de los datos recopilados se realizó un modelo matemático de parábola

y se utilizó el método de mínimos cuadrados, haciendo uso de MATLAB y posteriormente se obtuvo la ecuación de la trayectoria con Excel, el resultado se muestra en la figura 18 [2].

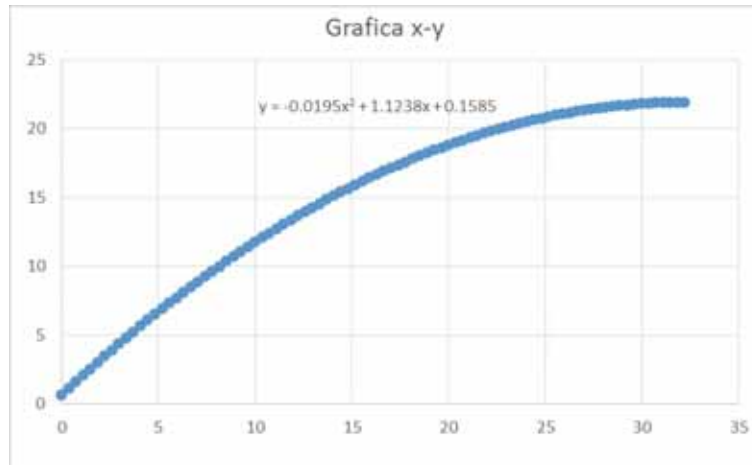


Figura 18. Gráfica del modelo.

El riel diseñado permitió que se tuviera una guía del movimiento, éste se diseñó en PTC Creo Parametric, el plano para la implementación de la base se muestra en la figura 19 y el dibujo del riel se muestra en las figuras 20 y 21, se realizó el seccionamiento del mismo debido al tamaño de impresión [2].

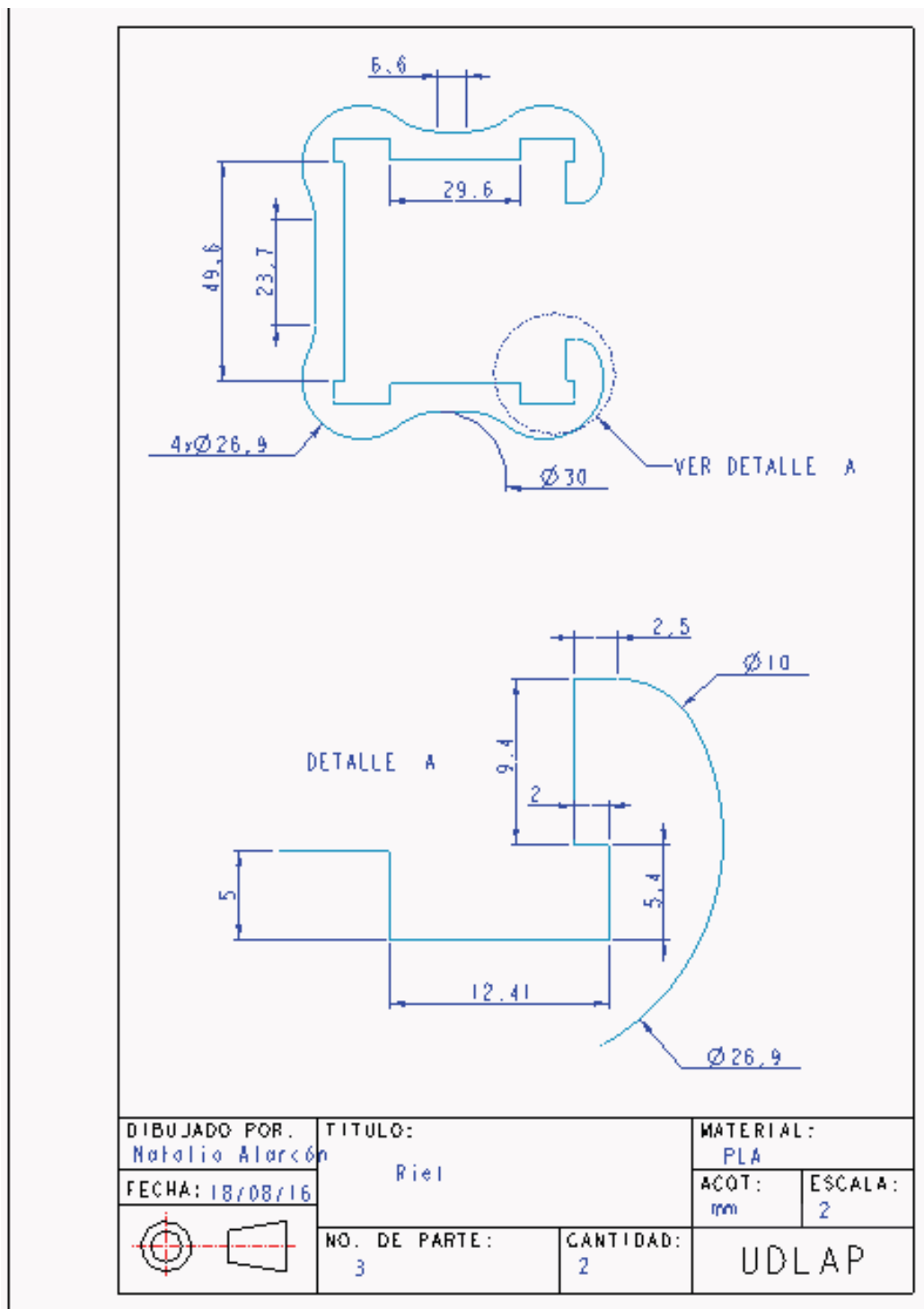


Figura 19. Plano de bases del riel.

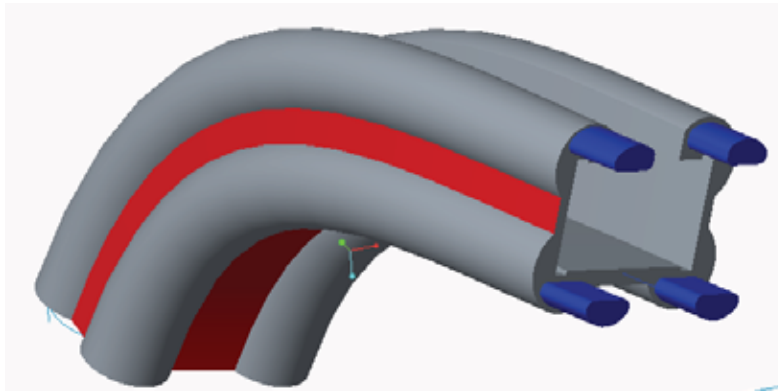


Figura 20. Primera sección del riel.

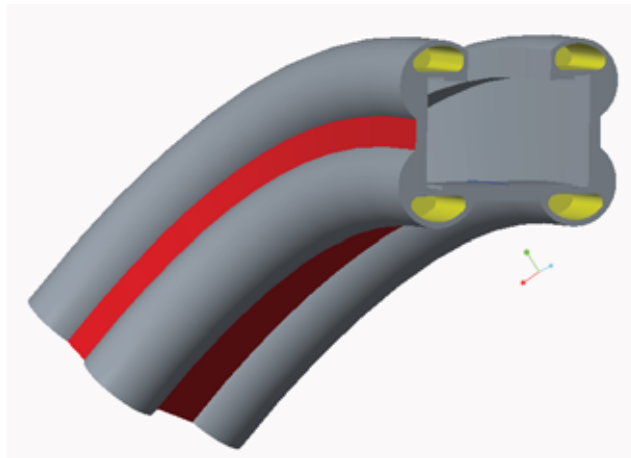


Figura 21. Segunda sección del riel.

Una vez diseñado el riel se realizó la impresión del carrito, el cual contaba con 4 ejes y 8 ruedas para permitir su desplazamiento a lo largo del riel, el plano del carrito se muestra en la figura 22. La impresión se realizó con PLA y el resultado final del sistema de rehabilitación se muestra en las figuras 23 y 24. La figura 23 muestra con flechas rojas el movimiento adecuado [2].

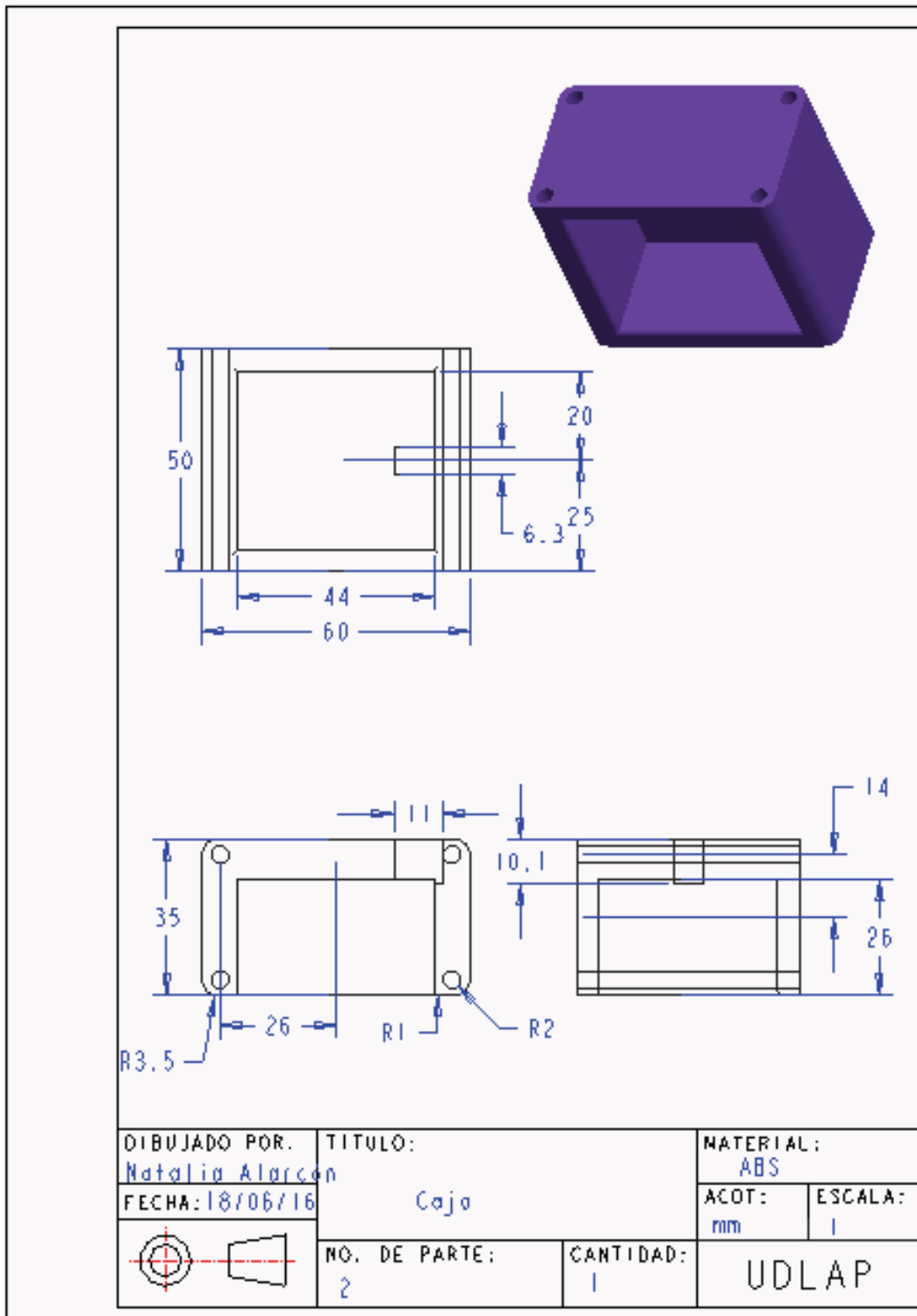


Figura 22. Plano del carrito.

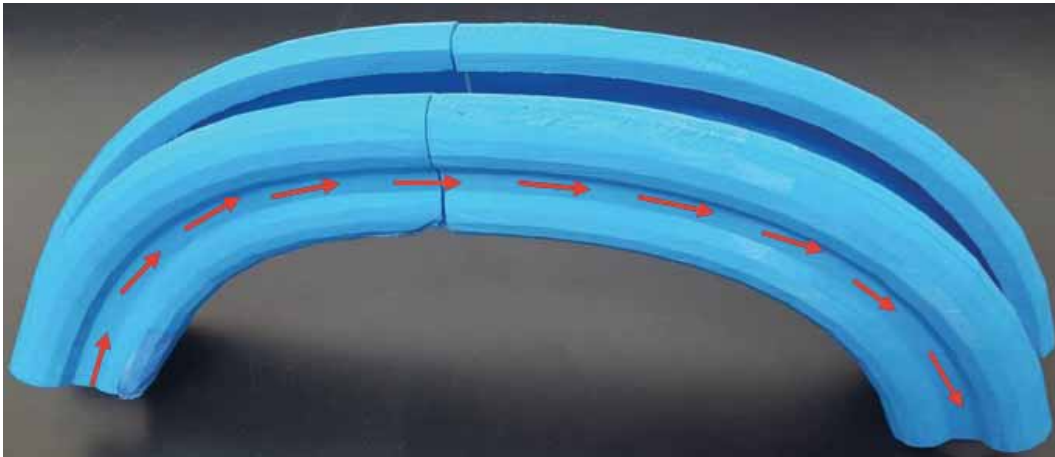


Figura 23. Riel para sistema de rehabilitación.

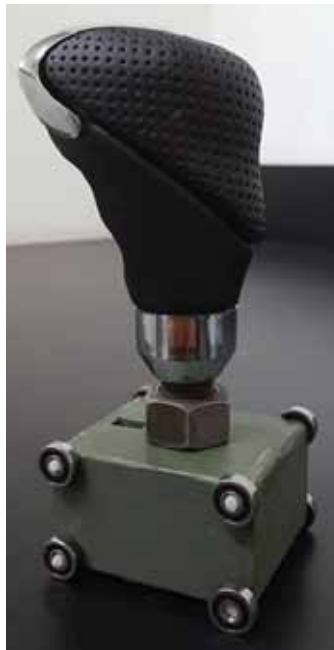


Figura 24. Carrito para sistema de rehabilitación.

Para el desarrollo de esta tesis se buscó mejorar el sistema de rehabilitación con una parte que proporcione retroalimentación al paciente, sin embargo, el paso inicial consistió en un análisis del sistema previamente propuesto y una reimpresión del dispositivo en 3D con las modificaciones realizadas para corregir los errores e implementar las mejoras.

Para la reimpresión primero se realizó un análisis del riel, al cual se le realizaron dos modificaciones, la primera fue debido a que la impresión del riel no seguía adecuadamente la trayectoria propuesta por la ecuación, y la segunda modificación surgió a partir de la necesidad de colocar un circuito dentro del carrito para obtener la información de la retroalimentación, esta modificación consistió en un redimensionamiento del riel y del carrito para que el mismo pudiera desplazarse adecuadamente.

6. 1 Diseño de carrito

El carrito fue el primero en modificarse debido a que, a partir de las dimensiones necesarias para el acondicionamiento con el circuito, se realizarían las modificaciones para las dimensiones del riel.

Inicialmente se realizó el diseño del carrito de acuerdo al riel impreso en [2] para usar como base en las medidas, debido a que aún no se había especificado la instrumentación a utilizar, se desconocían las dimensiones necesarias, además se realizaron 5 impresiones distintas para observar la forma de impresión que proporcionara un mejor resultado.

El diseño se realizó en Creo Parametric, el primer prototipo contaba con una ligera elevación en el centro, sin embargo, cuando se imprimió en PLA, el dispositivo estaba muy frágil por lo que se eliminaron esas elevaciones centrales y se realizó de manera plana, además la densidad de la impresión era muy baja, por lo que también se aumentó para la siguiente impresión. La figura 25 muestra el prototipo impreso con las fallas en el soporte realizado por la impresora 3D, en la parte superior se encuentra el orificio donde se coloca la palanca y se puede observar que es un poco frágil, en los laterales se encuentran los 8 orificios

para los ejes donde se insertarán los baleros para lograr el movimiento del carro a través del riel.



Figura 25. Primer prototipo de carrito.

Una vez que se definió la instrumentación a realizar, además de las modificaciones previamente indicadas para proporcionarle mayor estabilidad al carrito, se modificó el tamaño de éste buscando que en su interior entrara el circuito del sistema de transmisión a utilizar y una batería para su alimentación. Finalmente, en la figura 26 se muestra el carrito con las dimensiones finales. Es importante recordar que de manera adicional a la impresión del carrito se hizo una búsqueda de materiales adecuados para los ejes y las ruedas del mismo.

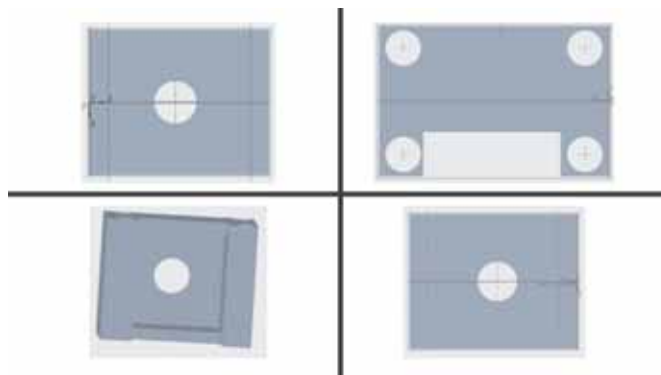


Figura 26. Vistas superior, inferior y lateral de carrito.

Para los ejes se utilizaron 4 tubos de acero inoxidable de 53 cm de largo y $\frac{1}{4}$ de pulgada diámetro, para las ruedas se utilizaron 8 baleros de $\frac{1}{4}$ de pulgada que se colocarían a cada lado del carrito, la figura 27 muestra el resultado final del carrito.



Figura 27. Carrito.

Las dimensiones finales del carrito fueron 42 mm de ancho y 34 mm de alto, para su diseño se realizó un *sketch* de un rectángulo en el plano frontal y una vez indicada las dimensiones se usó la herramienta de *extrude* para obtener la profundidad de 52 mm, posteriormente se dibujaron cuatro círculos en cada cara lateral que corresponderían a la posición de los ejes del carrito con un radio de 7 mm, un círculo en la cara superior para insertar la palanca con un radio de 12.25 mm y una pequeña elevación en la parte inferior entre los ejes para colocar el circuito.

Para las dimensiones del carrito fue necesario considerar todos los elementos que se insertarían dentro de él, para lo cual se consideraron 8 mm para el tornillo que sirve para colocar la palanca y 11 mm para la instrumentación. El carrito con la instrumentación colocada, incluyendo el *switch* de encendido y apagado se muestra en la figura 28.

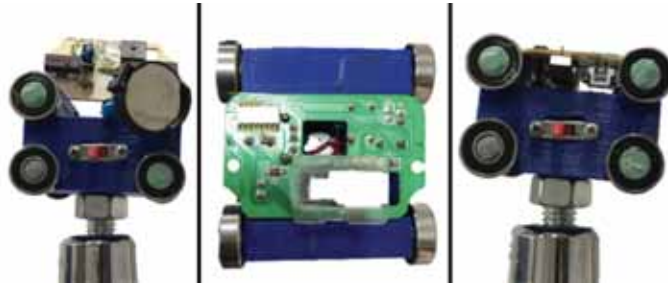


Figura 28. Carrito con instrumentación.

Como se indicó previamente al riel se le hicieron dos modificaciones, la primera fue un cambio del perfil sobre el cual se encuentra la ecuación para de esta manera lograr simular el ejercicio adecuado y la segunda modificación fue el redimensionamiento basado en las características del carrito.

6.2 Diseño de riel

Para el diseño del riel el primer paso consistió en el dibujo de la forma del riel, para éste fue necesario dibujar un rectángulo, con altura de 54 mm y ancho de 80 mm, después en el centro del plano se dibujaron círculos en las esquinas para lograr la forma deseada, el proceso consistió en el dibujo de un círculo en una esquina y con ayuda de la herramienta *mirror* se realizó el mismo dibujo en las esquinas restantes, para el uso de esta herramienta es necesario seleccionar el plano sobre el cual se realizará el espejo y el dibujo que desea replicarse.

Los círculos se dibujaron con un radio de 30 mm siguiendo el valor del riel diseñado por [2], una vez que se contaba con los cuatro círculos se borraron las secciones innecesarias con la herramienta *delete segment*, esta herramienta borra las líneas seleccionadas y borra la parte que se encuentra entre las intersecciones.

La ecuación obtenida por el modelo realizado en [2] se insertó en el dibujo mediante la herramienta *datum curve from equation*, seleccionando como referencia el origen, una vez que se cuenta con la trayectoria se dibuja la forma del riel deseada en cada extremo de la ecuación y mediante la herramienta *swept blend* se hace un barrido.

El dibujo de cada sección del riel con las modificaciones necesarias, que incluye el redimensionamiento y el cambio de perfil se muestran en las figuras 29 y 30. Como puede apreciarse, el nuevo perfil del riel presentado en las figuras 29 y 30 tiene el canal de guía en la parte superior de la curvatura, dando un movimiento predominante en el plano x-y, a diferencia del presentado en [2] (figura 23), donde la guía del movimiento se encontraba sobre la cara externa del riel, dando un movimiento predominante y-z.

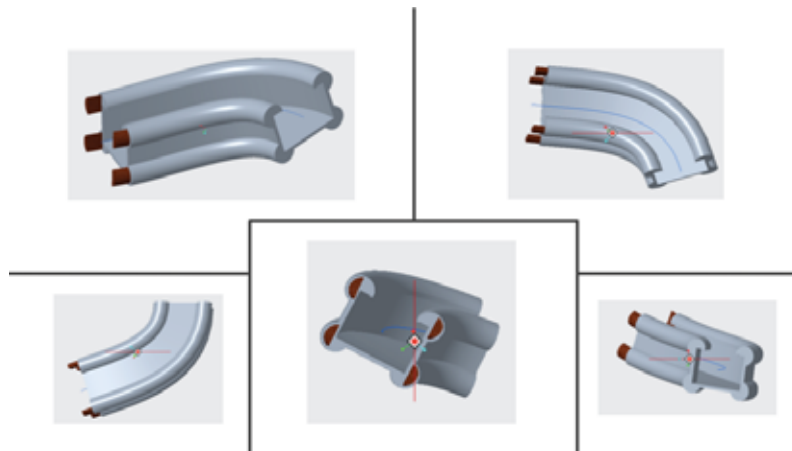


Figura 29. Sección 1 del riel.

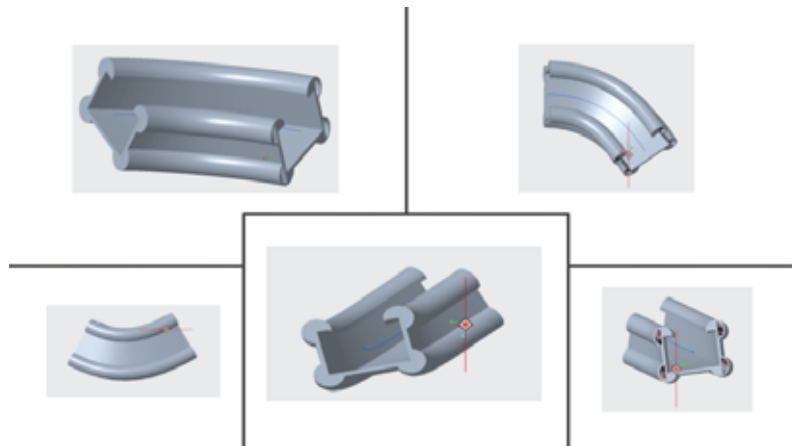


Figura 30. Sección 2 del riel.

Dentro de la configuración para la impresión se colocó el soporte únicamente donde toca el plato, la densidad fue de 20% y la temperatura de 210 grados centígrados para el material de PLA azul. La primera sección del riel, observada en la figura 31 tardó 1 día 2 horas y 3 minutos, el peso fue de 172 g y el material utilizado fue de 21.86 m de filamento de 1.85 mm de diámetro.

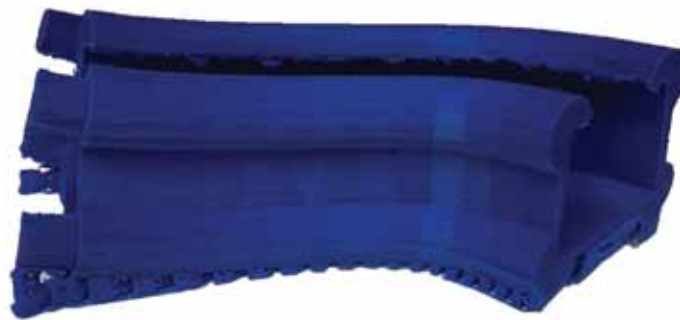


Figura 31. Impresión 3D de primera sección del riel.

Para la segunda sección del riel, mostrado en la figura 32 se utilizaron 24.68 m de PLA azul y el peso final fue de 195 g, la impresión requirió de 1 día 6 horas y 24 minutos, el aumento en el tiempo de impresión se debe a la inclinación de la sección.



Figura 32. Impresión 3D de segunda sección del riel.

El objetivo del riel es servir como guía para una adecuada ejecución del movimiento, debido a que en ocasiones los pacientes pueden reforzar malas técnicas de movimiento al realizar la rehabilitación en casa, el modelado se realizó con la supervisión de un terapeuta en el área de cáncer de mama que ayudó a establecer el patrón correcto, de esa manera, al hacer uso del riel se logra un correcto desempeño. El diseño final del sistema de rehabilitación se muestra en la figura 33. El riel se dividió en dos partes debido al área de impresión disponible, en la figura 33 se puede observar la parte que permite el ensamble de ambas piezas en círculos rojos.



Figura 33. Diseño final de sistema de rehabilitación.

El presente capítulo mostró las modificaciones realizadas al sistema de rehabilitación en [2], y los resultados de cada impresión realizada, como se observó las modificaciones se basaron en un redimensionamiento y cambio de perfil para el riel, y un redimensionamiento y adición de instrumentación para el carrito. Al realizar la impresión las medidas se vieron modificadas por lo que sería importante considerarlo para trabajos futuros.

Capítulo VII. Diseño de interfaz para usuario con Visual Studio

En este capítulo se presentan las especificaciones del diseño de la interfaz utilizada para proporcionar la retroalimentación al paciente y del software, adicionalmente se especifica el principio de funcionamiento de un mouse óptico, el cual se utiliza para obtener el número de repeticiones que se realiza del ejercicio, así como el desplazamiento del mismo.

Para la retroalimentación al paciente y fisioterapeuta se definió el mecanismo que serviría para determinar el movimiento del carro sobre el riel, se determinó que el funcionamiento esperado es análogo al de un ratón de computadora por lo que se adquirió un mouse óptico, se integró y acopló al sistema mecánico y con ayuda de Visual Studio se desarrolló la aplicación para monitorear el desplazamiento, el tiempo total del ejercicio, la velocidad por repetición y el número de repeticiones realizadas por el paciente.

Para la obtención de información sobre el movimiento de rehabilitación realizado se hizo uso de Visual Studio y el tipo de aplicación fue Windows Forms(.NET), por lo tanto, una parte de este capítulo busca servir como introducción al software de Visual Studio para conocer las aplicaciones del mismo, así como sus características principales.

Visual Studio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) que sirve para el desarrollo de aplicaciones tanto para Android, como para iOS, macOS, entre otros. Para el desarrollo de aplicaciones y juegos para Mac se hace uso de C# o F#, donde C# también llamado C Sharp, es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado por Microsoft basado en C/C++ y Java, éste es muy útil debido a que soporta diferentes sistemas e incluso se pueden crear juegos multiplataforma con Unity [32].

C# al ser un lenguaje orientado a objetos que soporta los conceptos básicos en programación de encapsulación, herencia y polimorfismo, cuenta con las variables y los métodos encapsulados en definiciones de clases [32].

Visual Studio provee un ambiente de desarrollo integrado que permite escribir código. Las formas son la unidad básica de una aplicación, una forma puede definirse como una pizarra en blanco que como desarrollador puedes mejorar con controles, para crear una interfaz de usuario, y con código para manipular datos [32].

Windows Forms, por lo tanto, permite crear aplicaciones basadas en ventanas que desplieguen información, manejen información de entrada del usuario y que sean seguras. Windows Forms permite desarrollar clientes inteligentes, los cuales son aplicaciones ricas gráficamente que son fácil de desplegar y actualizar, pueden funcionar con o sin conexión a internet y pueden acceder a recursos locales de la computadora de una manera más segura [32].

Dentro de un Windows Forms una forma es una superficie visual en la que se puede desplegar información al usuario, de manera ordinaria se pueden agregar controles y desarrollar respuestas a las acciones del usuario, como lo son *clicks* del mouse o selección de una tecla [32].

Cada vez que el usuario hace algo a tu forma o a uno de sus controles la acción genera un evento y la aplicación reacciona a estos eventos procesándolos cuando ocurren y usando código [32].

7.1 Desarrollo de la interfaz

La interfaz realizada se muestra en la figura 34, como se puede observar cuenta con un botón para seleccionar el nivel de la rehabilitación, las instrucciones a seguir para realizar la retroalimentación y un panel donde posteriormente se mostrará el movimiento realizado. Al seleccionar el botón de nivel se muestran los tres niveles disponibles para realizar el movimiento, como se muestra en la figura 35.

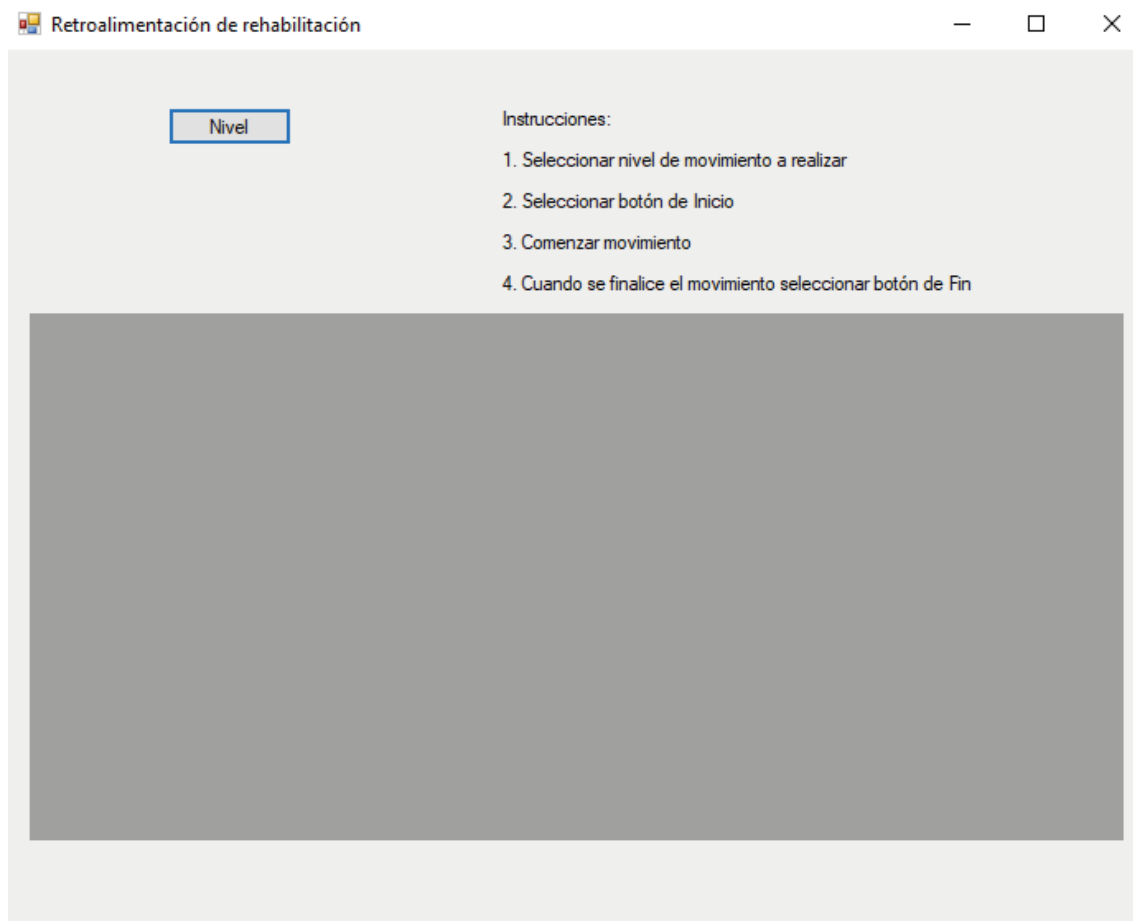


Figura 34. Interfaz de Visual Studio.

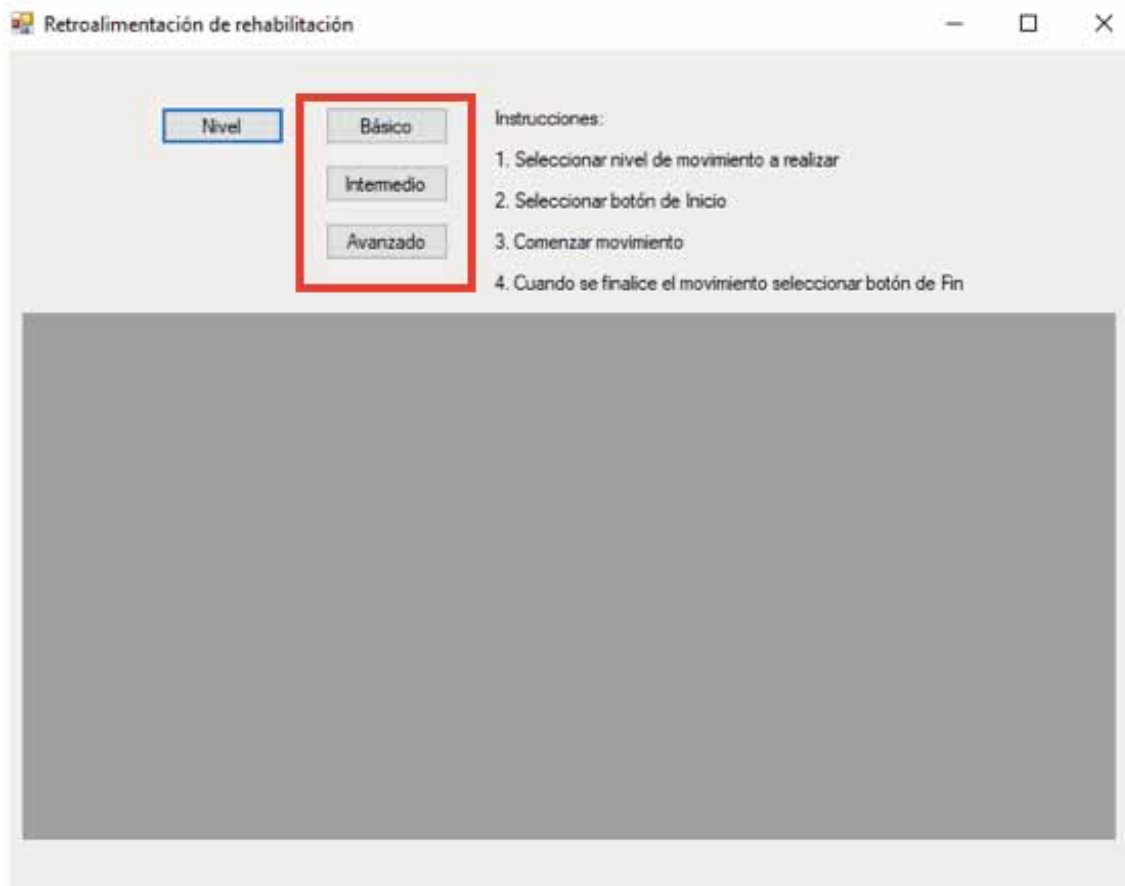


Figura 35. Opciones de niveles.

Una vez que el nivel es seleccionado la interfaz muestra el botón de inicio con la información del nivel (figura 36), para comenzar el movimiento se debe seleccionar el botón de inicio, lo que permitirá observar el tiempo que toma realizar el movimiento, el número de repeticiones que se realizan, la distancia recorrida y la velocidad de ejecución, en la figura 37 se pueden observar en rojo los trazos del movimiento realizado, detectado por el ratón de computadora.

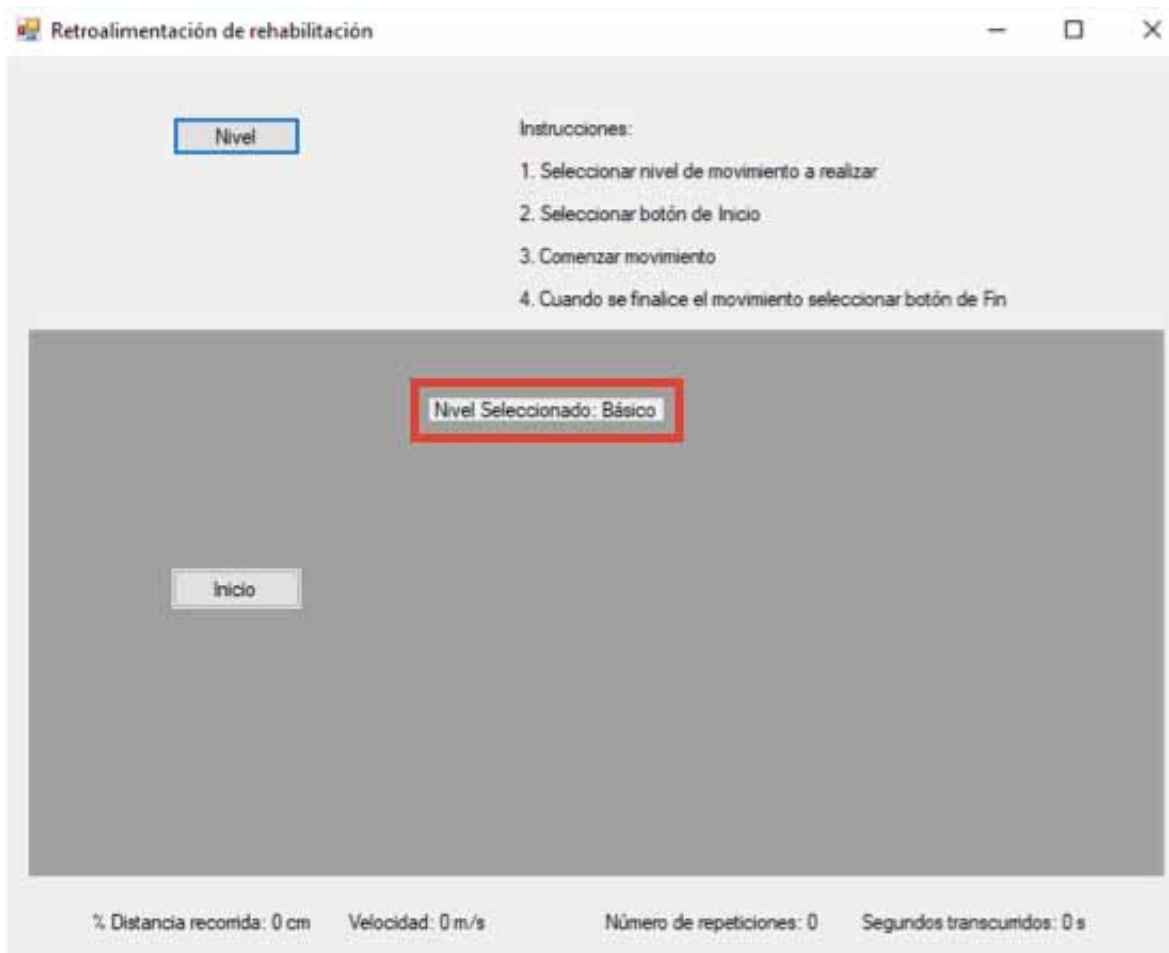


Figura 36. Información al seleccionar nivel.



Figura 37. Información de movimiento.

Para obtener la posición del carrito en el riel se usó el circuito interno de un mouse óptico con conexión USB a la computadora, una vez que la persona selecciona el nivel y presiona el botón de inicio, la velocidad del mouse es ajustada para que el desplazamiento del riel se vea representado en la pantalla y no se salga de ella.

Para la comunicación entre la computadora y el carrito se analizaron diversas opciones, sin embargo, el uso de un mouse óptico se consideró la más viable debido a que el objetivo del sistema es proporcionar la posición del carrito y esto es lo que realiza un mouse, al ser un dispositivo de señalamiento que registra el movimiento de la mano de un usuario.

Un mouse óptico está formado por dos sensores principales, HDNS-2000 y ADNS-2610 que permiten recibir la información de su posición y desplazamiento. El sensor HDNS-2000 es un sensor óptico reflectivo de bajo costo que proporciona una máquina no mecánica de seguimiento al medir el cambio en la posición mediante la adquisición óptica de imágenes secuenciales de la superficie por la que se desliza y determinar matemáticamente la dirección y magnitud de movimiento, por lo que puede utilizarse como medidor de desplazamiento [33]. Una ventaja adicional de un mouse óptico es su bajo costo y sus dimensiones.

Para obtener una detección correcta del desplazamiento del mouse, es necesario que la superficie sobre la que se mueve sea opaca. El movimiento se grafica en la pantalla y este a su vez se usa para medir el desplazamiento del [34].

El mouse óptico (figura 38) se compone de tres partes principales que son la fuente de luz, el sensor y el lente (objetivo). El lente es la parte más larga y se encuentra en la base del mouse, éste se encarga de transportar la luz de la fuente hacia la superficie a medir y proyecta una imagen de la superficie sobre el sensor del mouse. La fuente suele ser un LED (Diodo Emisor de Luz) o un VCSEL (Láser de emisión de superficie de cavidad vertical de modo único). El sensor del mouse toma imágenes de la superficie en escala de grises, dependiendo del sensor las imágenes pueden variar entre 16 x 16 y 30 x 30 píxeles [34].

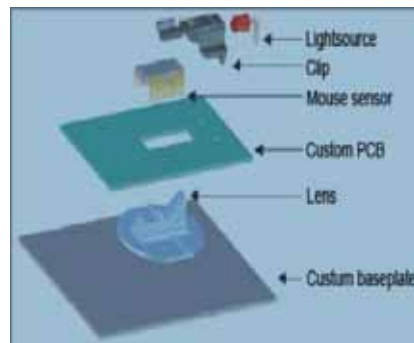


Figura 38. Componentes de mouse óptico.

La calidad y el detalle de la imagen depende de cuatro parámetros que son el tamaño de la imagen, la calidad del lente, la longitud de onda y el color de la fuente. El color de la fuente es de gran relevancia porque éste puede afectar el contraste de la imagen en la superficie, por lo que los colores que proporcionan un mejor reconocimiento de detalle son la luz roja y la azul [34].

La respuesta del sensor del mouse cuando se usa un LED rojo suele contar con una longitud de onda de 630 nm y proporciona una respuesta máxima, por lo que es la fuente de luz más utilizada. El sensor del mouse es un circuito integrado que contiene un Sistema de Adquisición de Imagen (IAS, por sus siglas en inglés), un Procesador Digital de Señales (DSP, por sus siglas en inglés) y un puerto serial para la comunicación [34].

El sensor se encarga del control de todo el sistema óptico, donde el IAS es la parte final del sistema y es donde la imagen de la superficie se transforma en una señal eléctrica que representa la imagen actual. La imagen puede contener 256 bytes para una imagen de 16 x 16 píxeles o 900 bytes para una de 30 x 30 píxeles. Posteriormente la señal eléctrica se procesa en el DSP, el cual se encarga de medir los cambios en la posición al comparar las imágenes capturadas secuencialmente de la superficie [34].

A partir de las diferencias entre las dos imágenes se obtiene un cambio de posición, el cual resulta en una dirección y distancia del desplazamiento. Con la información proporcionada por el mouse, se logra obtener la mayor parte de la retroalimentación, debido a que éste indica el movimiento realizado por la persona bajo rehabilitación, la distancia y trayectoria recorrida, así como el número de repeticiones. Una vez que se desea comenzar con el ejercicio de rehabilitación, se debe seleccionar el nivel en el que se realizará el ejercicio que puede ser básico, intermedio y avanzado. El nivel básico corresponde a una distancia de 17 cm, el intermedio a 26 cm y el avanzado corresponde a la trayectoria completa del riel que son 35 cm. Estas distancias se indican visualmente en el riel impreso.

Dentro de los resultados que arroja el sistema se encuentran el número de repeticiones, la distancia recorrida, la velocidad y el tiempo de trabajo. Las repeticiones se obtienen mediante un contador que se incrementa cada vez que la persona inicia el ejercicio y regresa a la posición inicial del riel.

Considerando que en la interfaz el desplazamiento del mouse N representa un porcentaje del desplazamiento máximo M , y que a su vez la distancia total depende del nivel de rehabilitación seleccionado. La distancia recorrida se obtiene en base al desplazamiento del mouse en la pantalla, donde es necesario considerar la velocidad y la resolución del mouse. Por lo tanto, para el cálculo de la distancia se obtiene una relación entre la distancia recorrida por el mouse en centímetros con la distancia recorrida por el mouse en pixeles.

El tercer parámetro de relevancia corresponde a la velocidad del movimiento, el cual depende (1) del nivel de rehabilitación seleccionado, (2) del número de repeticiones realizadas y (3) del tiempo. Para obtener la velocidad, se utilizó la distancia recorrida del riel

en metros y se dividió sobre el tiempo en segundos de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades. Es importante recordar que una repetición se completa al volver a la posición de inicio, por lo tanto, la distancia de una repetición corresponde al doble de la distancia del riel.

Finalmente, el cuarto parámetro, es el tiempo que se toma el paciente en realizar cada ejercicio, para el cual se utilizó un *Timer* predefinido en Visual Studio. Al *Timer* se le coloca un intervalo de 5 minutos, como tiempo máximo y se inicia cuando se selecciona el botón de inicio, deteniéndose cuando se selecciona el botón de fin, cada vez que se selecciona un nivel el tiempo se restablece a cero para comenzar un nuevo conteo.

El capítulo mostró la interfaz desarrollada con Visual Studio, la cual se encarga de proporcionar retroalimentación de la rehabilitación al paciente, para lo cual, la interfaz se compone de tres niveles (básico, intermedio y avanzado) determinados en base a la distancia a recorrer. Adicionalmente, provee información del tiempo que toma a la persona realizar la rehabilitación, el número de repeticiones que realiza y la velocidad a la que lo hace.

Capítulo VIII. Análisis e interpretación de resultados

En este capítulo se presentará una interpretación de los resultados obtenidos. Además, se discutirán las alternativas consideradas para la solución de cada problema encontrado. Finalmente, se presenta un análisis de los costos del sistema de rehabilitación para comprobar si el sistema presentado es una alternativa accesible al público en general y de bajo costo.

Se logró el cumplimiento tanto de los objetivos generales, como específicos. El objetivo general consistió en el desarrollo de un dispositivo de rehabilitación de hombro que proporcionará retroalimentación útil para el paciente y el terapeuta. Debido a la interfaz desarrollada en Visual Studio, el terapeuta tendrá la posibilidad de dar seguimiento cuantitativo al progreso del paciente debido a que no puede supervisarlos presencialmente, especialmente para los ejercicios realizados en casa. Con ayuda de la interfaz, podrá observar el movimiento realizado, la trayectoria, el tiempo que le toma al paciente realizar ese movimiento, el número de repeticiones que realiza, la distancia que recorre y la velocidad a la que lo hace.

Con esa información, al observar una mayor velocidad o distancia, el terapeuta puede evaluar si la rehabilitación ha funcionado de la manera adecuada, adicionalmente, debido a que se puede hacer uso del carrito sin el riel y lograr una supervisión de diferentes ejercicios se podría determinar el progreso en la rehabilitación en general.

El primer objetivo específico consistió en el análisis del sistema propuesto por Natalia Alarcón Zamora, al evaluar la curva definida a partir del modelado del ejercicio se determinó que el perfil del prototipo 3D era incorrecto y el movimiento realizado no era el que se

buscaba, además se determinó que era necesario modificar las dimensiones tanto del carrito como del riel para que el circuito de retroalimentación cupiera dentro en el carrito. Debido a que el movimiento a modelar se seleccionó y presentó al terapeuta y éste lo aprobó, se considera que el riel efectivamente permite realizar una adecuada rehabilitación del hombro donde se involucra la acción de diferentes músculos, como lo son el supraespinoso, subescapular, rotación externa y pectoral mayor.

El segundo objetivo específico consistió en la propuesta e implementación de mejoras al diseño mecánico inicial, como se indicó previamente, se modificaron las dimensiones tanto del carrito, como del riel y el perfil del riel, por lo tanto, se logró modificar el sistema para obtener la rehabilitación deseada de acuerdo a las muestras de movimiento obtenidas de las voluntarias sanas.

El tercer objetivo específico hacía referencia al diseño de un sistema que permitiera interacción entre el riel mecánico y una interfaz de usuario, que además de fácil de manejar proporcionara captura de datos y generación de información útil para el usuario o el terapeuta. Este sistema se realizó con la integración de un mouse óptico y una interfaz programada en Visual Studio con una aplicación para una computadora, debido a ello y a que sólo se utilizaron botones en la aplicación se considera que es intuitiva y fácil de manipular y la retroalimentación proporcionada, velocidad, número de repeticiones, trayectoria del movimiento, distancia y tiempo de ejecución, permite una evaluación objetiva por parte del terapeuta para analizar si el movimiento se está realizando adecuadamente.

Para comprobar si se logró cumplir con el último objetivo fue necesario realizar un inventario del equipo utilizado y los costos de fabricación del sistema de rehabilitación

considerando sólo materiales y sin incluir costos de ingeniería. Los costos se presentan a continuación en las tablas 2 y 3. Éstos se dividen en base a las diferentes secciones que componen el diseño e impresión del riel (tabla 2), mientras que la tabla 3 muestra los costos del carrito incluyendo el circuito utilizado para la retroalimentación, los costos se obtuvieron de [35], [36], [37] y [38].

Tabla 2. Costo del riel,

Material	Cantidad	Costo
PLA	367 g	\$346.84
Total		\$346.84

Tabla 3. Costo de carrito con circuito para retroalimentación.

Material	Cantidad	Costo
PLA	25 g	\$26.55
Mouse (circuito interno)	1	\$182.00
Switch	1	\$3.47
Baleros (ruedas)	8	\$120.00
Tornillo	1	\$6.50
Tuerca	1	\$5.00
Palanca	1	\$120.00
Riel (acero inoxidable)	4	\$ 2.70
Ajuste de rieles a medidas necesarias	1	\$20.00
Batería de litio de 3V	1	\$19.00
Portabaterías de litio	1	\$5.00
Total		\$510.22

A partir de los costos totales en materiales del diseño del carrito y de la impresora es posible determinar que el costo mínimo sin incluir ingeniería del sistema de rehabilitación corresponde a 857.06 pesos, lo cual es un precio razonable para su fabricación, especialmente al realizar la comparación con otros sistemas de rehabilitación en el mercado.

Capítulo IX. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo donde se describen los logros alcanzados durante la realización del proyecto y brevemente los inconvenientes encontrados, concluyendo si se logró cumplir con la hipótesis propuesta. Adicionalmente se presentan las recomendaciones para la elaboración de investigaciones similares, así como posibles mejoras para el sistema desarrollado.

La hipótesis presentada en el capítulo I planteaba establecer la posibilidad de que mujeres que han experimentado una cirugía de cáncer de mama puedan recuperar el movimiento natural del brazo mediante una rehabilitación adecuada. Al desarrollar el riel y hacer uso de éste en la rehabilitación se logra obtener una mejora fácilmente cuantificable en la rehabilitación y en el movimiento del brazo en comparación de sistemas que ya se encuentran en el mercado, sin embargo, siempre que una persona sufre de una lesión, el grado de dominio de la articulación lesionada disminuirá, por lo tanto, lo que se busca es que esta disminución sea lo menor posible, lo cual se puede conseguir con ayuda del sistema desarrollado. Más aún cuando el modelado del movimiento fue con personas sanas lo que permitirá que el paciente ejercite el movimiento natural del brazo, como de personas que no poseen impedimentos físicos.

Al realizar la impresión de riel se encontraron algunos problemas debido a que el volumen de los prototipos que se pueden imprimir en las impresoras de la Universidad de las Américas Puebla no eran suficientemente grandes. Como se mencionó previamente, para solucionar el problema del área de impresión el riel se seccionó en dos partes para permitir imprimirla totalmente lo que llevo a dotar a ambas partes de elementos de acoplamiento.

Para facilitar el acoplamiento por problemas suscitados por la expansión del filamento fundido durante la extrusión del material, el riel se calentó en agua a aproximadamente 80 grados centígrados para posteriormente amoldarlo a mano y lograr el acoplamiento. Es necesario considerar la deformación del material extruido durante el diseño para lograr el correcto ensamble después de la impresión 3D.

La comercialización de este equipo se considera una opción viable debido a que como se mencionó inicialmente, no existen dispositivos enfocados en la rehabilitación del hombro después de haber sufrido cirugía por cáncer de mama lo que abre un mercado potencial interesante para el desarrollo presentado. Es necesario considerar que al momento de modelar el movimiento para lograr una completa extensión del brazo se contaba con una distancia de la posición de la persona respecto al plano, por lo tanto, se recomienda que la posición del riel, desde el centro (punto de unión de ambas secciones) se encuentre a aproximadamente 20 cm de distancia de la persona.

Las recomendaciones propuestas se basan en que el objetivo de este trabajo de investigación consistió en proporcionar una herramienta al terapeuta y al paciente durante la rehabilitación después de haber sido sometido a una cirugía para extirpar tejido canceroso de mama. Lo anterior para lograr una recuperación más rápida y adecuada que evite problemas postoperatorios como pérdida de la movilidad del brazo, reducción del rango del movimiento, reducción en la extensión del brazo y propensión en la aparición de linfedemas. Cabe señalar que a pesar de que la información proporcionada por la interfaz gráfica es de gran ayuda aún hay otros parámetros de relevancia para el terapeuta durante la rehabilitación que podrían ayudar aún más al proporcionar medidas cuantificables y objetivas.

Dentro de los parámetros que aún falta incluir en el proyecto se encuentran la fuerza y el rango de movimiento, por lo tanto, se propone como continuación del proyecto el desarrollo de instrumentación que permita medir estos dos parámetros.

Para la instrumentación del rango de movimiento se propone realizar un goniómetro que no requiera de la intervención del terapeuta, para que de esta forma se logre un mejor registro del avance o retroceso del paciente eliminando la parte subjetiva. Dentro de la instrumentación para realizarlo se sugiere el uso de sensores inerciales para obtener los datos angulares de las articulaciones grandes, como lo es el hombro, en el plano sagital y el frontal. Además de los sensores se requiere el uso de un módulo ADC de un microcontrolador para detectar los cambios en el ángulo de la articulación y un sistema de comunicación inalámbrica para enviar los datos procesados a la interfaz diseñada. De esta manera se lograría registrar el ángulo de la articulación en tiempo real y almacenarlo para un análisis posterior [39].

Otra posible mejora para el sistema de rehabilitación es ampliar el tamaño de la población que simuló el movimiento y obtener la ecuación mediante el uso de un sistema de captura de movimiento, lo que podría reducir el error, en caso de existir, de la captura de los puntos para cada persona, debido a que el software proporciona las coordenadas en un archivo excel que puede utilizarse para obtener la ecuación característica de manera más objetiva.

Finalmente, como se puede observar en la interfaz gráfica se realizó una división de niveles de la ejecución del movimiento con el objetivo de a futuro desarrollar un juego que permita motivar al paciente a realizar su rehabilitación, esta parte se encontraría relacionada

con la ludificación del sistema, de manera que se presente un reto a la persona, y la división de los niveles presentada en la interfaz sirva como guía para el desarrollo del juego.

Se considera que al utilizar el dispositivo como un adicional a la terapia establecida por el fisioterapeuta el tiempo de recuperación será menor, al igual que el rango de movimiento y se reducirá la ejecución de los movimientos con patrones indeseados. Esto será posible debido a que el fisioterapeuta contará con una herramienta adicional que le permitirá supervisar los ejercicios que el paciente realiza y no puede supervisar. Adicionalmente, se considera que si se agrega una ludificación al sistema se logrará motivar al paciente a realizar sus ejercicios y de esa manera no dejará de hacer los ejercicios en casa, lo que suele ser el mayor impedimento en el progreso de la rehabilitación. Sin embargo, para confirmar estas posibles mejoras sería necesario incorporar el sistema en una clínica de rehabilitación de cáncer de mama y realizar un estudio donde se tenga un grupo de mujeres que se esté rehabilitando y se divida en dos, donde uno utilizaría el sistema diseñado adicional a la terapia usual y el otro no lo haría. Posteriormente, se deberían implementar formas de medir el avance y realizar una comparación entre ambos grupos para observar los resultados, como la medición del rango de movimiento mediante un goniómetro.

El desarrollo del presente trabajo de investigación proporcionó una implementación del conocimiento de diferentes áreas, para lograr el cumplimiento de los objetivos se requirió de una investigación previa de diferentes aspectos, principalmente de la impresión 3D y el cáncer de mama. Una vez que se definió el objetivo se tuvo que realizar un curso de dibujo por computadora, para el diseño e impresión del sistema, y a pesar de tener las bases de programación, debido a que el lenguaje utilizado era distinto a los usados previamente, fue

necesario realizar una investigación de C Sharp, lenguaje utilizado para el desarrollo de la interfaz.

Dentro de las áreas de la ingeniería biomédica se encuentra el área de rehabilitación, la cual es de vital importancia para las personas que sufren alguna lesión y buscan recuperar el movimiento normal de la articulación lesionada, este trabajo aporta una manera objetiva y cuantitativa de medir el progreso del paciente en las terapias, para además de poder registrar su avance se logre determinar si los ejercicios se están realizando adecuadamente, debido a que en ocasiones al hacer rehabilitación en casa, se suelen realizar de manera incorrecta, lo que lleva a reforzar patrones de movimientos no deseadas.

Debido a que la implementación de este trabajo requirió de conocimiento en diversas áreas de la ingeniería, como biomecánica, programación orientada a objetos, dibujo por computadora e incluso óptica, se considera que sin las bases de estos cursos el desarrollo del proyecto se habría complicado y los resultados no habrían sido los esperados.

El desarrollo del proyecto, además, permitió cumplir con objetivos personales, como el desarrollo de un prototipo en el área de rehabilitación, además de una sensibilización sobre el tema y una mayor comprensión de los requerimientos para permitir ayudar en el área de rehabilitación desde la parte ingenieril. Es importante recordar que, para el desarrollo de equipos en el área médica, siempre será necesario realizar un trabajo en conjunto con el médico.

Para el desarrollo de trabajos similares se recomienda hacer una completa y detallada revisión de literatura del área sobre la que se desea hacer una aportación y de los sistemas

existentes. Para de esa manera, lograr hacer una propuesta que logre cumplir los requerimientos médicos para que sea de utilidad para el paciente que lo utilice. Además, es necesario siempre tener en cuenta la forma de fabricación del sistema para considerar aspectos como, en el caso de la impresión 3D, las modificaciones en las dimensiones deseadas al momento del diseño.

Referencias bibliográficas

- [1] Gómez, C. (2019). Octubre Rosa. Excélsior. Obtenido de <https://www.excelsior.com.mx/opinion/carolina-gomez-vinales/octubre-rosa/1271355>
- [2] Alarcón, N. (2016). *Diseño de un equipo integral de fisioterapia para personas con amputación por cáncer de mama* (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas Puebla, Puebla.
- [3] Moore, K., Dalley, A. & Agur, A. (2013). *Anatomía con orientación clínica*. Barcelona, España, Ovid Technologies.
- [4] Instituto Nacional del Cáncer. (2015). ¿Qué es el cáncer? *Instituto Nacional del Cáncer*. Obtenido de <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/naturaleza/que-es>
- [5] Asociación Española Contra el Cáncer. (s.f.). Cáncer de mama. *Asociación Española Contra el Cáncer*. Obtenido de <https://www.aecc.es/es/todo-sobre-cancer/tipos-cancer/cancer-mama>
- [6] American Cancer Society. (s.f.). Tratamiento del cáncer de seno. *American Cancer Society*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/cancer/cancer-de-seno/tratamiento.html>
- [7] American Cancer Society. (s.f.). Quimioterapia. *American Cancer Society*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/quimioterapia.html>
- [8] American Cancer Society. (s.f.). Radioterapia. *American Cancer Society*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/radioterapia.html>

- [9] American Cancer Society. (s.f.). Mastectomía. *American Cancer Society*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/cancer/cancer-de-seno/tratamiento/cirugia-del-cancer-de-seno/mastectomia.html>
- [10] Ferreiro, C. (s.f.). ¿Cómo puede ayudar la fisioterapia tras una cirugía de cáncer de mama?. *Global Health Care*. Obtenido de <https://rehabilitacionpremiummadrid.com/blog/cristina-ferreiro/fisioterapia-cirugia-cancer-mama/>
- [11] American Cancer Society. (s.f.). Cirugía para el cáncer de seno. *American Cancer Society*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/cancer/cancer-de-seno/tratamiento/cirugia-del-cancer-de-seno.html>
- [12] Breast Cancer. (2017). Linfedema. *BREASTCANCER.ORG*. Obtenido de <https://www.breastcancer.org/es/tratamiento/linfedema>
- [13] Rello, M. (2016). Tras cáncer de mama, 50% de mujeres sufre linfedema. *Milenio*. Obtenido de <https://www.milenio.com/estados/cancer-mama-50-mujeres-sufre-linfedema>
- [14] American Cancer Society. (s.f.). Ejercicios tras la cirugía contra el cáncer de seno. *American Cancer Society*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/cancer/cancer-de-seno/tratamiento/cirugia-del-cancer-de-seno/ejercicios-tras-la-cirugia-contra-el-cancer-de-seno.html>
- [15] Breast Cancer. (2017). Linfedema y ejercicio. *BREASTCANCER.ORG*. Obtenido de <https://www.breastcancer.org/es/tratamiento/linfedema/ejercicio>
- [16] Torres, G., Knaul, F., Ortega, C., Magaña, L. & Lazcano, E. (2011). *Detección temprana y manejo integral del cáncer de mama*. Cuernava, México: Instituto Nacional de Salud Pública.
- [17] Williams, G., Ramsey, M. & Wiesel, S. (2011). *Técnicas quirúrgicas en hombro y codo*. Obtenido de http://media.axon.es/pdf/85021_1.pdf

- [18] Viladot, A. (2000). *Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor*. Barcelona, España, Springer.
- [19] Ayestarán, A. Y Cuéllar, R. (2015). Anatomía y función de la articulación acromioclavicular. *Revista Española de Artrosopia y Cirugía Articular*, 22(1): 3-10. DOI: 10.1016
- [20] Infomed. (s.f.). Biomecánica de la cintura escapular. Musculatura responsable de los movimientos y acciones asociadas. *INFOMED Especialidades*. Obtenido de <http://www.sld.cu/sitios/rehabilitacion-bio/temas.php?idv=18657>
- [21] Cirugía del hombro. (s.f.) Qué es la articulación escapulotorácica. *Cirugía del hombro*. Obtenido de <https://www.cirugiadelhombro.es/articulacion-escapulotoracica/>
- [22] Kapandji, A. (2007). *Fisiología Articular*. España, Panamericana.
- [23] Equipos interferenciales. (s.f.). Rueda de hombro. *Equipos interferenciales*. Obtenido de <https://interferenciales.com.mx/products/rueda-de-hombro>
- [24] Cuiddo. (s.f.). LoopLiner 2. *Cuiddo, Cuidando tu Bienestar*. Obtenido de <https://www.cuiddo.es/loopliner-2.html>
- [25] Cuiddo. (s.f.). Curamotion. *Cuiddo, Cuidando tu Bienestar*. Obtenido de <https://www.cuiddo.es/curamotion-rueda-hombro.html>
- [26] Cuiddo. (s.f.). Equipo de rehabilitación multifuncional. *Cuiddo, Cuidando tu Bienestar*. Obtenido de <https://www.cuiddo.es/equipo-de-rehabilitacion-multifuncional.html>
- [27] Mercado, M., Gambarotta, M., González, S. & Pallares, C. (2008). Utilidad de la goniometría en la evaluación del rango de los movimientos de flexión y extensión de la articulación del codo canino. *InVet*, 10(2), 65-72.

- [28] Wong, W. Y., Wong, M. S., & Lo, K. H. (2007). Clinical applications of sensors for human posture and movement analysis: a review. *Prosthetics and Orthotics International*, 31(1), 62–75.
- [29] Roetenberg, D. (2006). Inertial and magnetic sensing of human motion. Universidad de Twente. Obtenido de http://doc.utwente.nl/56176/1/thesis_Roetenberg.pdf
- [30] Google sites. (s.f.). Evaluación de la fuerza. *Evaluación de la fuerza muscular*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/fuerzaanalis/cmo-se-puede-evaluar-la-fuerza-muscular>
- [31] Berchon, M. (2014). *La impression 3D*. Barcelona, España, Groupe Eyrolles.
- [32] Microsoft. (2017). Windows Forms Overview. *Microsoft*. Obtenido de <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/winforms/windows-forms-overview>
- [33] Agilent Technologies. (s.f.). Solid-State Optical Mouse Sensor with PS/2 and Quadrature Outputs. *Agilent Technologies*.
- [34] Vishweshwer, S., Singh, B Y Biswas, M.. (2015). The Optical Mouse as a Two-Dimensional Displacement Sensor Bot and Graphical Positioner. *South Asian Journal of Multidisciplinary Studies*. 2(3), 197-212.
- [35] Mercadolibre. (s.f.). Interruptor On Off Deslizante Switch Micro Arduino 3 Pines. *Mercado libre*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-639837496-interruptor-on-off-deslizante-switch-micro-arduino-3-pines-_JM?quantity=1
- [36] Mercadolibre. (s.f.). Pila Cr2025 De Litio Energizer Bateria Cr-2025 3v Tipo Boton. *Mercado libre*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-620708642-pila-cr2025-de-litio-energizer-bateria-cr-2025-3v-tipo-boton-_JM?quantity=1

- [37] Mercadolibre. (s.f.). Porta Pilas Bateria Cr2032/cr2025 Alta Calidad. *Mercado libre*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-555168770-porta-pilas-bateria-cr2032cr2025-alta-calidad-_JM?quantity=1
- [38] Ultimaker. (s.f.). Ultimaker PLA. *Ultimaker*. Obtenido de <https://ultimaker.com/en/products/materials/pla>
- [39] Yara, L. & Rodríguez, J. (2013). Diseño e implementación de un goniómetro digital para articulaciones grandes en los planos sagital y frontal. *Visión Electrónica*.
- [40] American Society of Clinical Oncology. (2017). Rehabilitación. *Cancer.NET*. Obtenido de <https://www.cancer.net/es/sobrevivencia/rehabilitaci%C3%B3n>
- [41] Asociación Española Contra el Cáncer. (s.f.). Secuelas del cáncer de mama. *Asociación Española Contra el Cáncer*. Obtenido de <https://www.aecc.es/es/todo-sobre-cancer/tipos-cancer/cancer-mama/secuelas-cancer-mama>
- [42] IMSS. (s.f.). Cáncer de mama. *Gob.mx*. Obtenido de <http://www.imss.gob.mx/salud-en-linea/cancer-mama>

Anexos

Anexo 1. Código para desarrollo de interfaz

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.Runtime.InteropServices;
namespace aaaa
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        private System.Windows.Forms.Panel panel1;
        private System.Windows.Forms.Button inicioButton;
        private System.Windows.Forms.Button FacilButton;
        private System.Windows.Forms.Button nivelButton;
        private System.Windows.Forms.Button terminaButton;
        private System.Windows.Forms.Button medioButton;
        private System.Windows.Forms.Button dificilButton;
        private System.Windows.Forms.Label label1;
        private System.Windows.Forms.Label label2;
        private System.Windows.Forms.Label label3;
        private System.Windows.Forms.Label label4;
        private System.Windows.Forms.Label label5;
        private System.Windows.Forms.Label label6;
        private System.Windows.Forms.Label label7;
        private System.Windows.Forms.Label label8;
        private System.Windows.Forms.Label label9;
        private System.Windows.Forms.Label label10;
        private System.Windows.Forms.Timer myTimer;

        private System.Drawing.Drawing2D.GraphicsPath mousePath;

        public bool draw = false;
        public int vel_inicial = 0;
        public int repeticiones = -1;
        public bool a = false;
        public double t_transcurrido = 0;
        public int mousex_i = 0;
        public int mousey_i = 0;
        public int ni = 0;
        public int rep_T;
        public double velocidad;

        public const UInt32 SPI_GETMOUSESPEED = 0x0070;
        public const UInt32 SPI_SETMOUSESPEED = 0x0071;
    }
}

```

```

const UInt32 SPI_UPDATEINFILE = 0x01;
const UInt32 SPI_SENDWININICHANGE = 0x02;

public class WinAPI
{
    [DllImport("User32.dll")]
    public static extern int SystemParametersInfo(UInt32 uiAction, UInt32 uiParam, int pvParam, UInt32
fWinIni);
}
public Form1()
{
    mousePath = new System.Drawing.Drawing2D.GraphicsPath();

    this.panel1 = new System.Windows.Forms.Panel();
    this.inicioButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.FacilButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.nivelButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.terminaButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.medioButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.dificilButton = new System.Windows.Forms.Button();

    this.label1 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label2 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label3 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label4 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label5 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label6 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label7 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label8 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label9 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.label10 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.myTimer = new System.Windows.Forms.Timer();

    this.label1.AutoSize = true;
    this.label1.Location = new System.Drawing.Point(250, 200);
    this.label1.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

    this.label2.AutoSize = true;
    this.label2.Location = new System.Drawing.Point(50, 500);
    this.label2.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

    this.label3.AutoSize = true;
    this.label3.Location = new System.Drawing.Point(200, 500);
    this.label3.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

    this.label4.AutoSize = true;
    this.label4.Location = new System.Drawing.Point(350, 500);
    this.label4.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

    this.label5.AutoSize = true;
    this.label5.Location = new System.Drawing.Point(500, 500);
    this.label5.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);
}

```

```

this.label6.AutoSize = true;
this.label6.Location = new System.Drawing.Point(300, 35);
this.label6.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

this.label7.AutoSize = true;
this.label7.Location = new System.Drawing.Point(300, 60);
this.label7.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

this.label8.AutoSize = true;
this.label8.Location = new System.Drawing.Point(300, 85);
this.label8.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

this.label9.AutoSize = true;
this.label9.Location = new System.Drawing.Point(300, 110);
this.label9.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

this.label10.AutoSize = true;
this.label10.Location = new System.Drawing.Point(300, 135);
this.label10.Size = new System.Drawing.Size(35, 13);

label6.Text = "Instrucciones:";
label7.Text = "1. Seleccionar nivel de movimiento a realizar";
label8.Text = "2. Seleccionar botón de Inicio";
label9.Text = "3. Comenzar movimiento";
label10.Text = "4. Cuando se finalice el movimiento seleccionar botón de Fin";

myTimer.Tick += new EventHandler(this.myTimer_Tick);
myTimer.Interval = 1000;

// Mouse Panel
this.panel1.Anchor = ((System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Left)
    | System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.panel1.BackColor = System.Drawing.SystemColors.ControlDark;
this.panel1.Location = new System.Drawing.Point(16, 160);
this.panel1.Size = new System.Drawing.Size(664, 320);
this.panel1.Paint += new System.Windows.Forms.PaintEventHandler(this.panel1_Paint);
this.panel1.MouseMove += new
System.Windows.Forms.MouseEventHandler(this.panel1_MouseMove);

// Nivel Button
this.nivelButton.Anchor = (System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.nivelButton.Location = new System.Drawing.Point(100, 35);
this.nivelButton.TabIndex = 6;
this.nivelButton.Text = "Nivel";
this.nivelButton.Click += new System.EventHandler(this.nivelButton_Click);

// Basico Button
this.FacilButton.Anchor = (System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.FacilButton.Location = new System.Drawing.Point(200, 35);
this.FacilButton.TabIndex = 2;

```

```

this.FacilButton.Text = "Básico";
this.FacilButton.Click += new System.EventHandler(this.FacilButton_Click);
FacilButton.Visible = false;

// Intermedio Button
this.medioButton.Anchor = (System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.medioButton.Location = new System.Drawing.Point(200, 70);
this.medioButton.TabIndex = 3;
this.medioButton.Text = "Intermedio";
this.medioButton.Click += new System.EventHandler(this.medioButton_Click);
medioButton.Visible = false;
// Avanzado Button
this.difícilButton.Anchor = (System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.difícilButton.Location = new System.Drawing.Point(200, 105);
this.difícilButton.TabIndex = 4;
this.difícilButton.Text = "Avanzado";
this.difícilButton.Click += new System.EventHandler(this.difícilButton_Click);
difícilButton.Visible = false;

// Inicio Button
this.inicioButton.Anchor = (System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.inicioButton.Location = new System.Drawing.Point(100, 300);
this.inicioButton.TabIndex = 1;
this.inicioButton.Text = "Inicio";
this.inicioButton.Click += new System.EventHandler(this.inicioButton_Click);
inicioButton.Visible = false;

// Fin Button
this.terminaButton.Anchor = (System.Windows.Forms.AnchorStyles.Top |
System.Windows.Forms.AnchorStyles.Right);
this.terminaButton.Location = new System.Drawing.Point(100, 300);
this.terminaButton.TabIndex = 7;
this.terminaButton.Text = "Fin";
this.terminaButton.Click += new System.EventHandler(this.terminaButton_Click);
terminaButton.Visible = false;

// Indica como se debe ver la ventana y agrega los controles a la misma.
this.ClientSize = new System.Drawing.Size(696, 534);
this.Controls.AddRange(new System.Windows.Forms.Control[] {
    this.inicioButton, this.terminaButton, this.label1, this.label2, this.label3, this.label4,
    this.label5, this.panel1, this.FacilButton, this.nivelButton, this.medioButton,
    this.difícilButton, this.label6, this.label7, this.label8, this.label9, this.label10});
this.Text = "Retroalimentación de rehabilitación";
}

private void panel1_MouseMove(object sender, System.Windows.Forms.MouseEventArgs e)
{
    // Actualiza el camino del mouse que se dibuja en el Panel.
    if (draw)
    {
        int mouseX = e.X;

```

```

int mouseY = e.Y;
mousePath.AddLine(mouseX, mouseY, mouseX, mouseY);
if(mouseX > 80 && mouseY > 130 && mouseX <= 160 && mouseY <= 170)
{
    a = true;
}
if (a && (mouseX < 80 || mouseX > 160) && (mouseY < 130 || mouseY > 170))
{
    repeticiones++;
    a = false;
    label4.Text = "Número de repeticiones: " + repeticiones.ToString();
}
panel1.Focus();
panel1.Invalidate();
}
}

private void myTimer_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    // Realiza el conteo de segundos transcurridos
    t_transcurrido++;
    label5.Text = "Segundos transcurridos: " + t_transcurrido.ToString();
}

private void panel1_Paint(object sender, System.Windows.Forms.PaintEventArgs e)
{
    // Realiza el dibujo en el Panel.
    e.Graphics.DrawPath(System.Drawing.Pens.DarkRed, mousePath);
}

private void inicioButton_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    myTimer.Enabled = true;
    terminaButton.Visible = true;
    inicioButton.Visible = false;
    // Modifica la velocidad del Mouse
    int vel = 1;
    int res = WinAPI.SystemParametersInfo(113, 0, vel, 0);
    draw = true;
    // Limpia el Panel.
    mousePath.Dispose();
    mousePath = new System.Drawing.Drawing2D.GraphicsPath();
    panel1.Invalidate();
}

private void FacilButton_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    // Limpia el Panel.
    mousePath.Dispose();
    mousePath = new System.Drawing.Drawing2D.GraphicsPath();
    panel1.Invalidate();
    // Inicializa las variables a utilizar.
    ni = 1;
    t_transcurrido = 0;
}

```



```

rep_T = 0;
repeticiones = 0;
label1.Text = "Nivel Seleccionado: Básico";

inicioButton.Visible = true;
terminaButton.Visible = true;
FacilButton.Visible = false;
medioButton.Visible = false;
difícilButton.Visible = false;
label2.Text = "% Distancia recorrida: 0 cm";
label3.Text = "Velocidad: 0 m/s";
label4.Text = "Número de repeticiones: 0";
label5.Text = "Segundos transcurridos: " + t_transcurrido.ToString() + " s";
}

private void difícilButton_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    // Limpia el Panel.
    mousePath.Dispose();
    mousePath = new System.Drawing.Drawing2D.GraphicsPath();
    panel1.Invalidate();
    // Inicializa las variables a utilizar.
    t_transcurrido = 0;
    rep_T = 0;
    ni = 3;
    repeticiones = 0;
    label1.Text = "Nivel Seleccionado: Avanzado";
    inicioButton.Visible = true;
    terminaButton.Visible = true;
    FacilButton.Visible = false;
    medioButton.Visible = false;
    difícilButton.Visible = false;
    label2.Text = "% Distancia recorrida: 0 cm";
    label3.Text = "Velocidad: 0 m/s";
    label4.Text = "Número de repeticiones: " + repeticiones.ToString();
    label5.Text = "Segundos transcurridos: " + t_transcurrido.ToString() + " s";
}

private void medioButton_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    // Limpia el Panel.
    mousePath.Dispose();
    mousePath = new System.Drawing.Drawing2D.GraphicsPath();
    panel1.Invalidate();

    // Inicializa las variables a utilizar.
    t_transcurrido = 0;
    ni = 2;
    t_transcurrido = 0;
    rep_T = 0;
    repeticiones = 0;
    label1.Text = "Nivel Seleccionado: Intermedio";
    inicioButton.Visible = true;

```

```

terminaButton.Visible = true;
FacilButton.Visible = false;
medioButton.Visible = false;
dificilButton.Visible = false;
label2.Text = "% Distancia recorrida: 0 cm";
label3.Text = "Velocidad: 0 m/s";
label4.Text = "Número de repeticiones: " + repeticiones.ToString();
label5.Text = "Segundos transcurridos: " + t_transcurrido.ToString() + " s";
}

private void nivelButton_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    FacilButton.Visible = true;
    medioButton.Visible = true;
    dificilButton.Visible = true;
}

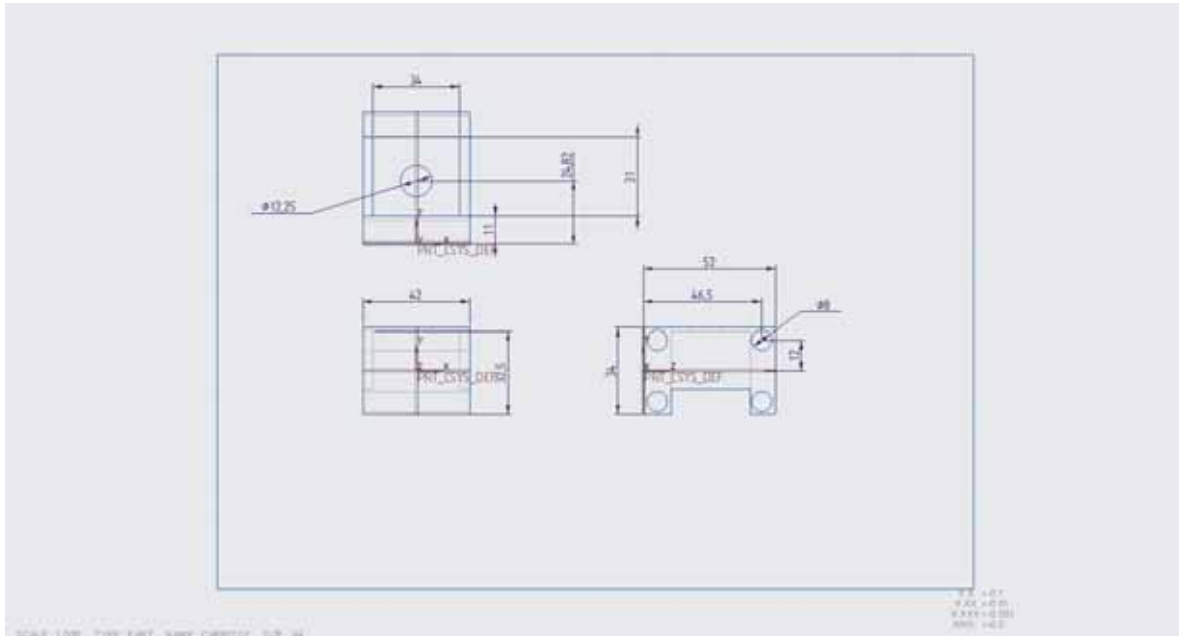
private void terminaButton_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    // Detiene el conteo del tiempo.
    myTimer.Stop();
    draw = false;
    // Regresa a la velocidad inicial del Mouse.
    int res = WinAPI.SystemParametersInfo(113, 0, 4, 0);
    label4.Text = "Número de repeticiones: " + repeticiones.ToString();
    panel1.Invalidate();
    // Indica la distancia y velocidad dependiendo del nivel seleccionado.
    if (ni == 1)
    {
        rep_T = repeticiones * 17 * 2;
        velocidad = (rep_T * 0.01) / t_transcurrido;
        label2.Text = "% Distancia recorrida: " + rep_T.ToString() + " cm";
        label3.Text = "Velocidad: " + velocidad.ToString("00.00") + " m/s";
        ni = 0;
        velocidad = 0;
    }
    if (ni == 2)
    {
        rep_T = repeticiones * 26 * 2;
        velocidad = (rep_T * 0.01) / t_transcurrido;
        label2.Text = "% Distancia recorrida: " + rep_T.ToString() + " cm";
        label3.Text = "Velocidad: " + velocidad.ToString() + " m/s";
        ni = 0;
        velocidad = 0;
    }
    if (ni == 3)
    {
        rep_T = repeticiones * 35 * 2;
        velocidad = (rep_T * 0.01) / t_transcurrido;
        label2.Text = "% Distancia recorrida: " + rep_T.ToString() + " cm";
        label3.Text = "Velocidad: " + velocidad.ToString() + " m/s";
        ni = 0;
        velocidad = 0;
    }
}

```

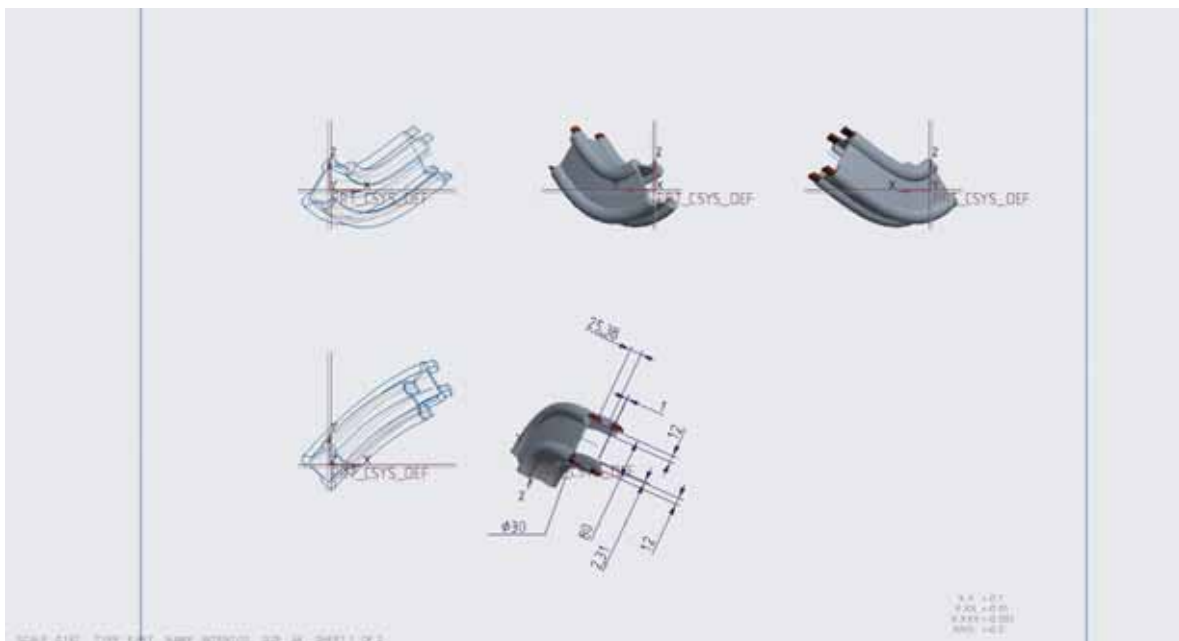
```
}  
}  
}
```

Anexo 2. Planos de sistema de rehabilitación (carrito y secciones del riel)

2.1 Plano de carrito



2.2 Plano de sección 1 del riel



2.3 Plano de sección 2 del riel

