



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
MECATRÓNICO DE PERCEPCIÓN HÁPTICA CON REALIDAD  
AUMENTADA PARA SIMULAR ACTIVIDADES BÁSICAS EN EL ÁREA  
DE ODONTOLOGÍA

AUTORES: PUSDÁ MEJÍA, KARLA ESTEFANÍA

SAIGUA PARRA, JOHANNA ALEJANDRA

DIRECTOR: MSC. GORDÓN GARCÉS, ANDRÉS MARCELO

LATACUNGA

2019



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

### **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE PERCEPCIÓN HÁPTICA CON REALIDAD AUMENTADA PARA SIMULAR ACTIVIDADES BÁSICAS EN EL ÁREA DE ODONTOLOGÍA”**, fue realizado por los señoritas **Pusdá Mejía, Karla Estefanía** y **Saigua Parra, Johanna Alejandra** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Latacunga, 12 de Julio del 2019**

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que dice "ANDRÉS GORDÓN GARCÉS". La firma está escrita sobre una línea horizontal punteada.

Ing. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

C.C.:1803698800



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotras, **Pusdá Mejía, Karla Estefanía** y **Saigua Parra, Johanna Alejandra**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE PERCEPCIÓN HÁPTICA CON REALIDAD AUMENTADA PARA SIMULAR ACTIVIDADES BÁSICAS EN EL ÁREA DE ODONTOLOGÍA”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

**Latacunga, 12 de julio del 2019**

Firma:

Firma:

***Pusdá Mejía, Karla Estefanía***

***Saigua Parra, Johanna Alejandra***

C.C.:1003907993

C.C.0604038349



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotras, **Karla Estefanía PUSDÁ MEJÍA** y **Johanna Alejandra Saigua Parra**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE PERCEPCIÓN HÁPTICA CON REALIDAD AUMENTADA PARA SIMULAR ACTIVIDADES BÁSICAS EN EL ÁREA DE ODONTOLOGÍA**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 12 de Julio del 2019

Firma:

***PUSDÁ MEJÍA, Karla Estefanía***

C.C.:1003907993

Firma:

***Saigua Parra, Johanna Alejandra***

C.C.0604038349

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con amor y apoyo incondicional me acompañaron durante esta etapa de mi vida brindándome su cariño y palabras de aliento en momentos en que los necesitaba, por ser mi mayor inspiración para salir adelante y superarme día a día. Y que con su ejemplo de sacrificio y esfuerzo me indicaron que es posible superar todos los obstáculos que se puedan presentar.

**Karla**

Dedico el presente trabajo a mi familia por siempre brindarme su apoyo incondicional, a mis hermanos porque a pesar de la distancia su amor y palabras de aliento estuvieron presentes, pero sobre todo a mis padres quienes lucharon a diario por cristalizar este sueño y por enseñarme que con esfuerzo, sacrificio y perseverancia se consiguen todas las cosas, hasta lo que parece imposible; por su confianza, amor, respeto, por ser mi inspiración para luchar día a día y con la ayuda de San Luquitas cumplir todas las metas.

A mis amigos, compañeros y a todas las personas que conocí a lo largo de mi vida universitaria por todas las aventuras, pero sobre todo experiencias vividas que de hoy en adelante serán bonitos recuerdos grabados en cada una de nuestras mentes y corazones.

**Johanna**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos infinitamente a Dios por darnos salud y vida para recorrer este camino, a cada una de nuestras familias por ser el apoyo y soporte fundamental en cada etapa de nuestras vidas.

A nuestro tutor de tesis Ing. Andrés Gordón por la guía, ayuda y consejo que nos ha brindado durante el desarrollo de este proyecto.

A los docentes y miembros de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga por los conocimientos que se nos impartió en aulas y laboratorios a lo largo de nuestra etapa como estudiantes universitarios.

A nuestros amigos por ser nuestra familia latacungeña que ha estado con nosotras en los buenos y malos momentos.

**Karla y Johanna**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
RESUMEN .....	xxii
ABSTRACT .....	xxiii

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación e importancia.....	3
1.4. Objetivos.....	4

1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5
1.5. Hipótesis.....	5
1.6. Variables de Investigación.....	6
1.6.1. Variable Independiente.....	6
1.6.2. Variable dependiente.....	6

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

2.1. Procedimientos odontológicos.....	7
2.1.1. Visualización y exploración.....	7
a. Procedimiento exploración dental .....	7
b. Instrumentos exploración dental .....	7
2.1.2. Profilaxis dental .....	9
a. Procedimiento Profilaxis dental.....	10
b. Instrumentos Profilaxis dental .....	11
2.1.3. Blanqueamiento dental .....	12
a. Procedimiento .....	12
b. Instrumentos .....	16
2.2. Percepción háptica .....	19



2.2.1. Háptica .....	20
2.2.2. Tipos de hápticos.....	20
a. Clasificación funcional.....	21
b. Clasificación por retroalimentación .....	22
2.3. Realidad aumentada.....	24
2.3.1. Historia .....	25
2.3.2. Diferencias entre realidad virtual y realidad aumentada .....	26
2.3.3. Niveles de realidad aumentada .....	26
2.4. Software de desarrollo de videojuegos.....	28
2.5. Estado del arte dispositivos hápticos.....	29
2.5.1. Dispositivos comerciales .....	29
2.5.2. Proyectos relacionados .....	31

### **CAPÍTULO III**

#### **DISEÑO MECATRÓNICO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HÁPTICO**

3.1. Parámetros de diseño.....	33
3.1.1. Metodología del diseño.....	33
3.1.2. Definición de las necesidades .....	33
3.1.3. Definición de especificaciones.....	34
3.1.4. Definición de la arquitectura del diseño .....	36

3.2. Selección de componentes del sistema.....	37
3.2.1. Módulo 1: Estación de trabajo .....	37
3.2.2. Módulo 2: Estructura mecánica .....	39
3.2.3. Módulo 3: Sensores y actuadores .....	46
a. Acelerómetro-giroscopio .....	46
b. Encoders .....	49
c. Sensor de fuerza .....	52
d. Pulsador .....	55
e. Motor vibratorio .....	58
3.2.4. Módulo 4: Control .....	60
a. Tarjeta de control .....	60
b. Sistema de comunicación .....	63
3.2.5. Módulo 5: Suministro de energía .....	67
3.3. Diseño mecánico del sistema de percepción háptica .....	70
3.3.1. Análisis de parámetros o medidas.....	70
a. Ergonomía.....	70
b. Dimensiones .....	73
3.3.2. Diseño y análisis de eslabones.....	79
3.3.3. Diseño y análisis de la herramienta .....	86

3.3.4. Diseño y análisis del eje .....	91
3.3.5. Diseño y análisis de la estructura .....	98
3.4. Análisis cinemático .....	103
3.5. Diseño electrónico del sistema de percepción háptica .....	109
3.6. Construcción del sistema de percepción háptica .....	112
3.6.1. Manufactura del dispositivo háptico .....	112
a. Corte láser de piezas en MDF .....	112
b. Impresión 3D .....	113
c. Ensamblaje .....	113
3.6.2. Implementación total .....	116

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ENTORNO CON RA**

4.1. Selección del software .....	119
4.1.1. Selección del motor de juegos .....	119
a. YOYO GAMES .....	119
b. GODOT .....	120
c. CRYENGINE .....	121
d. UNREALENGINE .....	122
e. UNITY .....	123

4.1.2. Selección del software para realidad aumentada .....	127
4.2. Diseño de interfaces .....	129
4.3. Diagramas de flujo de la programación .....	136
4.4 Implementación del simulador con RA .....	143

## **CAPÍTULO V**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

5.1. Valoración médica del sistema .....	147
5.2. Evaluación con estudiantes de odontología .....	148
5.2.1. Criterios de inclusión .....	148
5.2.2. Criterios de exclusión .....	148
5.2.3. Valoración del sistema con estudiantes.....	148
5.3. Validación de la usabilidad del sistema mecatrónico.....	163
5.4. Validación de la hipótesis .....	166
5.4.1. Planteamiento de la hipótesis.....	166
5.4.2. Variables de investigación .....	166
5.4.3. Validación de la hipótesis .....	166

**CAPÍTULO VI****CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1	Conclusiones .....	174
6.2	Recomendaciones .....	176
	<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>177</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>188</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Espejo de exploración .....	8
<b>Figura 2</b> Sonda periodonta .....	8
<b>Figura 3</b> a) Cepillo de Robinson, b) Copa de hule.....	12
<b>Figura 4</b> Colocación del aislamiento labial .....	13
<b>Figura 5</b> Resina protectora .....	13
<b>Figura 6</b> Grabado ácido de los dientes.....	14
<b>Figura 7</b> Lámpara halógena .....	15
<b>Figura 8</b> Color lechoso de los dientes tras el blanqueamiento .....	15
<b>Figura 9</b> Comparativa de: a) Antes C2 (izquierda) b) Después A1 (derecha) .....	16
<b>Figura 10</b> Guía Vitapan Classical ordenada según el valor.....	17
<b>Figura 11</b> Peróxido de hidrógeno .....	18
<b>Figura 12</b> Resina fotopolimerizable .....	18
<b>Figura 13</b> Fotopolimerizador.....	19
<b>Figura 14</b> Definición háptico .....	20
<b>Figura 15</b> Tipos de hápticos .....	21
<b>Figura 16</b> Tipos de dispositivos hápticos por Feedback.....	22
<b>Figura 17</b> Realidad aumentada .....	24
<b>Figura 18</b> Línea de tiempo de la RA.....	25
<b>Figura 19</b> Código QR .....	26
<b>Figura 20</b> Marcador de realidad aumentada.....	27
<b>Figura 21</b> Realidad aumentada con geolocalización .....	27

<b>Figura 22</b> Realidad aumentada con Google Glass .....	28
<b>Figura 23</b> Simodont Dental Trainer .....	29
<b>Figura 24</b> Virteasy Dental .....	31
<b>Figura 25</b> Necesidades del proyecto .....	34
<b>Figura 26</b> Arquitectura de diseño .....	36
<b>Figura 27</b> Componentes de la háptica: el tacto y el sentido kinestésico .....	71
<b>Figura 28</b> Medidas mandibulares estandarizadas .....	73
<b>Figura 29</b> Configuración y sección del área de trabajo del robot ROCCO .....	76
<b>Figura 30</b> Área de trabajo del brazo .....	78
<b>Figura 31</b> Diseño de la herramienta .....	78
<b>Figura 32</b> Obtención de la fuerza aplicada en el eslabón.....	80
<b>Figura 33</b> Soportes del eslabón.....	80
<b>Figura 34</b> Soportes y fuerza aplicada en el eslabón.....	81
<b>Figura 35</b> Deformación total del eslabón .....	83
<b>Figura 36</b> Tensión de Von Mises en el eslabón.....	84
<b>Figura 37</b> Factor de seguridad del eslabón .....	85
<b>Figura 38</b> Obtención de la fuerza aplicada en la herramienta .....	86
<b>Figura 39</b> Soportes de la herramienta .....	87
<b>Figura 40</b> Soportes y fuerza aplicada en la herramienta .....	87
<b>Figura 41</b> Deformación total de la herramienta .....	88
<b>Figura 42</b> Tensión de Von Mises en la herramienta .....	89
<b>Figura 43</b> Factor de seguridad de la herramienta.....	90
<b>Figura 44</b> Disposición del eje y los elementos de diseño .....	91

<b>Figura 45</b> Diagramas.....	94
<b>Figura 46</b> Propiedades mecánicas del aluminio 6061 .....	100
<b>Figura 47</b> Dimensiones del perfil de aluminio.....	101
<b>Figura 48</b> Brazo articulado con las longitudes y ángulos .....	104
<b>Figura 49</b> Desplazamiento y espesor del brazo .....	105
<b>Figura 50</b> Parámetros conocidos del brazo.....	106
<b>Figura 51</b> Posición del brazo a través de Rx y Ry.....	107
<b>Figura 52</b> Esquema de conexión con los componentes electrónicos .....	109
<b>Figura 53</b> Esquema de conexión con los diferentes pines .....	110
<b>Figura 54</b> Diseño de la placa PCB .....	111
<b>Figura 55</b> Vista superior de la placa PCB.....	111
<b>Figura 56</b> Planos para el corte láser.....	112
<b>Figura 57</b> Piezas previas para la impresión 3D .....	113
<b>Figura 58</b> Ensamblaje de la base .....	113
<b>Figura 59</b> Ensamble del acople con la base de rotación .....	114
<b>Figura 60</b> Ensamble de los eslabones .....	114
<b>Figura 61</b> Partes herramienta: a) Superior b) Inferior.....	115
<b>Figura 62</b> Ensamble final del dispositivo .....	116
<b>Figura 63</b> Dispositivo de percepción háptica en la estación de trabajo. ....	117
<b>Figura 64</b> Galaxy Tab S3.....	117
<b>Figura 65</b> Fantoma de la mandíbula.....	118
<b>Figura 66</b> Ensamblaje total estación de trabajo.....	118
<b>Figura 67</b> Interfaz de GODOT .....	121



<b>Figura 68</b> Interfaz CryEngine.....	122
<b>Figura 69</b> Interfaz Unrealengine .....	123
<b>Figura 70</b> Interfaz de Unity .....	124
<b>Figura 71</b> Evolución de Vuforia Engine .....	128
<b>Figura 72</b> Pantalla principal de la app .....	130
<b>Figura 73</b> Pantalla de log in.....	130
<b>Figura 74</b> Pantalla de registro .....	131
<b>Figura 75</b> Pantalla de la tarea 1 – Exploración.....	132
<b>Figura 76</b> Pantalla de configuración de la app .....	133
<b>Figura 77</b> Pantalla de Exploración.....	134
<b>Figura 78</b> Profilaxis dental semiprofunda .....	135
<b>Figura 79</b> Blanqueamiento dental.....	136
<b>Figura 80</b> Diagrama de flujo del funcionamiento de la app.....	137
<b>Figura 81</b> Proceso de transformación de modelo CAD .....	139
<b>Figura 82</b> Modelo del brazo en Autodesk 3ds Max .....	141
<b>Figura 83</b> Almacenamiento de datos de usuario .....	142
<b>Figura 84</b> Resultados Tarea 1- Estudiante 1 .....	151
<b>Figura 85</b> Progreso Tarea 1-Estudiante 2 .....	153
<b>Figura 86</b> Progreso Tarea 1-Estudiante 3 .....	155
<b>Figura 87</b> Progreso Tarea 2-Estudiante 1 .....	157
<b>Figura 88</b> Progreso Tarea 2-Estudiante 2 .....	159
<b>Figura 89</b> Progreso Tarea 2-Estudiante 3 .....	161

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Detalle de especificaciones</i> .....	35
<b>Tabla 2</b> <i>Módulos del sistema de percepción háptica</i> .....	37
<b>Tabla 3</b> <i>Dispositivos compatibles con ARCore</i> .....	38
<b>Tabla 4</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para el material-brazo</i> .....	41
<b>Tabla 5</b> <i>Ponderación de ergonomía para selección al material-brazo</i> .....	41
<b>Tabla 6</b> <i>Ponderación de costo para selección al material-brazo</i> .....	42
<b>Tabla 7</b> <i>Ponderación de peso para selección al material-brazo</i> .....	42
<b>Tabla 8</b> <i>Selección de la alternativa del material-brazo</i> .....	43
<b>Tabla 9</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para el material-herramienta</i> .....	43
<b>Tabla 10</b> <i>Ponderación de ergonomía para selección al material-herramienta</i> .....	44
<b>Tabla 11</b> <i>Ponderación de flexibilidad para selección al material-herramienta</i> .....	44
<b>Tabla 12</b> <i>Ponderación de alternativas de selección al material-herramienta</i> .....	45
<b>Tabla 13</b> <i>Selección de la alternativa del material-herramienta</i> .....	45
<b>Tabla 14</b> <i>Comparación entre las características del sensor giroscopio</i> .....	46
<b>Tabla 15</b> <i>Ponderación de criterios de evaluación para el sensor giroscopio</i> .....	47
<b>Tabla 16</b> <i>Ponderación de disponibilidad en el mercado del sensor giroscopio</i> .....	47
<b>Tabla 17</b> <i>Ponderación de costo para selección al sensor giroscopio</i> .....	48
<b>Tabla 18</b> <i>Ponderación de la calibración para selección al sensor giroscopio</i> .....	48
<b>Tabla 19</b> <i>Selección de la alternativa del sensor giroscopio</i> .....	48
<b>Tabla 20</b> <i>Comparación entre las características de los encoders incrementales</i> .....	49

<b>Tabla 21</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el Encoder.....</i>	50
<b>Tabla 22</b>	<i>Ponderación de precisión para selección al encoder.....</i>	50
<b>Tabla 23</b>	<i>Ponderación de costo para selección del encoder.....</i>	51
<b>Tabla 24</b>	<i>Ponderación de la calibración para selección al encoder .....</i>	51
<b>Tabla 25</b>	<i>Selección de la alternativa del encoder .....</i>	52
<b>Tabla 26</b>	<i>Comparación entre las características de los sensores de fuerza .....</i>	52
<b>Tabla 27</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el sensor de fuerza .....</i>	53
<b>Tabla 28</b>	<i>Ponderación de precisión para selección al sensor de fuerza .....</i>	53
<b>Tabla 29</b>	<i>Ponderación de tamaño para selección al sensor de fuerza .....</i>	54
<b>Tabla 30</b>	<i>Ponderación del rango medición para selección al sensor de fuerza .....</i>	54
<b>Tabla 31</b>	<i>Selección de la alternativa del sensor de fuerza.....</i>	54
<b>Tabla 32</b>	<i>Comparación entre las características de los pulsadores.....</i>	55
<b>Tabla 33</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el pulsador.....</i>	56
<b>Tabla 34</b>	<i>Ponderación de facilidad de trabajo para selección al pulsador .....</i>	56
<b>Tabla 35</b>	<i>Ponderación de tamaño para selección del pulsador .....</i>	57
<b>Tabla 36</b>	<i>Selección de la alternativa del pulsador.....</i>	57
<b>Tabla 37</b>	<i>Comparación entre las características de los motores vibradores.....</i>	58
<b>Tabla 38</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el motor vibrador .....</i>	58
<b>Tabla 39</b>	<i>Ponderación de facilidad de trabajo para selección al motor vibrador .....</i>	59
<b>Tabla 40</b>	<i>Ponderación de tamaño para alternativas de selección motor vibrador... ..</i>	59
<b>Tabla 41</b>	<i>Selección de la alternativa del motor vibrador .....</i>	60
<b>Tabla 42</b>	<i>Comparación entre las características de la tarjeta de control .....</i>	61
<b>Tabla 43</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para la tarjeta de control.....</i>	61

<b>Tabla 44</b>	<i>Ponderación de número de E/S para selección de la tarjeta de control...</i>	62
<b>Tabla 45</b>	<i>Ponderación de implementación para selección de la tarjeta de control .</i>	62
<b>Tabla 46</b>	<i>Ponderación de memoria para selección de la tarjeta de control .....</i>	63
<b>Tabla 47</b>	<i>Selección de la alternativa de la tarjeta de control.....</i>	63
<b>Tabla 48</b>	<i>Comparación entre las características de sistemas de comunicación .....</i>	64
<b>Tabla 49</b>	<i>Ponderación de criterios de selección para sistema de comunicación ....</i>	64
<b>Tabla 50</b>	<i>Ponderación del alcance de transmisión del sistema de comunicación...</i>	65
<b>Tabla 51</b>	<i>Ponderación de la velocidad del sistema de comunicación .....</i>	65
<b>Tabla 52</b>	<i>Ponderación de la configuración del sistema de comunicación.....</i>	66
<b>Tabla 53</b>	<i>Selección de la alternativa del sistema de comunicación .....</i>	66
<b>Tabla 54</b>	<i>Comparación entre dispositivos de suministro de energía.....</i>	67
<b>Tabla 55</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el suministro de energía....</i>	68
<b>Tabla 56</b>	<i>Ponderación para selección al suministro de energía.....</i>	68
<b>Tabla 57</b>	<i>Ponderación de tamaño para selección al suministro de energía.....</i>	69
<b>Tabla 58</b>	<i>Selección de la alternativa del suministro de energía.....</i>	69
<b>Tabla 59</b>	<i>Ejemplos de medidas físicas según la norma ISO TC159/SC4/WG9.....</i>	72
<b>Tabla 60</b>	<i>Valores promedio en mm de la mandíbula .....</i>	73
<b>Tabla 61</b>	<i>Medidas promedio de los dientes según Ash (mm) .....</i>	74
<b>Tabla 62</b>	<i>Características a tener en cuenta para la selección de un robot .....</i>	75
<b>Tabla 63</b>	<i>Especificaciones técnicas del Touch-X.....</i>	76
<b>Tabla 64</b>	<i>Propiedades físicas del MDF.....</i>	79
<b>Tabla 65</b>	<i>Propiedades físicas del PLA.....</i>	86
<b>Tabla 66</b>	<i>Valor de la carga aplicada sobre el eje.....</i>	93

<b>Tabla 67</b>	<i>Masa y peso de cada elemento del dispositivo háptico .....</i>	98
<b>Tabla 68</b>	<i>Cargas de la estructura de la estación de trabajo.....</i>	99
<b>Tabla 69</b>	<i>Valores para el momento de inercia del perfil de aluminio.....</i>	102
<b>Tabla 70</b>	<i>Valores dimensionales de los parámetros geométricos del brazo .....</i>	105
<b>Tabla 71</b>	<i>Licencias que ofrece YoYo Games.....</i>	120
<b>Tabla 72</b>	<i>Comparación entre las características de los motores de juegos.....</i>	124
<b>Tabla 73</b>	<i>Ponderación de criterios de evaluación para el motor de juegos.....</i>	125
<b>Tabla 74</b>	<i>Ponderación de compatibilidad para selección del motor de juegos.....</i>	126
<b>Tabla 75</b>	<i>Ponderación de multiplataforma para selección del motor de juegos....</i>	126
<b>Tabla 76</b>	<i>Ponderación de facilidad de uso para selección del motor de juegos....</i>	126
<b>Tabla 77</b>	<i>Selección de la alternativa del motor de juego .....</i>	127
<b>Tabla 78</b>	<i>Características de Vuforia Engine.....</i>	128
<b>Tabla 79</b>	<i>Tarea 1: procedimiento de Exploración. ....</i>	144
<b>Tabla 80</b>	<i>Tarea 2: procedimiento de Limpieza o Profilaxis Semiprofunda. ....</i>	145
<b>Tabla 81</b>	<i>Tarea 3: procedimiento de Blanqueamiento .....</i>	146
<b>Tabla 82</b>	<i>Información de estudiantes seleccionados .....</i>	148
<b>Tabla 83</b>	<i>Avances del estudiante 1 en el procedimiento 1.....</i>	150
<b>Tabla 84</b>	<i>Avances del estudiante 2 en el procedimiento 1.....</i>	152
<b>Tabla 85</b>	<i>Avances del estudiante 3 en el procedimiento 1.....</i>	154
<b>Tabla 86</b>	<i>Avances del estudiante1 en el procedimiento 2.....</i>	156
<b>Tabla 87</b>	<i>Avances del estudiante 2 en el procedimiento 2.....</i>	158
<b>Tabla 88</b>	<i>Avances del estudiante 3 en el procedimiento 2.....</i>	160
<b>Tabla 89</b>	<i>Avances del estudiante 1 en el procedimiento 3.....</i>	162

<b>Tabla 90</b> <i>Test SUS en estudiantes</i> .....	164
<b>Tabla 91</b> <i>Datos obtenidos de pruebas de funcionamiento</i> .....	168
<b>Tabla 92</b> <i>Datos de frecuencia esperada</i> .....	170
<b>Tabla 93</b> <i>Datos calculados de Chi-cuadrado</i> .....	172

## **RESUMEN**

El sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada se basa en una combinación de tecnologías, los dispositivos de percepción háptica, la realidad aumentada y software para desarrollo de videojuegos. Se realiza una amplia investigación acerca de las actividades básicas de la odontología y se considera trabajos previos que implementan estas tecnologías en el ámbito de la educación. Esta información permitirá integrar las actividades de exploración, profilaxis dental semi profunda y blanqueamiento dental a una aplicación desarrollada a manera de videojuego con realidad aumentada. Se aplica la metodología de diseño concurrente para el diseño del sistema, el método ordinal corregido permite realizar una selección de componentes de manera eficiente y ordenada. Para el diseño dispositivo de percepción háptica se realizó un modelo CAD para posteriormente realizar también un análisis de dicho modelo, así como un análisis cinemático. El sistema cuenta con una base de datos en donde se registran los usuarios y las calificaciones al someterse a la evaluación, las pruebas de funcionamiento se realizaron con tres estudiantes en un lapso de tres días con dos sesiones diarias por estudiante, del análisis de resultados se pudo verificar que el sistema permitía simular las actividades básicas de odontología antes mencionadas.

### **Palabras clave:**

- **DISPOSITIVO HÁPTICO**
- **REALIDAD AUMENTADA**
- **PROFILAXIS DENTAL**

## **ABSTRACT**

The mechatronic system of haptic perception with augmented reality is based on a combination of technologies, haptic perception devices, augmented reality and software for videogame development. Extensive research is carried out on the basic activities of dentistry and it is considered previous work that implements these technologies in the field of education. This information will allow the integration of exploration activities, semi-deep dental prophylaxis and teeth whitening to an application developed as a video game with augmented reality. The concurrent design methodology is applied to the system design, the corrected ordinal method allows to make a selection of components in an efficient and orderly manner. For the design of the haptic perception device, a CAD model was carried out to subsequently also perform an analysis of said model, as well as a kinematic analysis. The system has a database where users are registered and the qualifications when undergoing the evaluation, the performance tests were performed with three students in a span of three days with two daily sessions per student, the analysis of results is He was able to verify that the system allowed simulating the basic dental activities mentioned above.

### **Keywords:**

- **HAPPY DEVICE**
- **AUGMENTED REALITY**
- **DENTAL PROPHYLAXIS**



# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del problema

Actualmente en las Instituciones de Educación Superior del país que ofertan la carrera de Odontología, existen algunos dispositivos tecnológicos para mejorar y desarrollar las actividades y destrezas de los estudiantes; como son los simuladores de odontología, sin embargo, no todas las universidades cuentan con dichos módulos, únicamente dos universidades privadas pueden costear su adquisición. Mientras que en las universidades públicas es escaso el número de equipos tecnológicos que ayuden a los estudiantes a fortalecer sus conocimientos teóricos y llevarlos a la práctica.

Los estudiantes de odontología no cuentan con herramientas que les permita potenciar sus habilidades psicomotoras mediante prácticas por lo cual hay una alta probabilidad de cometer errores, además este hecho afecta la confianza y seguridad al momento de trabajar con pacientes reales.

Es preciso realizar el presente proyecto ya que hasta la fecha en el Ecuador no se ha realizado investigación referente a la aplicación de sistemas de percepción háptica con realidad aumentada enfocada al área de Odontología; es por ello que es relevante analizar esta temática y asentar las bases necesarias para que se realicen futuras investigaciones en este ámbito.

El mundo presenta una constante innovación y transformación tecnológica en la práctica clínica, para optimizar el aprendizaje, se han creado modelos tecnológicos más avanzados en la simulación pasando de lo tradicional a lo virtual, pero lamentablemente la tecnología en el Ecuador no se actualiza al ritmo de los países de primer mundo, lo que representa un problema grave para el desarrollo y aplicación de estas tecnologías.

## **1.2. Antecedentes**

Desde la antigüedad se trataban los problemas dentales, pero se sentaron bases científicas con la publicación del libro reconocido como el padre de la odontología de Pierre Fauchard, se inventó la seda dental, el primer aparato de rayos X, los implantes de dientes, el cepillo eléctrico, los tratamientos blanqueantes y a partir de los años 2000 los avances tecnológicos han permitido a la odontología avanzar a pasos agigantados. (Unidental, 2014)

En el Ecuador la carrera de Odontología es ofertada por 15 centros de Educación Superior, de los cuales 10 fueron acreditados por el Consejo de Evaluación, Acreditación y Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior (Ceaaces) en el 2016. El 67% de la oferta académica en el área de Odontología fue acreditado, según el Ceaaces. Esta población representa 6 395 estudiantes en total, divididos en instituciones públicas el 39%, cofinanciadas el 33% y particulares el 28%. (El Comercio, 2016)

En la actualidad los simuladores han evolucionado acorde al material, características y forma de operación, un ejemplo es la empresa MOOG que ha

desarrollado el “Moog SIMODONT Dental Trainer” para ayudar a los estudiantes a practicar de manera más eficiente y aprender más rápido; estos simuladores han sido adquiridos por la Universidad Occidental, Universidad de Pennsylvania, Universidad Europea de Madrid, Escuela de Odontología de Leeds en Reino Unido, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, entre otras, a un precio elevado. (MOOG, 2016)

La misión principal de las escuelas de odontología es formar un profesional de alto nivel con capacidad de trabajar independientemente sin supervisión. La práctica profesional es la aplicación de procesos que permiten al odontólogo reconocer la información pertinente en una prestación para tomar decisiones acertadas, evaluar los resultados de las decisiones terapéuticas, y evaluar su propio desempeño. (Ticona, 2014)

Los simuladores de realidad aumentada son esenciales en la educación actual, proporcionan muchos beneficios en el área de odontología y se evalúan de manera constante como un complemento o un método para perfeccionar las habilidades motrices finas, mejorar la coordinación mano-ojo en entornos preclínicos y en la capacitación superar los desafíos monetarios e intelectuales involucrados.

### **1.3. Justificación e importancia**

Los estudiantes de odontología son beneficiados con la práctica mediante uso de simuladores en odontología, ya que complementa los conocimientos teóricos previamente adquiridos y estimula a su vez buscar nuevas tecnologías para el mejor aprendizaje. Los simuladores sirven para la mejor preparación previa a tratar pacientes, ya que les permite a los estudiantes reconocer los errores y corregirlos.

Hasta el momento, no existen simuladores basados en hápticos y realidad virtual en la mayoría de universidades del Ecuador que ofertan la carrera de Odontología, especialmente en las universidades públicas ya que un equipo que integre estas tecnologías tiene un alto costo en el mercado extranjero.

La importancia del presente proyecto consiste en proveer un simulador odontológico basado en un sistema háptico y realidad virtual realizado con software para desarrollo de videojuegos 3D, multiplataforma; brindando a estudiantes de odontología la capacidad de realizar prácticas simuladas con el fin de desarrollar y afianzar sus conocimientos, experimentando una nueva forma de potenciar sus habilidades y minimizando la probabilidad de cometer errores durante la atención a pacientes.

Este sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada aplicado a la odontología, tendrá un menor costo en comparación con sus similares existentes en el mercado, siendo más accesible para implementar en universidades que no cuentan con presupuesto para su adquisición. Otro aspecto importante es que incrementa los niveles de confianza y habilidad en los usuarios, para su posterior aplicación con pacientes reales.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada para simular actividades básicas en el área de odontología.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Investigar el estado del arte correspondiente al uso de hápticos y realidad aumentada en simuladores de odontología.
- Analizar y seleccionar componentes y materiales que cumplen con los requisitos para la finalidad del proyecto.
- Diseñar la estructura del simulador mediante el uso de software de diseño asistido por computador.
- Construir la estructura diseñada que permita colocar sensores y elementos adicionales utilizando materiales existentes en el mercado.
- Seleccionar el software que facilite la creación de entornos virtuales y la adaptación del dispositivo háptico.
- Diseñar interfaces interactivas que permitan el desarrollo de actividades específicas dentro del campo de la odontología.
- Desarrollar algoritmos de programación para la interacción del usuario con el entorno virtual.
- Validar la hipótesis mediante el análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento realizadas.

### 1.5. Hipótesis

¿El sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada simulará actividades básicas en el área de odontología?

## **1.6. Variables de Investigación**

### **1.6.1. Variable Independiente**

Sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada

### **1.6.2. Variable dependiente**

Evaluación confiable de la simulación de las actividades básicas en el área de odontología.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1. Procedimientos odontológicos

##### 2.1.1. Visualización y exploración

###### a. Procedimiento exploración dental

Se debe considerar lo siguiente:

- Dientes presentes en boca: los dientes ausentes se señalarán en el odontograma con el símbolo correspondiente.
- Caries: se debe dibujar en el odontograma los datos clínicos y radiológicos, esto como parte del estudio de la caries dental. Cuando se detecte la presencia de caries se dibujar con color rojo; las obturaciones en negro o azul. (Baca, Rosel, & González, 2018)

###### b. Instrumentos exploración dental

La exploración intrabucal es realizada mediante el uso de la bandeja de exploración, la misma que tiene los cuatro elementos que se describen a continuación:

- **Espejo de exploración.** Sirve para proteger y separar los tejidos bucales, asimismo ayuda reflejando la luz del equipo para mejorar la visión en zonas complicadas. Tiene una parte activa la misma que va atornillada sobre el mango. Ver Figura 1.



**Figura 1** Espejo de exploración

Fuente: (Universidad Rey Juan Carlos, 2014)

- **Sonda periodontal.** Es utilizada solo cuando se realiza una exploración periodontal. Tiene un código de colores (negro y gris) y una marcación cada 3 mm que sirven para facilitar la determinación de la profundidad de la bolsa periodontal. Ver Figura 2. (Universidad Rey Juan Carlos, 2014)



**Figura 2** Sonda periodontal

Fuente: (Universidad Rey Juan Carlos, 2014)



### **2.1.2. Profilaxis dental**

Es un procedimiento preventivo que quita la placa bacteriana y manchas exógenas por medios mecánicos y pastas profilácticas para prevenir caries y enfermedades periodontales.

Esta actividad debe ser realizada por el Cirujano Dental y/o Higienista capacitada, en los establecimientos de salud con consultorio odontológico, en la comunidad y en los centros escolares que cuenten con energía eléctrica, utilizando el equipo odontológico portátil, de lo contrario deberá hacerse de forma manual con cepillo para dientes. (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social El Salvador, 2004)

#### **Tipos de profilaxis**

El especialista en odontología es el encargado de determinar el tipo de profilaxis dental, existen cuatro tipos principalmente que se detallan a continuación:

- **Limpieza sencilla**

También llamada tartrectomía, se realiza cada 6 meses, se aplica solamente para dentaduras y encías sanas, es decir en pacientes que tienen una adecuada higiene dental y consiste en eliminar las manchas, el sarro y la placa dental.

- **Limpieza semiprofunda**

Se emplea cuando el paciente no se ha realizado una limpieza dental nunca o en varios años, se deben eliminar las manchas, el sarro y la placa, conjuntamente con una limpieza general.

- **Limpieza profunda**

Se realiza cuando existen casos de movilidad dental o enfermedad periodontal, sangrado de encías, bolsas periodontales; dentro del procedimiento se le agrega un raspado y alisado radicular, y a veces existe la necesidad de aplicar anestesia y revisiones permanentes del paciente.

- **Tratamiento periodontal**

Se emplea después de haber realizado una limpieza profunda o un tratamiento de raspado con el objetivo de que la enfermedad periodontal se mantenga estable; dentro del procedimiento se complementa con controles y revisiones para mejorar encías y dientes. (Athenea Dental Institute, 2017)

**a. Procedimiento Profilaxis dental**

Seguir los siguientes pasos:

- Preparar la pasta profiláctica con la mezcla de agua y piedra pómez o utilizar pasta profiláctica comercial.
- Pasar la pasta profiláctica por todas las superficies de las piezas dentales, utilizando aparato manual o rotatorio y en una sola cita.
- Enjuagar con abundante agua
- Limpiar para retirar la pasta profiláctica que pueda haber salpicado durante el proceso.
- Motivación y educación en higiene bucal al paciente (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social El Salvador, 2004)

## **b. Instrumentos Profilaxis dental**

- Espejo bucal clínico: posibilita la visualización indirecta en áreas imposibles de observar directamente, el espejo bucal clínico permite mantener la postura correcta al trabajar en regiones de acceso difícil, en las cuales la visión directa solamente sería posible asociada a una postura de trabajo inadecuada.
- Explorador dental: es el principal instrumento del tacto. Empleado de forma delicada y sin presión excesiva, posibilita la percepción de irregularidades en las superficies.
- Sonda periodontal: es empleada en el diagnóstico periodontal, para permitir la detección y medición de bolsas. Sin embargo, sus demarcaciones (medidas numéricas en mm) también sirven como referencia para medir las características de la preparación cavitaria y de las restauraciones.
- Cepillo de Robinson, copa de Hule, pasta profiláctica (Figura 3): son utilizadas para la limpieza de las superficies dentales, a fin de permitir una mejor evaluación táctil-visual durante el diagnóstico, o para asegurar una mejor efectividad a los procedimientos adhesivos durante la confección de las restauraciones. Las copas de hule son indicadas para las superficies lisas y libres, al paso de los cepillos son mejor indicados para las superficies oclusales, inherentemente irregulares. (Baratieri, y otros, 2011)



**Figura 3** a) Cepillo de Robinson, b) Copa de hule  
Fuente: (Baratieri, y otros, 2011)

### 2.1.3. Blanqueamiento dental

#### a. Procedimiento

El blanqueamiento vital en clínica generalmente utiliza el peróxido de hidrógeno que puede activarse o no con una fuente de luz. Requiere realizar las siguientes fases:

##### a. Profilaxis

Consiste en la retirada cuidadosa de la placa dental o sarro, ya que las mismas podrían interferir en el blanqueamiento.

##### b. Registro de color

Mediante el uso de la guía VITA se debe medir el tono de color del diente, al compararla con una fotografía del diente.

##### c. Aislamiento de tejidos blandos

Consiste en la protección de los labios aplicándoles vaselina y un abre bocas anatómico específico como el de la Figura 4 con la finalidad de proteger la mucosa labial y a la vez visualizar el campo dental.



**Figura 4** Colocación del aislamiento labial

Fuente: (Canals & Masgrau, 2011)

Después protegeremos la mucosa gingival con un aislamiento exhaustivo con dique de goma como se observa en la Figura 5. Lo que es preferible, ya que nos da más control en caso de filtración de gel. La resina debe cubrir entre 1 y 2 mm de encía.



**Figura 5** Resina protectora

Fuente: (Canals & Masgrau, 2011)

#### d. Colocación de gel de peróxido

Se colocará diente por diente, en la cara vestibular con un pincel o espátula con mucho cuidado de no tocar la encía. Durante el tiempo de actuación de irá

removiendo cada 4-5 minutos y añadiendo cuando se seque, ya que el  $H^2O^2$  es muy volátil (Figura 6).



**Figura 6** Grabado ácido de los dientes  
Fuente: (Canals & Masgrau, 2011)

El tiempo de aplicación varía mucho entre diferentes autores. Goldstein y Garber propugnan 30 minutos, pero los estudios más actuales coinciden en realizar tres aplicaciones seguidas en 15 minutos cada una. Puede aplicarse luz para activar el proceso y acelerarlo.

#### **e. Aplicación de una fuente de luz o calor**

Históricamente la aplicación de calor ha sido uno de los métodos más manejados para el blanqueamiento dental. La luz halógena cuya longitud de onda es amplia y es  $<380\text{nm}$ . Necesita filtros para eliminar infrarrojos que aumentan la temperatura  $400\text{-}580\text{ nm}$ . Es la que más aumenta la temperatura y por tanto conlleva más peligro pulpar. Ver Figura 7.



**Figura 7** Lámpara halógena  
Fuente: (Canals & Masgrau, 2011)

Sobre la eficacia de la luz, hay controversia en la literatura, el beneficio de la lámpara es limitado. No se diferencian los resultados con o sin luz.

#### **f. Retirada del gel**

Se succiona previamente el gel con un aspirador quirúrgico y seguidamente se procede a irrigar copiosamente los dientes. En la Figura 8 se observa los dientes en este momento aparece deshidratada y de color lechoso.



**Figura 8** Color lechoso de los dientes tras el blanqueamiento  
Fuente: (Canals & Masgrau, 2011)

### g. Fotografía

Al finalizar el proceso de blanqueamiento se repite la fotografía para posteriormente compararla con la guía de colores en el mismo plano focal teniendo en cuenta que el resultado obtenido es una mezcla de blanqueamiento, junto con la deshidratación producida y restos de peróxido existentes. (Canals & Masgrau, 2011) Ver Figura 9.



**Figura 9** Comparativa de: a) Antes C2 (izquierda) b) Después A1 (derecha)  
Fuente: (Canals & Masgrau, 2011)

### b. Instrumentos

- **Guía VITA**

Dentro de esta guía existe un orden de los colores, el mismo que puede realizarse de acuerdo al valor o a las familias de tintes, consta de 16 muestras las mismas que están divididas en diversos grupos, tal como se observa en la Figura 10.

Los grupos se clasifican en:

- A: marrón y rojizo
- B: rojizo y amarillo



- C: gris
- D: gris y rojizo (Arboleda, 2017)

Según el valor se clasifica de tal manera que siguen un orden decreciente:

B1–A1–B2–D2–A2–C1–C2–D4–A3–D3–B3–A3, 5–B4–C3–A4–C4



**Figura 10** Guía Vitapan Classical ordenada según el valor  
Fuente: (Arboleda, 2017)

- **Peróxido de hidrógeno**

La recomendación habitual es de la utilización de peróxido de hidrógeno a concentraciones de entre el 20 y 40%. Se trata de altas concentraciones muy superiores a las utilizadas en los tratamientos de blanqueamiento dental casero. Este producto, gracias a su peso molecular, posee la capacidad de penetrar a través del esmalte llegando a la pulpa dental. Cuando alcanza el tejido dentario libera oxígeno y se producen reacciones de foto-oxidación que tienen como resultado el cambio de estructura de los pigmentos orgánicos perdiendo su capacidad de coloración sobre el diente. Ver Figura 11. (Odontomecum, 2017)



**Figura 11** Peróxido de hidrógeno  
Fuente: (Odontomecum, 2017)

- **Resina fotopolimerizable**

Es un material basado en metacrilato diseñado para aislar el tejido adyacente a los dientes que vayan a blanquearse, es fotopolimerizable y tiene la capacidad de reflejar la luz para mantener los tejidos aislados frente al calor. Ver Figura 12. (Ultradent Products, 2019)



**Figura 12** Resina fotopolimerizable

Fuente: (Ultradent Products, 2019)

- **Fotopolimerizador - Luz azul**

El fotopolimerizador (ver Figura 13) es un aparato emisor de luz en el espectro visible orientado a la coloración azulada, con una longitud de onda de aproximadamente 400nm a 520nm (nanómetros), que activa el bis-gma de la resina compuesta y productos

odontológicos fotopolimerizados endureciéndolos. La polimerización se trata de la reacción química a la luz del aparato, donde los monómeros del compuesto se unifican, endureciendo y fijando la resina al diente. (EL dentista académico, 2016)



**Figura 13** Fotopolimerizador  
Fuente: (EL dentista académico, 2016)

## 2.2. Percepción háptica

Percepción táctil es la información adquirida cuando el receptor adopta una postura estática. es decir la mantiene durante el proceso de estimulación.

Percepción kinestésica es la información proporcionada por los músculos y tendones.

La percepción háptica proporciona información válida de los objetos del espacio a través de la combinación de los componentes táctil y kinestésico, por lo tanto, es la percepción de la información obtenida únicamente a través del uso activo de manos y dedos, descartando la estimulación suministrada directamente en la mano del perceptor es decir la receptividad pasiva. (Ballesteros, 1993)

### 2.2.1. Háptica

Háptica proviene de la palabra griega haptesthai, que significa relacionada con el sentido del tacto.

En psicología y neurociencia, se define como el estudio de la sensibilidad al tacto humano, a través de la kinestésica (fuerza/posición) y los receptores cutáneos (táctiles), ver Figura 14.

En la robótica y la RA, es definida como las interacciones táctiles reales y simuladas entre robots y humanos. (Hannaford & Okamura, 2016)



Los sentidos táctiles trabajan conjuntamente con el sistema de control de motores para:

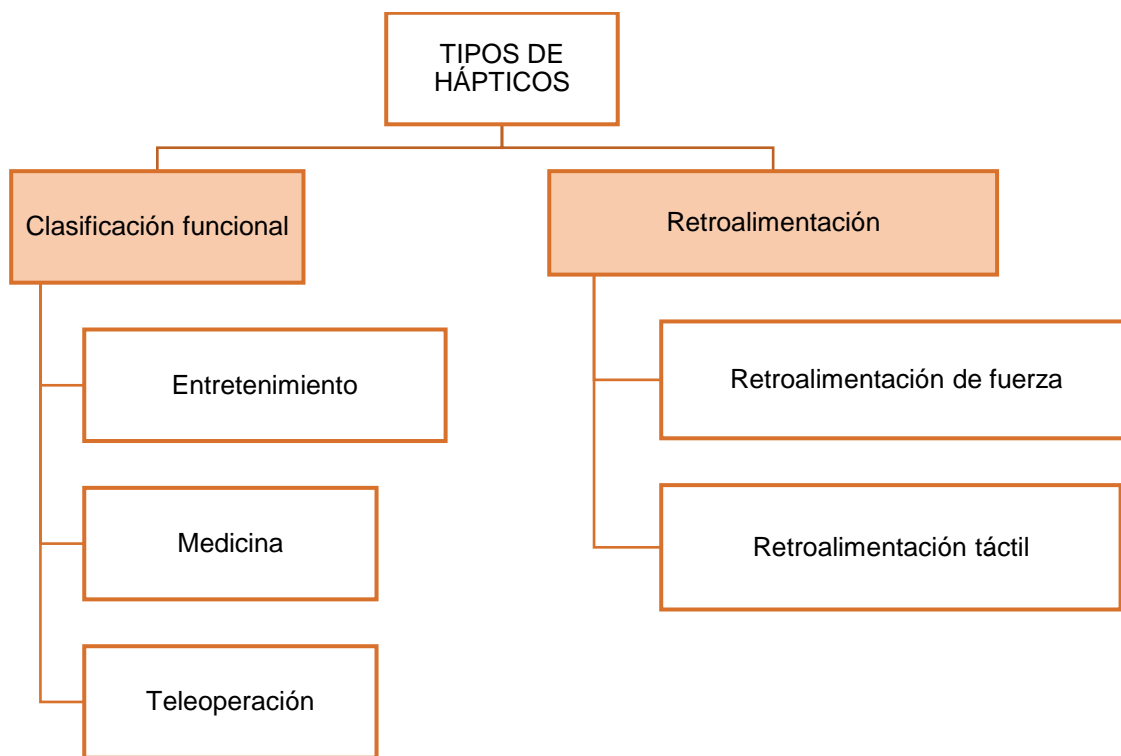
- Coordinar movimientos
- Permitir la percepción

**Figura 14** Definición háptico

Fuente: (Okamura, 2018)

### 2.2.2. Tipos de hápticos

La clasificación se realiza en función de la finalidad y según el tipo de respuesta háptica como se observa en la Figura 15.



**Figura 15** Tipos de hápticos  
Fuente: (Toribio & Torronteras, 2015)

#### a. Clasificación funcional

- **Entretenimiento**

Esta tecnología permite al usuario sentir y manipular objetos virtuales en videojuegos y simuladores haciendo sentir al usuario a través de la vibración las irregularidades en los juegos.

- **Medicina**

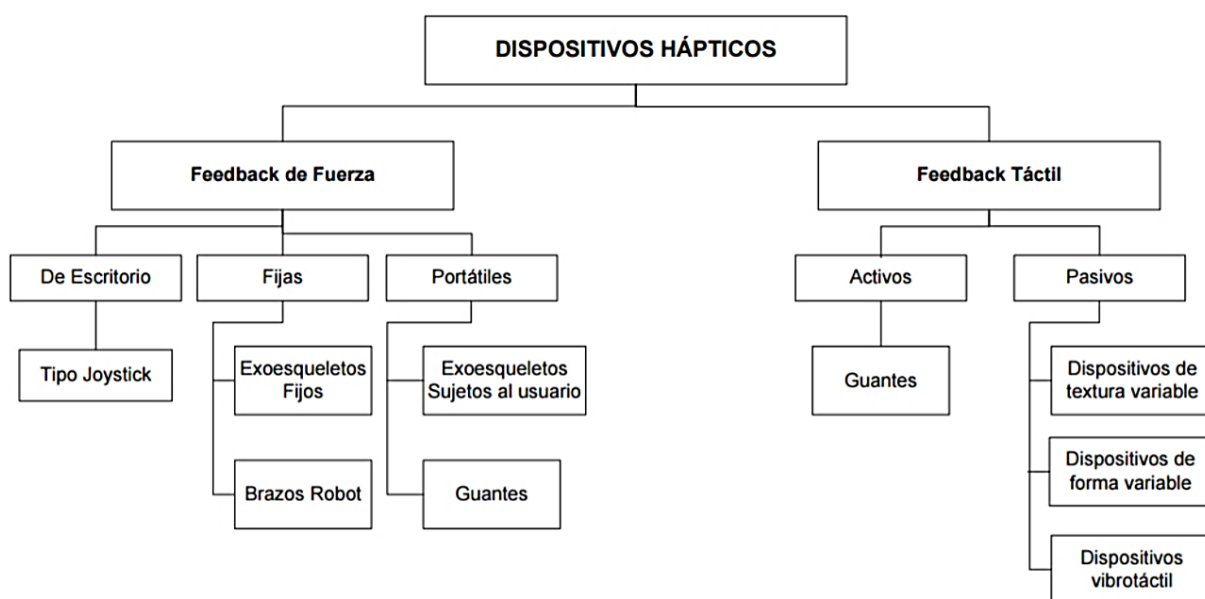
Permite crear entornos de formación y realizar simulaciones de operaciones quirúrgicas, contribuyendo a mejorar destrezas y técnicas quirúrgicas complejas.

- **Teleoperación**

Controla de forma remota las herramientas y obtiene información táctil del extremo del robot.

**b. Clasificación por retroalimentación**

Se clasifican en dos grandes grupos, retroalimentación de fuerza y retroalimentación táctil, como se observa en la Figura 16.



**Figura 16** Tipos de dispositivos hápticos por Feedback

Fuente: (Toribio & Torronteras, 2015)

- **Retroalimentación de fuerza**

Proporciona datos de dureza y del peso del objeto virtual, además puede simular características como elasticidad, viscosidad, adherencia, etc.

- **Retroalimentación táctil**

Proporciona información sobre la geometría del objeto virtual, la temperatura o rugosidad a través de receptores que se encuentran en la piel. Este se clasifica en dos grandes grupos: el tacto activo y pasivo, mientras el tacto activo es en el que el usuario palpa al objeto, el pasivo recibe información sin buscarla es decir podemos ser tocados sin movernos.

El tacto pasivo a su vez es clasificado en función de los actuadores:

**Vibradores:** usan motores eléctricos que con una determinada frecuencia hacen vibrar la piel en el lugar que están colocados.

**Neumáticos:** usan un sistema de comprensión de aire que produce una sensación táctil en el lugar localizado.

**Mecánicos:** usan actuadores mecánicos que simulan las texturas, están formados por una matriz de pequeñas agujas las mismas que se encargan de ejercer presión sobre la piel del usuario.

**Electrocutáneos:** usan una pequeña corriente eléctrica para producir estímulos similares a los mecanorreceptores (células nerviosas) de la piel, mediante una serie de electrodos colocados en la zona deseada.

**Térmicos:** usan módulos termoelectrónicos que son los encargados de generar un gradiente térmico que se encuentra en función de la tensión aplicada sobre la piel. (Toribio & Torronteras, 2015)

## Dispositivos vibrotáctiles

La generación de las sensaciones vibrotáctiles es la forma más fácil y actualmente la más extendida para proporcionar retroalimentación háptica. Se puede utilizar para muchos fines entre ellos: proporcionar alertas silenciosas e invisibles (buscapersonas), advertencias, mensajes codificados temporal y espacialmente, la sustitución sensorial y en los controles de aviónica. Actualmente la aplicación dominante de los dispositivos vibrotáctiles es la mejora háptica de los juegos en general, y de los mandos de juegos en particular. (Hayward & Maclean, 2007)

### 2.3. Realidad aumentada

Augmented Reality en inglés y AR acrónimo que es utilizado comúnmente, es la tecnología que consiste en combinar en tiempo real la información digital por medio de oportunas interfaces computarizadas (Figura 17). (Inglobe Technologies Srl, 2011)



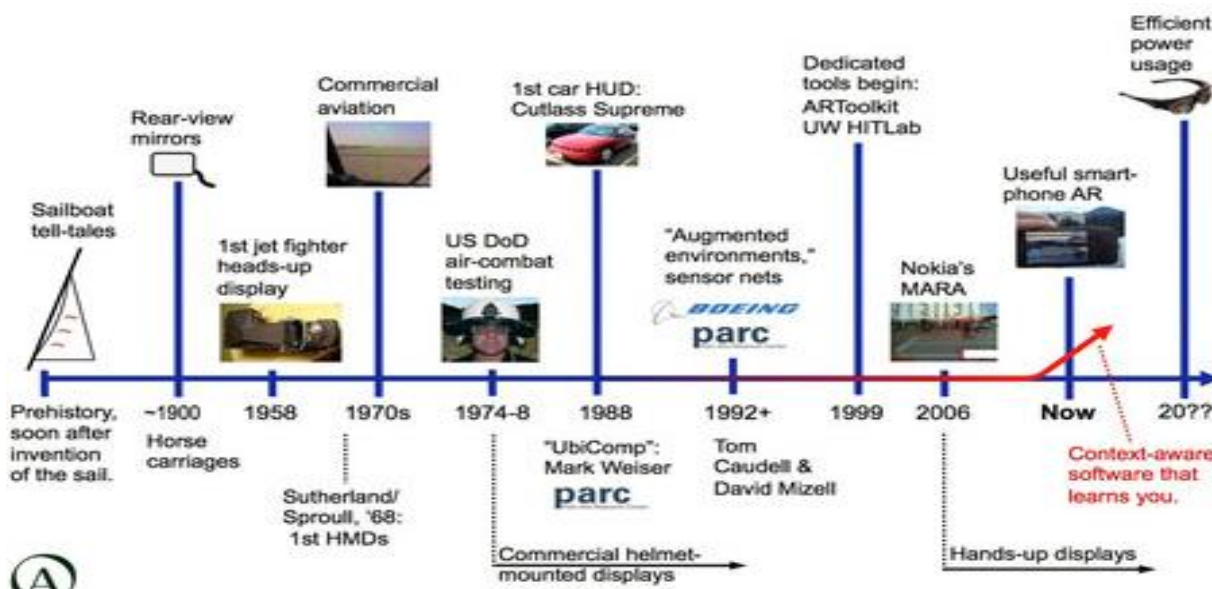
**Figura 17** Realidad aumentada  
Fuente: (Multimedia gratis, 2017)



### 2.3.1. Historia

La expresión “realidad aumentada” tuvo su origen en 1992 por el profesor Thomas Preston Caudel para describir un sistema de nueva generación que se encargue del ensamble e instalación de cables eléctricos en los aviones. Ver Figura 18.

Después se definió como una tecnología experimental estudiada en laboratorios y universidades del mundo, para posteriormente ser usada en el entretenimiento, visualización avanzada, el soporte, la proyección, la medicina, la editorial, etc. (Inglobe Technologies Srl, 2011)



**Figura 18** Línea de tiempo de la RA

Fuente: (Acosta, 2014)

Se diferencia de la realidad virtual ya que esta sumerge a la persona en una realidad totalmente diferente a la real, mientras que la realidad aumentada permite aprovechar la

información adicional para potenciar el conocimiento sobre los objetos tangibles. (Inglobe Technologies Srl, 2011)

### 2.3.2. Diferencias entre realidad virtual y realidad aumentada

La clave de la realidad virtual es llevar al usuario a un mundo artificial donde se sumerge en una experiencia muy interesante, por ejemplo, cascos de realidad virtual de Samsung, HTC o Sony, las gafas Cardboard de Google o el proyecto Oculus Rift de Facebook, además paseos virtuales de la NASA, entre otros.

La realidad aumentada no reemplaza el mundo real por uno virtual, sino mas bien mantiene al individuo en el mundo real y lo complementa con información virtual, con la que incluso puede interactuar. (Melo , 2018)

### 2.3.3. Niveles de realidad aumentada

- **Nivel 0:** hiperenlaces en el mundo físico, los activadores son los códigos QR (Quick Response code) los mismos que son códigos de respuesta rápida para almacenar información en una matriz de puntos o en un código de barras bidimensional. ver Figura 19.



**Figura 19** Código QR  
Fuente: (Melo , 2018)

- **Nivel 1:** realidad aumentada basada en marcadores de referencia, utilizados para observar los sistemas de imágenes usados como punto de referencia o de medida. Ver Figura 20.



**Figura 20** Marcador de realidad aumentada  
Fuente: (Melo , 2018)

- **Nivel 2:** realidad aumentada sin marcadores, los activadores que usa son imágenes, objetos o localizadores GPS. Cuando el usuario mueve el teléfono y capta la imagen de su entorno, el navegador muestra los puntos de interés cercanos como se observa en la Figura 21.



**Figura 21** Realidad aumentada con geolocalización  
Fuente: (Melo , 2018)

- **Nivel 3:** visión aumentada, misma que está incorporada en gafas (Google Glass, Figura 22), muestra información disponible para los usuarios sin utilizar las manos.



**Figura 22** Realidad aumentada con Google Glass  
Fuente: (Melo , 2018)

#### **2.4. Software de desarrollo de videojuegos**

El software de desarrollo de videojuegos denominado también motor de juegos, se define como una serie de librerías de programación fundamentales en el diseño, la creación y la representación de un videojuego, incorpora características principales como las capacidades gráficas ya sea en 2D o 3D, cálculo de polígonos, iluminación, texturas, documentación para aprender su uso y posee también gran facilidad de exportar el juego a diferentes plataformas.

Dentro de las funcionalidades más significativas del motor de juegos están:

- **El motor de físicas**

Simular atributos físicos como peso, volumen, aceleración, gravedad, entre otros y realizar cálculos para que un objeto cumpla con esto, es la responsabilidad del motor de físicas.

- **El motor de sonido**

Cargar pistas, modificar la tasa de bits, quitarlas de reproducción, sincronizarlas entre otras cosas son los encargos del motor de sonido.

- **El scripting**

Mediante un lenguaje de programación realiza la implementación del funcionamiento de los personajes y objetos del videojuego. (Observatorio del Gabinete de Tele-Educación, 2018)

## 2.5. Estado del arte dispositivos hápticos

En esta sección se recopila la información referente a productos de propósito comercial y con fines investigativos sobre el tema.

### 2.5.1. Dispositivos comerciales

**Simodont Dental Trainer:** es un entrenador dental que se basa en la tecnología única e inigualable para brindar capacitación y simulación de alta fidelidad, es un sistema de capacitación completo y comprobado para escuelas de odontología ver Figura 23.



**Figura 23** Simodont Dental Trainer  
Fuente: (Moog, 2019)

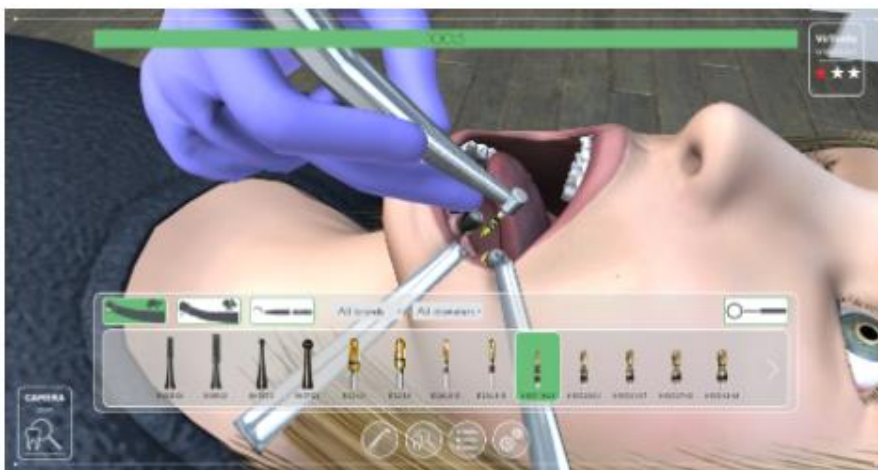
Cuenta con las siguientes características:

- Tecnología de control avanzada: un paradigma de control de admisión único que utiliza un sensor de fuerza para una sensación de alta fidelidad.
- Interfaz de software flexible: proporciona la máxima flexibilidad para crear nuevas aplicaciones.
- Fiabilidad: la tecnología probada y el algoritmo de control patentado permiten un espectro completo de movimientos de fuerzas muy altas a muy delicadas.

(Moog, 2019)

**Virteasy Dental:** es un simulador completo de simulación de gestos para dentistas que tiene un enfoque educativo que es:

- Una práctica realista y segura
- Entrenamiento en situaciones clínicas reales, desde las más comunes hasta las más raras.
- La concepción del profesor de los caminos educativos que pueden personalizarse, adaptarse al nivel de cada alumno.
- El único sistema que realiza el ciclo de aprendizaje tantas veces como sea necesario: preparación, acción, evaluación, comprensión, mejora.
- más de 70 ejercicios, ver Figura 24.



**Figura 24** Virteasy Dental  
Fuente: (Virteasy Dental, 2018)

## 2.5.2. Proyectos relacionados

**Tema:** Implementación de una herramienta virtual mediante un dispositivo háptico para la rehabilitación de pacientes con daño cerebral adquirido.

**Autor(es):** Acurio Santamaría, Andrés Daniel.

**Universidad:** Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

**Año:** 2017

**Tema:** Developing haptic caries simulation for dental education

**Autor(es):** Cecilie Osnes and Andrew Keeling

**Universidad:** School of Dentistry, University of Leeds

**Año:** 2017

**Tema:** Haptic-Based Dental Simulation

**Autor(es):** Mohamad Eid, Peter Loomer, Dianne Sefo, Georgios Korres, Georgios Karafotias

**Universidad:** New York University

**Año:** 2016

**Tema:** Haptic Rendering for Simulation of Fine Manipulation

**Autor(es):** Dangxiao Wang, Jing Xiao, Yuru Zhang

**Revista:** Springer

**Año:** 2014

**Tema:** Virtual reality and haptics for dental surgery: a personal review

**Autor(es):** Pingjun Xia · António Mendes Lopes · Maria Teresa Restivo

**Revista:** Springer

**Año:** 2012



# CAPÍTULO III

## DISEÑO MECATRÓNICO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA HÁPTICO

### 3.1. Parámetros de diseño

#### 3.1.1. Metodología del diseño

Este capítulo se basa en el modelo de diseño concurrente (Ulrich & Eppinger, 2013), el cual empieza con la identificando de las necesidades de los usuarios y de los diseñadores, para posteriormente elegir las especificaciones que son relevantes. Esta información permite elaborar una estructura funcional, la misma que será evaluada y posteriormente definirá el diseño del sistema háptico para la selección e implementación de cada uno de los componentes.

Finalmente se evalúa, corrige y determina mejoras del diseño conceptual.

#### 3.1.2. Definición de las necesidades

Este paso es una parte importante en el proceso de desarrollo del diseño del producto, ya que se tiene como propósito identificar las características que tendrá el diseño en su etapa final, además de las especificaciones técnicas del mismo.

Las necesidades por considerar se obtuvieron mediante un conversatorio con un profesional en el área odontológica y se pueden identificar en la Figura 25. La intención de dicha tabla es esclarecer los puntos primordiales para el diseño del presente sistema háptico.

	Precisión de corte	Similitud con un procedimiento real	Resultado de pruebas de ciclos de uso	Costo de manufactura	Graficas comprensibles y observables	Interfaz HMI	Tiempo para poner en marcha el simulador	Dimensiones del simulador	Tiempo de ensamble y desensamble	Nivel de aprendizaje que brinda	Resistencia de materiales
<b>Precisión en lectura de movimientos</b>	x										
<b>Similitud con un procedimiento real</b>		x									
<b>Durabilidad y robustez</b>			x								x
<b>Asequible por los usuarios</b>				x							
<b>Graficas observables y comprensibles</b>					x	x					
<b>Claridad en información mostrada</b>						x				x	
<b>Fácil de usar</b>							x				
<b>Fácil instalación</b>							x	x			
<b>Acceso a mantenimiento</b>									x		
<b>Nivel de aprendizaje que brinda</b>										x	
<b>Resistente a golpes</b>											x

**Figura 25** Necesidades del proyecto

### 3.1.3. Definición de especificaciones

A continuación, se presentan distintas alternativas para el diseño estructural del sistema háptico, con el fin de definir la alternativa correcta:

Al vincular las necesidades del usuario con las métricas que son un parámetro medible relacionado con las necesidades, se obtienen las especificaciones principales.

Existe una relación fundamental que especifica que por cada necesidad exista por lo menos una métrica.

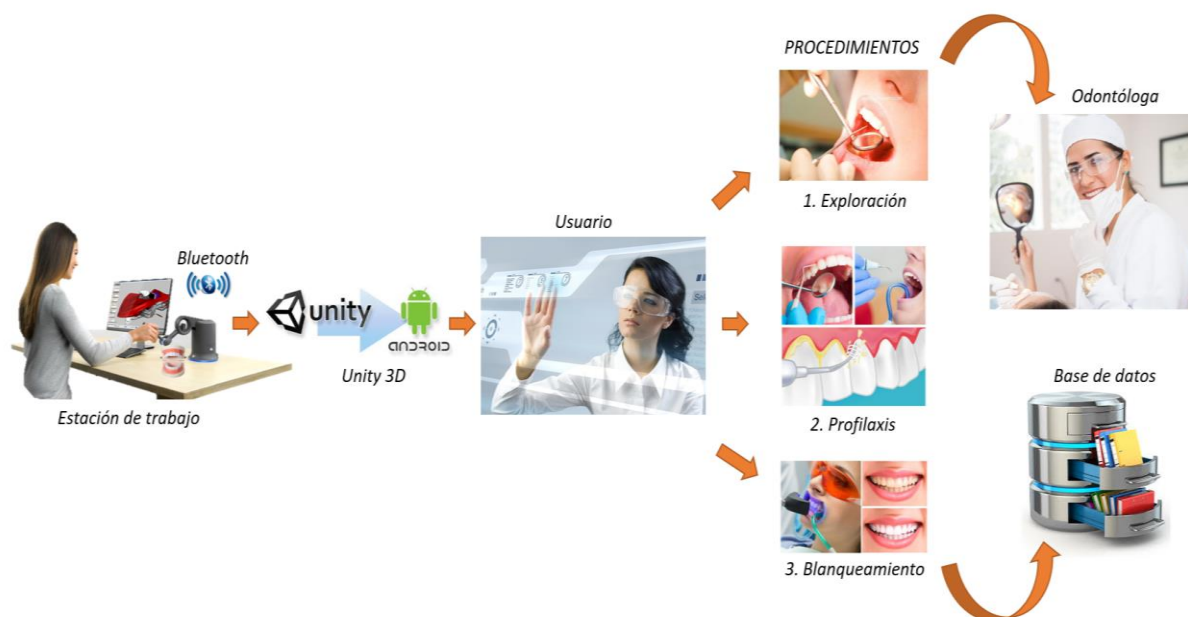
**Tabla 1**  
*Detalle de especificaciones*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Número de necesidad</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor marginal</b>	<b>Valor ideal</b>
1	1	Resolución	4	mm/ppp		0.03 mm/860 ppp
2	2	Grados de libertad	4	unidades	Mayor a 4	6
3	3	Resultados de pruebas de ciclos de uso	5	Garantía	NO	SI
4	4	Costo	3	USD	Menor a 7000	7000
5	5	Tamaño de pantalla	5	In	Mayor a 10	10
6	5.6	Interfaz	4		USB	Puerto paralelo
7	7.8	Tiempo para poner en marcha	2	Segundos	300	300
8	8	Dimensiones	3	mm	Aproximado 381 An x 267 Al x 191 P mm	381 An x 267 Al x 191 P mm
9	6.10	Nivel de aprendizaje que brinda	3		Medio	alto
10	3.10	Rigidez	4	N mm-1	Aproximado 3.5 N mm-1	3.5 N mm- 1

En la Tabla 1, se identifica la relación existente entre las necesidades del usuario con las métricas, además de obtener el valor marginal para el diseño del sistema háptico.

### 3.1.4. Definición de la arquitectura del diseño

En la Figura 26 se muestra en esquema con los diferentes elementos que conforman el sistema de percepción háptica con sus respectivas interacciones.



**Figura 26** Arquitectura de diseño

La arquitectura modular del producto está distribuida en diversos módulos, mismos que contienen elementos físicos y funcionalidades (Tabla 2), esta arquitectura modular permite que un cambio de diseño se realice en un trozo sin requerir cambios a otros trozos para que el producto funcione correctamente.

**Tabla 2**  
*Módulos del sistema de percepción háptica*

#	Módulo	Funciones
1	Estación de trabajo	Organiza los diferentes elementos para que el usuario pueda interactuar con ellos
2	Estructura mecánica	Soporta un conjunto de cargas
3	Sensores y actuadores	Adquieren señales y generan la retroalimentación háptica
4	Control	Controla las señales y luego las envía
5	Suministro de energía	Proporciona energía al sistema

### 3.2. Selección de componentes del sistema

En esta sección se seleccionan el material, los sensores y actuadores del sistema háptico, la tarjeta de control, el suministro de energía tomando en cuenta que las alternativas deben satisfacer los requerimientos del usuario y del diseñador se realiza mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados. (Romeva, 2010)

A continuación, se muestra los criterios de selección con las correspondientes alternativas de solución:

#### 3.2.1. Módulo 1: Estación de trabajo

El módulo estación hace referencia al espacio de trabajo en el que se va a realizar las tareas, mismo que cuenta con:

Una fantoma dental, que es un modelo desmontable pedagógico con anatomía dental utilizado para el estudio y enseñanza.

Un dispositivo tablet o celular con sistema operativo Android que permite interactuar con el entorno de RA para realizar los procedimientos odontológicos. ARCore nació como un proyecto de Google para brindar soporte a dispositivos Android con respecto a la Realidad Aumentada, actualmente se incorpora una gran variedad de dispositivos como un servicio que provee herramientas de soporte y de desarrollo para Realidad Aumentada.

Entre las ventajas del uso de dispositivos compatibles con ARCore está la incorporación de algoritmos que mejoran el reconocimiento de superficies y brinda mayor estabilidad debido a cambios de iluminación, en la Tabla 3 se detalla los dispositivos compatibles con ARCore que pueden ser utilizados.

**Tabla 3**  
*Dispositivos compatibles con ARCore*

<b>Samsung</b>	<b>Galaxy A3 (2017)</b>	<b>Requiere Android 8.0 o posterior.</b>
	Galaxy A30, Galaxy A40, Galaxy A50, Galaxy A60, Galaxy A70, Galaxy A80	
	Galaxy J7 (2017), Galaxy J7 Pro	Modelos SM-J730
	Galaxy S7, Galaxy S7 edge	
	Galaxy S8, Galaxy S8 +	
	Galaxy S9, Galaxy S9 +	
	Galaxy S10e, Galaxy S10, Galaxy S10 +, Galaxy S10 5G	
	Galaxy Tab S3, Galaxy Tab S4, Galaxy Tab S5e	

Continúa 

<b>Sony</b>	<b>Xperia XZ Premium</b>	<b>Requiere Android 8.0 o posterior.</b>
	Xperia XZ1, Xperia XZ1 Compact	Requiere Android 8.0 o posterior.
	Xperia XZ2, Xperia XZ2 Compact, Xperia XZ2 Premium	Requiere Android 8.0 o posterior con actualización de software después de agosto de 2018 (nivel de parche de seguridad 2018-08-05 o posterior).
	Xperia XZ3	
	Xperia 1	
<b>Xiaomi</b>	Mi 8, Mi 8 SE	
	Mi 9	
	Mi Mix 2S	
	Mi mix 3	
	Pocophone F1	
<b>Cebra</b>	Ordenador táctil WLAN TC52	
	TC57 WWAN Touch Computer	
	Ordenador táctil WLAN TC72	
	TC77 WWAN Touch Computer	

Fuente: (ARCore, 2019)

La Tablet de Samsung Galaxy Tab S3, además de ser compatible con ARCore, también posee un procesador Quad Core que establece un nuevo estándar en el rendimiento de la CPU, brindándole gran capacidad de procesamiento. (SAMSUNG, 2019) Por estas razones fue seleccionada, sin embargo, es compatible con otros dispositivos Android compatibles con ARCore.

### 3.2.2. Módulo 2: Estructura mecánica

Este módulo está compuesto por el diseño mecánico del brazo y la herramienta, para lo cual se debe seleccionar el material que cumple con los parámetros de diseño antes expuestos.

### **a. Características de los materiales**

**ABS:** Es un plástico muy resistente al impacto, es ideal para la producción de objetos que deban ser sometidos a esfuerzos mecánicos, piezas con encastrados o insertos, tienen muy buena estabilidad dimensional. (Impresoras3D, 1970)

**MDF:** Fibra de densidad media o MDF fabricado a partir de fibras de madera 85% y resinas sintéticas comprimidas para brindar mayor densidad. Una de sus principales características es la presión. (Maderas Santana, 2015)

**ALUMINIO:** Es el segundo metal más utilizado, mismo que tiene las siguientes propiedades: ductibilidad, baja densidad, resistencia frente al peso, reflectividad, durabilidad y reciclaje.

**PLA:** Ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución. Existe una amplia gama de colores disponibles.

### **b. Selección de materiales**

#### **Material para el brazo**

En la Tabla 4 se describen los criterios de evaluación para seleccionar el material de manufactura adecuado para el brazo con su respectiva ponderación.



**Tabla 4***Ponderación de criterios de evaluación para el material-brazo*

<b>Criterio</b>	<b>Ergonomía</b>	<b>Costo</b>	<b>Peso</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Ergonomía</b>	-	1	0.5	2.5	0.36
<b>Costo</b>	1	-	0.5	2.5	0.36
<b>Peso</b>	0.5	0.5	-	2	0.28
			<b>Suma</b>	7	1

- Solución A: ABS
- Solución B: MDF
- Solución C: Aluminio

En la Tabla 5 se realiza la valoración del criterio de ergonomía, para valorar las alternativas de selección del material de manufactura.

**Tabla 5***Ponderación de ergonomía para selección al material-brazo*

<b>Ergonomía</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.5	0	1.5	0.3
<b>Solución B</b>	0.5	-	1	1.5	0.3
<b>Solución C</b>	1	0	-	2	0.4
			<b>Suma</b>	5	1

En la Tabla 6 se realiza la valoración del criterio de costo, para valorar las alternativas de selección del material de manufactura.

**Tabla 6**

*Ponderación de costo para selección al material-brazo*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0.5	1.5	0.3
Solución B	1	-	1	2	0.4
Solución C	0.5	0	-	1.5	0.3
			<b>Suma</b>	5	1

En la Tabla 7 se realiza la valoración del criterio de peso, para valorar las alternativas de selección del material de manufactura.

**Tabla 7**

*Ponderación de peso para selección al material-brazo*

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.5
Solución B	0.5	-	1	2.5	0.5
Solución C	0	0	-	0	0
			<b>Suma</b>	5	1

En la Tabla 8 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 8**  
*Selección de la alternativa del material-brazo*

	<b>Ergonomía</b>	<b>Costo</b>	<b>Peso</b>	$\Sigma$	<b>Prioridad</b>
<b>Solución A</b>	0.108	0.108	0.14	0.356	2
<b>Solución B</b>	0.108	0.144	0.14	0.392	1
<b>Solución C</b>	0.144	0.108	0	0.252	3

De acuerdo a la Tabla 8 la alternativa ideal o que cumple con la mayoría de los requerimientos solicitados es el MDF ya que por su ergonomía y su peso permiten que los movimientos del brazo sean los adecuados, además de que su costo es no es elevado.

### **Material para la herramienta**

En la Tabla 9 se describen los criterios de evaluación para seleccionar el material de manufactura adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 9**  
*Ponderación de criterios de evaluación para el material-herramienta*

<b>Criterio</b>	<b>Ergonomía</b>	<b>Flexibilidad</b>	<b>Facilidad de trabajo</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Ergonomía</b>	-	0.5	1	2.5	0.31
<b>Flexibilidad</b>	0.5	-	1	2.5	0.31
<b>Facilidad de trabajo</b>	1	1	-	3	0.38
			<b>Suma</b>	8	1

- Solución A: PLA
- Solución B: MDF
- Solución C: Aluminio

En la Tabla 10 se realiza la valoración del criterio de ergonomía, para valorar las alternativas de selección del material de la herramienta.

**Tabla 10**

*Ponderación de ergonomía para selección al material-herramienta*

Ergonomía	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	0.5	2	0.33
Solución C	0	0.5	-	1.5	0.25
<b>Suma</b>				6	1

En la Tabla 11 se realiza la valoración del criterio de flexibilidad, para evaluar las alternativas de selección del material de la herramienta.

**Tabla 11**

*Ponderación de flexibilidad para selección al material-herramienta*

Flexibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1	2.5	0.42
Solución B	0.5	-	0.5	2	0.33
Solución C	0	0.5	-	1.5	0.25
<b>Suma</b>				6	1

En la Tabla 12 se realiza la valoración del criterio de facilidad de trabajo, para valorar las alternativas de selección del material de la herramienta.

**Tabla 12**

*Ponderación de alternativas de selección al material-herramienta*

Facilidad de trabajo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	1	1	3	0.5
Solución B	0	-	0.5	1.5	0.25
Solución C	0	0.5	-	1.5	0.25
			<b>Suma</b>	6	1

En la Tabla 13 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 13**

*Selección de la alternativa del material-herramienta*

	Ergonomía	Flexibilidad	Facilidad de trabajo	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.13	0.13	0.19	0.45	1
Solución B	0.10	0.10	0.10	0.30	2
Solución C	0.08	0.08	0.10	0.26	3

De acuerdo a la Tabla 13 la alternativa ideal como material para la herramienta es el PLA ya que, por su ergonomía y su flexibilidad, pero principalmente por su facilidad de trabajo cumplen con los requerimientos solicitados.

### 3.2.3. Módulo 3: Sensores y actuadores

Este módulo está compuesto por los diferentes sensores y actuadores que envían sus respectivas señales y en el caso del actuador se encarga de la retroalimentación háptica.

#### a. Acelerómetro-giroscopio

Necesario para obtener la orientación de la herramienta en cada uno de los ejes.

#### a. Características de los materiales

Las principales características de los sensores MPU se detallan en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Comparación entre las características del sensor giroscopio*

<b>Características</b>	<b>MPU6050</b>	<b>MPU9250</b>
<b>Salida digital</b>	6 ejes	9 ejes
<b>Rangos giroscopio</b>	±250, ±500, ±1000, ±2000 dps	±250, ±500, ±1000, ±2000 dps
<b>Sensibilidad acelerómetro</b>	±2g, ±4g, ±8g y ±16g	±2g, ±4g, ±8g y ±16g
<b>Alimentación</b>	2.37 a 3.46 V	2.4 a 3.6 V
<b>Comunicación</b>	I2C	I2C y SPI
<b>Costo</b>	\$5	\$8

En la Tabla 15 se detallan los criterios de evaluación para seleccionar el sensor acelerómetro giroscopio adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 15***Ponderación de criterios de evaluación para el sensor giroscopio*

<b>Criterio</b>	<b>Disponibilidad en el mercado</b>	<b>Costo</b>	<b>Calibración</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Disponibilidad en el mercado</b>	-	0.5	1	2.5	0.36
<b>Costo</b>	0.5	-	0.5	2.0	0.28
<b>Calibración</b>	1	0.5	-	2.5	0.36
			<b>Suma</b>	<b>7</b>	<b>1</b>

- Solución A: MPU6050
- Solución B: MPU9250

En la Tabla 16 se realiza la valoración del criterio de disponibilidad en el mercado, para evaluar las alternativas de selección del sensor acelerómetro - giroscopio.

**Tabla 16***Ponderación de disponibilidad en el mercado del sensor giroscopio*

<b>Disponibilidad en el mercado</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.8	1.8	0.60
<b>Solución B</b>	0.2	-	1.2	0.40
		<b>Suma</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

En la Tabla 17 se realiza la valoración del criterio de flexibilidad, para evaluar las alternativas de selección del sensor acelerómetro - giroscopio.

**Tabla 17***Ponderación de costo para selección al sensor giroscopio*

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.7	1.7	0.57
Solución B	0.3	-	1.3	0.43
		Suma	3	1

En la Tabla 18 se realiza la valoración de la calibración, para evaluar las alternativas de selección del sensor acelerómetro - giroscopio.

**Tabla 18***Ponderación de la calibración para selección al sensor giroscopio*

Calibración	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.5	1.5	0.5
Solución B	0.5	-	1.5	0.5
		Suma	3	1

En la Tabla 19 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 19***Selección de la alternativa del sensor giroscopio*

	Disponibilidad en el mercado	Costo	Calibración	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.22	0.16	0.18	0.56	1
Solución B	0.14	0.12	0.18	0.44	2



De acuerdo a la Tabla 19 la alternativa ideal como sensor acelerómetro - giroscopio es el MPU 6050 ya que, por su disponibilidad en el mercado, su costo y su calibración porque cumplen con los requerimientos solicitados.



## b. Encoders

### a. Características de los materiales

**Encoders incrementales:** tiene como función convertir el movimiento mecánico (giros del eje) en pulsos digitales o analógicos que pueden ser interpretados por un controlador de movimiento, las principales características de cada modelo de Encoder incremental se muestran en la Tabla 20.

**Tabla 20**

*Comparación entre las características de los encoders incrementales*

Característica	RAMBAL	KY-040
		
<b>Señal</b>	400 pulsos por revolución	20 pulsos por
<b>Voltaje de operación</b>	5-24 VCC	0-5V
<b>Peso</b>	173.4 g	10 g
<b>Dimensiones</b>	38 x30 x 35 mm	32x19x30mm
<b>Costo</b>	\$50	\$30

Fuente: (Rambal Automatización y robótica, 2018)

En la Tabla 21 se detallan los criterios de evaluación para seleccionar el encoder adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 21**

*Ponderación de criterios de evaluación para el Encoder.*

<b>Criterio</b>	<b>Precisión</b>	<b>Costo</b>	<b>Calibración</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Precisión</b>	-	0.5	1	2.5	0.36
<b>Costo</b>	0.5	-	0.5	2.0	0.28
<b>Calibración</b>	1	0.5	-	2.5	0.36
			<b>Suma</b>	7	1

- Solución A: encoder incremental RAMBAL
- Solución B: encoder rotatorio incremental KY-040

En la Tabla 22 se realiza la valoración del criterio de precisión, para evaluar las alternativas de selección del encoder.

**Tabla 22**

*Ponderación de precisión para selección al encoder*

<b>Precisión</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.90	1.9	0.63
<b>Solución B</b>	0.10	-	1.1	0.37
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 23 se realiza la valoración del criterio de costo, para evaluar las alternativas de selección del encoder.

**Tabla 23**  
*Ponderación de costo para selección del encoder*

Costo	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.4	1.4	0.47
Solución B	0.6	-	1.6	0.53
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 24 se realiza la valoración del criterio de calibración, para evaluar las alternativas de selección del encoder.

**Tabla 24**  
*Ponderación de la calibración para selección al encoder*

Calibración	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.7	1.7	0.57
Solución B	0.3	-	1.3	0.43
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 25 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 25**  
*Selección de la alternativa del encoder*

	Precisión	Costo	Calibración	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución A</b>	0.23	0.13	0.21	0.57	1
<b>Solución B</b>	0.13	0.15	0.15	0.43	2



De acuerdo a la Tabla 25 la alternativa ideal es el encoder incremental RAMBAL ya que por su precisión y su calibración porque cumplen con los requerimientos solicitados.

### c. Sensor de fuerza

#### a) Características de los materiales

El sensor de fuerza es el encargado de obtener el valor de fuerza aplicada por la persona en la herramienta, en la Tabla 26 se muestra las características principales de dos tipos de sensores:

**Tabla 26**  
*Comparación entre las características de los sensores de fuerza*

Característica	FSR 400	AST KAM-S
		
<b>Rango</b>	0.2N – 20N	100N – 50 kN
<b>Precisión</b>	0.6%	0.5%
<b>Protección</b>	IP65	IP65
<b>Dimensiones</b>	Ø5 x 38 mm	29 x 28 x 18 mm
<b>Peso</b>	0.25 g	25 kg

En la Tabla 27 se detallan los criterios de evaluación para seleccionar el sensor de fuerza adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 27**

*Ponderación de criterios de evaluación para el sensor de fuerza*

Criterio	Precisión	Tamaño	Rango de medición	$\Sigma+1$	Ponderación
Precisión	-	1	0.8	2.8	0.37
Tamaño	1	-	0.5	2.5	0.33
Rango de medición	0.8	0.5	-	2.3	0.30
<b>Suma</b>				7.6	1

- Solución A: FSR 400
- Solución B: AST KAM-S

En la Tabla 28 se realiza la valoración del criterio de precisión, para evaluar las alternativas de selección del sensor de fuerza.

**Tabla 28**

*Ponderación de precisión para selección al sensor de fuerza*

Precisión	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.6	1.6	0.53
Solución B	0.4	-	1.4	0.47
Suma			3	1

En la Tabla 29 se realiza la valoración del criterio de tamaño, para evaluar las alternativas de selección del sensor de fuerza.

**Tabla 29***Ponderación de tamaño para selección al sensor de fuerza*

Tamaño	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.9	1.9	0.63
Solución B	0.1	-	1.1	0.37
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 30 se realiza la valoración del rango de medición, para evaluar las alternativas de selección del sensor de fuerza.

**Tabla 30***Ponderación del rango de medición para selección al sensor de fuerza*

Rango de medición	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.7	1.7	0.57
Solución B	0.3	-	1.3	0.43
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 31 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 31***Selección de la alternativa del sensor de fuerza*

	Precisión	Tamaño	Rango de medición	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.20	0.21	0.17	0.58	1
Solución B	0.17	0.12	0.13	0.42	2

De acuerdo a la Tabla 31 la alternativa ideal es el sensor de fuerza FSR 400 ya que por su precisión y su tamaño cumplen con los requerimientos solicitados.



#### d. Pulsador

##### a) Características de los materiales

El pulsador es un botón que sirve para poner en funcionamiento un mecanismo o aparato, en la Tabla 32 se muestra las características principales de 2 tipos de pulsadores:

**Tabla 32**

*Comparación entre las características de los pulsadores*

Características	4 pines	2 pines
		
<b>Medidas</b>	10 x 10 mm	6 x 6 mm
<b>Altura</b>	7 mm	4 mm
<b>Posición</b>	Normalmente abierto	Únicamente normalmente abierto

En la Tabla 33 se detallan los criterios de evaluación para seleccionar el pulsador adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 33**

*Ponderación de criterios de evaluación para el pulsador*

<b>Criterio</b>	<b>Facilidad de trabajo</b>	<b>Tamaño</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Facilidad de trabajo</b>	-	1	2.0	0.50
<b>Tamaño</b>	1	-	2.0	0.50
<b>Suma</b>			4	1

- Solución A: Pulsador con 4 pines
- Solución B: Pulsador con 2 pines

En la Tabla 34 se realiza la valoración del criterio de facilidad de trabajo, para evaluar las alternativas de selección del pulsador.

**Tabla 34**

*Ponderación de facilidad de trabajo para selección al pulsador*

<b>Precisión</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.25	1.25	0.42
<b>Solución B</b>	0.75	-	1.75	0.58
<b>Suma</b>			3	1



En la Tabla 35 se realiza la valoración del criterio de tamaño, para evaluar las alternativas de selección del pulsador.

**Tabla 35**  
*Ponderación de tamaño para selección del pulsador*

Tamaño	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.2	1.2	0.40
Solución B	0.8	-	1.8	0.60
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 36 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 36**  
*Selección de la alternativa del pulsador*

	Facilidad de trabajo	Tamaño	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.21	0.20	0.41	2
Solución B	0.29	0.30	0.59	1

De acuerdo a la Tabla 36 la alternativa ideal es el pulsador de 2 pines ya que por su facilidad de trabajo y su tamaño cumplen con los requerimientos solicitados.

## e. Motor vibratorio

### a. Características de los materiales

Es el encargado de realizar la retroalimentación háptica y está ubicado en la herramienta, en la Tabla 37 se muestra las características principales de 2 tipos de motores vibradores:

**Tabla 37**

*Comparación entre las características de los motores vibradores*

Características	Mini motor vibrador	Motor vibrador 6 V
		
<b>Voltaje</b>	2.5 a 3.5 V	1.5 a 6 V
<b>Tamaño del cuerpo</b>	2.7 x Ø10 mm	12 x Ø25 mm
<b>Tamaño del eje de vibración</b>	No tiene eje	18 x 10 x 4 mm
<b>Velocidad</b>	10 000 rpm	1500 rpm

En la Tabla 38 se describen los criterios de evaluación para seleccionar el motor vibrador adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 38**

*Ponderación de criterios de evaluación para el motor vibrador*

Criterio	Facilidad de trabajo	Tamaño	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Facilidad de trabajo</b>	-	1	2.0	0.50
<b>Tamaño</b>	1	-	2.0	0.50
		<b>Suma</b>	4	1

- Solución A: mini motor vibrador
- Solución B: motor vibrador 6V

En la Tabla 39 se realiza la valoración del criterio de facilidad de trabajo, para evaluar las alternativas de selección del motor vibrador.

**Tabla 39**

*Ponderación de facilidad de trabajo para selección al motor vibrador*

Precisión	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.6	1.60	0.53
<b>Solución B</b>	0.4	-	1.40	0.47
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 40 se realiza la valoración del criterio de tamaño, para evaluar las alternativas de selección del motor vibrador.

**Tabla 40**

*Ponderación de tamaño para alternativas de selección al motor vibrador*

Tamaño	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.8	1.8	0.60
<b>Solución B</b>	0.2	-	1.2	0.40
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 41 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 41**  
*Selección de la alternativa del motor vibrador*

	Facilidad de trabajo	de	Tamaño	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución A</b>	0.27		0.30	0.57	1
<b>Solución B</b>	0.24		0.20	0.44	2

De acuerdo a la Tabla 41 la alternativa ideal es el mini motor vibrador ya que por su facilidad de trabajo y su tamaño cumplen con los requerimientos solicitados.



### 3.2.4. Módulo 4: Control

Este módulo está compuesto por la tarjeta de control y el sistema de comunicación inalámbrico, mismo que es el encargado de la transmisión de datos en tiempo real, mientras que la tarjeta controladora se encarga de recibir los datos, procesarlos y enviar orden de activación de los actuadores.

#### a. Tarjeta de control

En el presente proyecto se va a trabajar con la tarjeta Arduino debido a su compatibilidad con Unity, entonces se va a elegir entre los dispositivos Arduino existentes en el mercado, las características principales de las tarjetas de control se detallan en la Tabla 42.

**Tabla 42***Comparación entre las características de la tarjeta de control*

Características	Arduino Uno	Arduino Due
		
Procesador	ATmega328	AT91SAM3X8E
Tensión de entrada	7 – 12 V	7 – 12 V
Pines E/S digitales	14 (6 PWM)	54 (6 PWM)
Entradas analógicas	6	12
Memoria Flash	32 KB	512 KB
SRAM	2 KB	96 KB (64 + 32 KB)
Frecuencia del reloj	16 MHz	84MHz

En la Tabla 43 se describen los criterios de evaluación para seleccionar la tarjeta de control adecuada con su respectiva ponderación.

**Tabla 43***Ponderación de criterios de evaluación para la tarjeta de control*

Criterio	Número de E/S	Implementación	Memoria	$\sum+1$	Ponderación
Número de E/S	-	0.5	1	2.5	0.36
Implementación	0.5	-	0.5	2.0	0.28
Memoria	1	0.5	-	2.5	0.36
			<b>Suma</b>	7	1

- Solución A: Arduino Uno
- Solución B: Arduino Due

En la Tabla 44 se realiza la valoración del criterio de número de E/S, para evaluar las alternativas de selección de la tarjeta de control.

**Tabla 44**

*Ponderación de número de E/S para selección de la tarjeta de control*

Número de E/S	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.2	1.20	0.40
Solución B	0.8	-	1.80	0.60
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 45 se realiza la valoración del criterio de implementación, para evaluar las alternativas de selección de la tarjeta de control.

**Tabla 45**

*Ponderación de implementación para selección de la tarjeta de control*

Implementación	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.6	1.60	0.53
Solución B	0.4	-	1.40	0.47
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 46 se realiza la valoración del criterio de memoria, para evaluar las alternativas de selección de la tarjeta de control.

**Tabla 46***Ponderación de memoria para selección de la tarjeta de control*

Memoria	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.10	1.10	0.37
Solución B	0.90	-	1.90	0.63
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 47 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 47***Selección de la alternativa de la tarjeta de control*

	Número de E/S	Implementación	Memoria	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0.14	0.15	0.13	0.42	2
Solución B	0.22	0.13	0.23	0.58	1

De acuerdo a la Tabla 47 la alternativa ideal es el Arduino Due ya que por su número de Entradas y salidas y por su memoria cumple con los requerimientos solicitados.

#### **b. Sistema de comunicación**

El sistema de transmisión de datos cumple la función de comunicar el sistema Háptico con la Realidad Aumentada mediante una interfaz inalámbrica, las características principales de dos alternativas más usadas se detallan en la Tabla 48.

**Tabla 48***Comparación entre las características de sistemas de comunicación*

	<b>Módulo Bluetooth</b>	<b>Módulo Wifi</b>
<b>Costo</b>	\$9	\$4.50
<b>Tamaño</b>	4.4 x 1.6 x 0.7 cm	1.15 x 1.15 cm
<b>Alcance</b>	5 – 10 metros	30 metros
<b>Protocolo</b>	USART5V	TCP/IP
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Velocidad</b>	1200 – 115200 bps	115200 bps
<b>Voltaje</b>	5V	3 – 3.6 V
<b>Compatibilidad</b>	MCU – Arduino	MCU - Arduino

En la

Tabla **49** se describen los criterios de evaluación para seleccionar el sistema de comunicación adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 49***Ponderación de criterios de selección para sistema de comunicación*

<b>Criterio</b>	<b>Alcance de transmisión</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Configuración</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Alcance de transmisión</b>	-	0.5	1	2.5	0.31
<b>Velocidad</b>	0.5	-	1	2.5	0.31
<b>Configuración</b>	1	1	-	3	0.38



<b>Suma</b>	8	1
-------------	---	---

- Solución A: Módulo Bluetooth HC-06
- Solución B: Módulo Wifi ESP8266

En la Tabla 50 se realiza la valoración del criterio de alcance de transmisión, para evaluar las alternativas de selección del sistema de comunicación.

**Tabla 50**

*Ponderación del alcance de transmisión del sistema de comunicación*

Alcance de transmisión	Solución A	Solución B	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.8	1.80	0.60
<b>Solución B</b>	0.2	-	1.20	0.40
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 51 se realiza la valoración del criterio de velocidad, para evaluar las alternativas de selección del sistema de comunicación.

**Tabla 51**

*Ponderación de la velocidad del sistema de comunicación*

Velocidad	Solución A	Solución B	$\sum+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.5	1.50	0.50
<b>Solución B</b>	0.5	-	1.50	0.50
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 52 se realiza la valoración del criterio de configuración, para evaluar las alternativas de selección del sistema de comunicación.

**Tabla 52***Ponderación de la configuración del sistema de comunicación*

Configuración	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.90	1.90	0.63
<b>Solución B</b>	0.10	-	1.10	0.37
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 53 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 53***Selección de la alternativa del sistema de comunicación*

	Alcance de transmisión	Velocidad	Configuración	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución A</b>	0.19	0.16	0.24	0.59	1
<b>Solución B</b>	0.12	0.16	0.14	0.42	2

De acuerdo a la Tabla 53 la alternativa ideal es el módulo Bluetooth HC-06 ya que no era necesario mayor alcance porque los elementos se encuentran dentro de la estación y por su fácil configuración cumple con los requerimientos solicitados.

### 3.2.5. Módulo 5: Suministro de energía

El módulo energético está compuesto por el dispositivo encargado de proveer de energía los módulos 3 y 4, no es necesario que tenga autonomía ya que la estación va a quedarse inmóvil durante su operación, en la Tabla 54 se muestra las características principales de 2 tipos de dispositivos de suministro de energía.

**Tabla 54**

*Comparación entre dispositivos de suministro de energía*

Características	Batería de polímero de litio	Fuente
		
<b>Voltaje de entrada</b>	1.9 - 3.6 V por celda 4S1P	100 – 120V AC
<b>Voltaje de salida</b>	14.8 V DC	24V DC
<b>Corriente máxima de Salida</b>	3 A	5 A
<b>Potencia máxima de salida</b>		120 W
<b>Tamaño</b>	13.7 x 4.4 x 2.6 cm	20 x 10 x 4 cm
<b>Ciclo de vida</b>	300 a 500	Siempre
<b>Peso</b>	330 g	1000 g
<b>Costo</b>	\$50	\$30

En la Tabla 55 se detallan los criterios de evaluación para seleccionar el dispositivo de suministro de energía adecuado con su respectiva ponderación.

**Tabla 55***Ponderación de criterios de evaluación para el suministro de energía*

<b>Criterio</b>	<b>Costo</b>	<b>Autonomía</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costo</b>	-	1	2.0	0.50
<b>Autonomía</b>	1	-	2.0	0.50
		<b>Suma</b>	4	1

- Solución A: Batería Li-Po
- Solución B: Fuente de alimentación

En la Tabla 56 se realiza la valoración del criterio de facilidad de trabajo, para evaluar las alternativas de selección del suministro de energía.

**Tabla 56***Ponderación para selección al suministro de energía*

<b>Costo</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0.20	1.20	0.40
<b>Solución B</b>	0.80	-	1.80	0.60
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 57 se realiza la valoración del criterio de tamaño, para evaluar las alternativas de selección del suministro de energía.

**Tabla 57**

*Ponderación de tamaño para selección al suministro de energía*

Autonomía	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.2	1.2	0.40
<b>Solución B</b>	0.8	-	1.8	0.60
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 58 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 58**

*Selección de la alternativa del suministro de energía*

	Facilidad de trabajo	Tamaño	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución A</b>	0.20	0.20	0.40	2
<b>Solución B</b>	0.30	0.30	0.60	1

De acuerdo a la Tabla 58 la alternativa ideal es la fuente de alimentación ya que no es necesaria la autonomía y por el costo cumple con los requerimientos solicitados.

### **3.3. Diseño mecánico del sistema de percepción háptica**

El diseño mecánico del sistema de percepción háptica se lo realizó considerando las siguientes características: ergonomía con el fin de brindar comodidad al usuario, además dimensiones adecuadas para que facilite la manipulación y la movilidad manual permitiendo el desplazamiento del dispositivo.

#### **3.3.1. Análisis de parámetros o medidas**

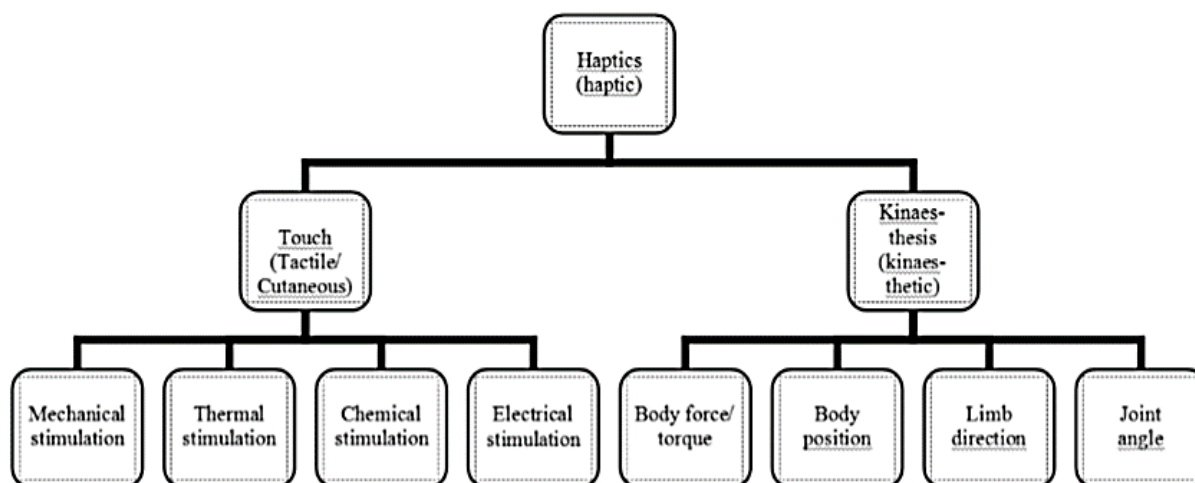
##### **a. Ergonomía**

Los estándares ergonómicos van más allá de proporcionar consistencia e interoperabilidad, ayudan a mejorar la usabilidad de varias maneras, entre las que se incluyen: mejorar la eficacia y evitar errores, mejorar el rendimiento y mejorar la comodidad y el bienestar de los usuarios. Las normas ergonómicas proporcionan una base para el análisis, el diseño, la evaluación, las adquisiciones e incluso cuestiones del comercio; por lo que un grupo de expertos de la ISO han desarrollado normas para la interacción háptica, como la norma ISO en 2009 que presenta un documento de orientación sobre la interacción táctil y contiene orientación en las siguientes áreas:

- Consideraciones de aplicabilidad para las interacciones hápticas, que incluyen: límites a la efectividad, consideraciones de carga de trabajo (eficiencia), consideraciones de aceptación del usuario (satisfacción), satisfacer las necesidades de los usuarios, medioambientales (accesibilidad), seguridad y salud, y seguridad y privacidad.
- Entradas, salidas y / o combinaciones táctiles / hápticas, que incluyen: unimodal y uso multimodal de interacciones hápticas, individualización intencional e involuntaria de percepciones del usuario.

- Atributos de la codificación táctil / háptica de la información, que incluye: el uso de propiedades de objetos, utilizando atributos de percepción y atributos combinados.
- Diseño de objetos táctiles / hápticos, que incluyen resolución y consistencia.
- Interacción, que incluye: tareas de interacción (como navegación, selección y manipulación) y técnicas de interacción (como mover objetos, poseer objetos y gesticulando). Orientación para interacciones hápticas específicas relacionadas con la lectura táctil de los alfabetos y anotaciones adecuados para personas ciegas o sordociegos son Unicode. (B., Kyung, & Kassner, 2010)

La ciencia de la háptica y la creación de vicios hápticos dependen del conocimiento del cuerpo humano, especialmente de su capacidad de sentir tanto el tacto de la piel como la actividad kinestésica en las extremidades y articulaciones del cuerpo. La Figura 27 muestra la relación entre los componentes que componen el campo de la háptica.



**Figura 27** Componentes de la háptica: el tacto y el sentido kinestésico  
Fuente: (B., Kyung, & Kassner, 2010)

La norma ISO TC159 / SC4 / WG9, realiza sus actividades con respecto a la caracterización de los dispositivos de interacciones hápticas, se centran en la definición

de medidas físicas. En esta etapa diferenciamos entre tres niveles de complejidad como se observa en la Tabla 59. (B., Kyung, & Kassner, 2010)

**Tabla 59**

*Ejemplos de medidas físicas según la norma ISO TC159/SC4/WG9*

Nivel de complejidad	de	Medida	Ejemplo/aplicación
<b>Medidas elementales</b>		Fuerza, tiempo, temperatura, distancia	Umbrales de percepción, capacidades máximas/mínimas de usuarios y dispositivos, resoluciones, etc.
	<b>Medidas compuestas</b>	Velocidad	Velocidad máxima de la mano de un aparato
		Frecuencia	La percepción de la vibración depende de la frecuencia
Conductividad térmica		Material constante	
<b>Medidas derivadas</b>	Impedancia	Comportamiento mecánico de un usuario	
	Transparencia	Transmisión de la transparencia	
	Rugosidad	Varias medidas como $R_a$ , $R_z$ , $R_q$ y $R_{sk}$	

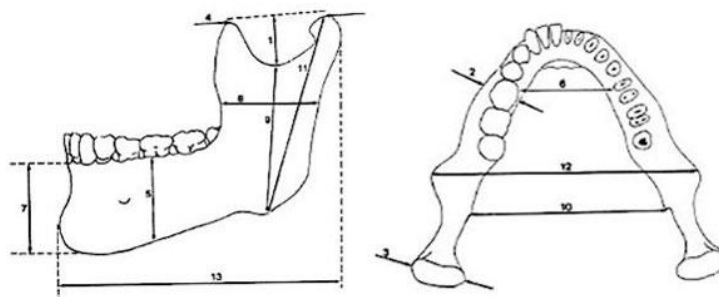
Fuente: (B., Kyung, & Kassner, 2010)

De acuerdo a la norma ISO TC159/SC4/WG9El dispositivo háptico tendrá un nivel de complejidad Elemental, ya que analiza únicamente fuerza en base a valores máximos y mínimos aplicada por los usuarios, brindando una retroalimentación vibro táctil.



## b. Dimensiones

Las medidas antropométricas de la mandíbula y de los dientes permiten definir el área de trabajo en la que se debe trabajar, en la Tabla 60 se muestra las dimensiones de la mandíbula:



**Figura 28** Medidas mandibulares estandarizadas

Fuente: (Sassi, y otros, 2012)

Los valores obtenidos están de acuerdo a las medidas mandibulares estandarizadas por Humphrey que se muestran en la Figura 28.

**Tabla 60**

*Valores promedio en mm de la mandíbula*

Mandíbula	Brasileños	Uruguayos
Profundidad de la incisura	13.09 ( $\pm 2.03$ )	13.82 ( $\pm 2.08$ )
Grosor del cuerpo	11.00 ( $\pm 2.16$ )	13.52 ( $\pm 1.77$ )
Longitud del cóndilo	18.39 ( $\pm 2.41$ )	20.09 ( $\pm 2.40$ )
Distancia entre el proceso coronoide y el cóndilo	32.91 ( $\pm 3.64$ )	34.68 ( $\pm 3.04$ )
Altura del cuerpo	23.97 ( $\pm 4.12$ )	25.05 ( $\pm 3.65$ )

Fuente: (Sassi, y otros, 2012)

En la Tabla 61 se encuentra la información sobre las medidas promedio de los dientes.

**Tabla 61**  
*Medidas promedio de los dientes según Ash (mm)*

Dientes superiores	Longitud de corona	Longitud raíz	Longitud total	Dientes inferiores	Longitud de corona	Longitud raíz	Longitud total
11-21	10.5	13	23.5	31-41	9	12.5	21.5
12-22	9	13	22	32-42	9.5	14	23.5
13-23	10	17	27	33-43	11	16	27
14-24	8.5	14	22.5	34-44	8.5	14	22.5
15-25	8.5	14	22.5	35-45	8	14.5	22.5
16-26	7.5	12.5	20	36-46	7.5	14	21.5
17-27	7	11.5	18.5	37-47	7	13	20
18-28	6.5	11	17.5	38-48	7	11	18

Fuente: (Sassi, y otros, 2012)

La Tabla 60 y 61 dan a conocer dimensiones promedio de la mandíbula y dientes, lo que se aplicará para realizar el modelo 3D de la mandíbula y dientes.

Para seleccionar un tipo de robot se deben considerar una serie de características, buscando el adecuado compromiso entre el precio y las prestaciones, dichas características se muestran en la Tabla 62.

**Tabla 62***Características a tener en cuenta para la selección de un robot*

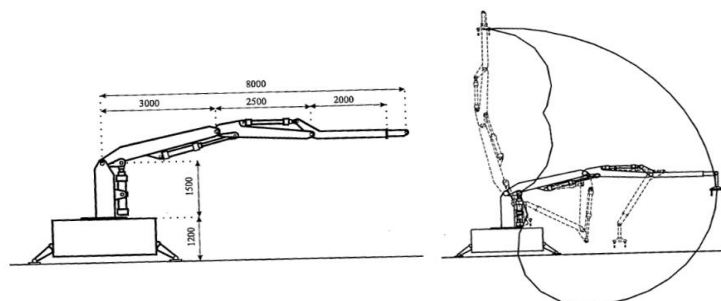
<b>Características geométricas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área de trabajo</li> <li>• Grados de libertad</li> <li>• Errores de posicionamiento               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia tras emergencia</li> <li>• Repetividad</li> <li>• Resolución</li> </ul> </li> <li>• Errores de seguimiento de trayectorias               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calidad de una línea recta, arco ...</li> </ul> </li> <li>• Precisión cuando se mueve el mínimo incremento posible</li> </ul>
<b>Características cinemáticas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad nominal máxima</li> <li>• Aceleración y deceleración</li> </ul>
<b>Características dinámicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuerza               <ul style="list-style-type: none"> <li>• De agarre</li> <li>• Carga máxima</li> <li>• Control de fuerza-par</li> </ul> </li> <li>• Frecuencia de resonancia</li> </ul>
<b>Tipo de movimientos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimientos punto a punto</li> <li>• Movimientos coordinados</li> <li>• Trayectorias continuas (CP)</li> </ul>

Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

### **Características geométricas**

El área de trabajo o también conocido como campo de acción es el volumen espacial al que puede llegar el extremo del robot y viene determinado por el tamaño, forma y tipo de eslabones que integran el robot (Figura 29). Este punto es importante ya que permite

al robot llegar a todos los puntos necesarios para llevar a cabo su tarea. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)



**Figura 29** Configuración y sección del área de trabajo del robot ROCCO  
Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

El número de grados de libertad con el que cuenta el brazo (GDL) determina la accesibilidad de éste y su capacidad de orientar su herramienta terminal, la elección del número de grados de libertad necesarios viene determinada por el tipo de aplicación. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

### Fuerza de esfuerzo máxima

De acuerdo a las especificaciones técnicas descritas por (3D Systems, 2018) que se detallan en la Tabla 63, obtenemos el valor de la fuerza de esfuerzo máximo.

**Tabla 63**  
*Especificaciones técnicas del Touch-X*

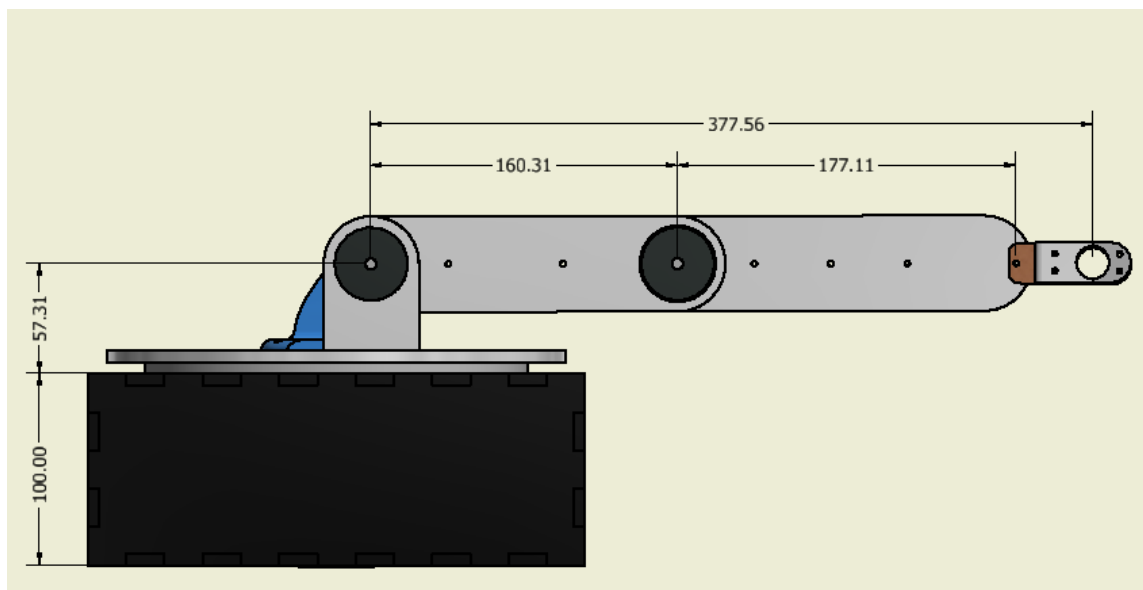
<b>Área de trabajo y retroalimentación de fuerza</b>	~6.4 W x 4.8 H x 4.8 D in	160 W x 120 H x 120 D mm
<b>Weight</b>	7.1805 lbs	~3.257 kg
<b>Rango de movimiento</b>	Movimiento de la mano con giro de la muñeca	

<b>Resolución de la posición nominal</b>	>110 dpi	~0.023 mm
<b>Fricción de accionamiento trasero</b>	<0.23 oz	<0.06N
<b>Fuerza de esfuerzo máxima en la posición nominal (brazos ortogonales)</b>	1.8 lbf	7.9N
<b>Inercia (masa aparente en la punta)</b>	~0.077 lbm	~35 g
<b>Retroalimentación de fuerza</b>	x,y,z	
<b>Sensor de posición (Base X,Y,Z)</b>	x,y,z (encoders digitales)	
<b>Sensor de posición</b>	Pitch, roll, yaw (sensor magnético de posición absoluta, precisión de 14 bits)	
<b>Interfaz</b>	USB 2.0	
<b>OpenHaptics SDK Compatibilidad?</b>	Si	

Fuente: (3D Systems, 2018)

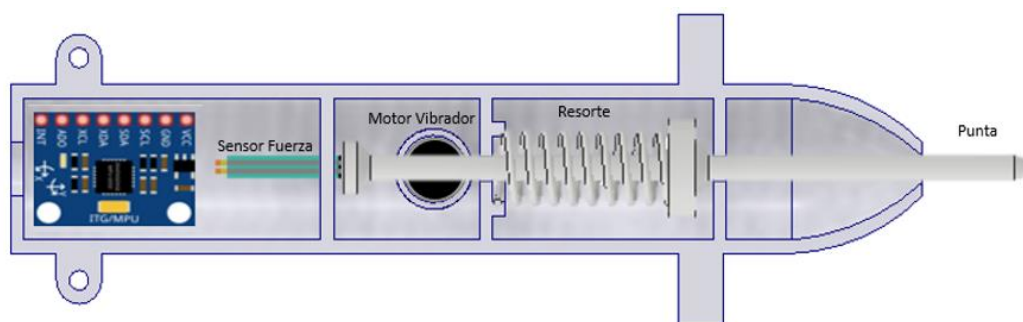
Para conseguir un diseño ergonómico se han aplicado las consideraciones descritas en la sección 3.3.1.1, las características geométricas entre las que están las dimensiones están dadas por:

El área de trabajo del brazo que se determinó en base a la Figura 29, en donde se procede a medir cada uno de los eslabones y la muñeca y obtener el punto máximo al que puede llegar el brazo, obteniendo los valores detallados en la Figura 30.



**Figura 30** Área de trabajo del brazo

El brazo dispone de 6 grados de libertad mismos que permiten el desplazamiento y rotación alrededor de los ejes, contiene una base, un eslabón (brazo 1), otro eslabón (brazo 2) y la muñeca.



**Figura 31** Diseño de la herramienta

El diseño de la herramienta se observa en la Figura 31 y dispone de espacios que contienen la parte electrónica, en la parte superior se encuentra el sensor MPU6050 acelerómetro-giroscopio y el motor vibrador para la retroalimentación háptica; en la mitad se encuentra el pulsador y el sensor de fuerza.

### 3.3.2. Diseño y análisis de eslabones

Para el diseño de la estructura se emplea el material MDF que es el producto de la madera reconstituida y es utilizado ampliamente en el corte láser. En la Tabla 64 se puede identificar algunas propiedades mecánicas y físicas del MDF.

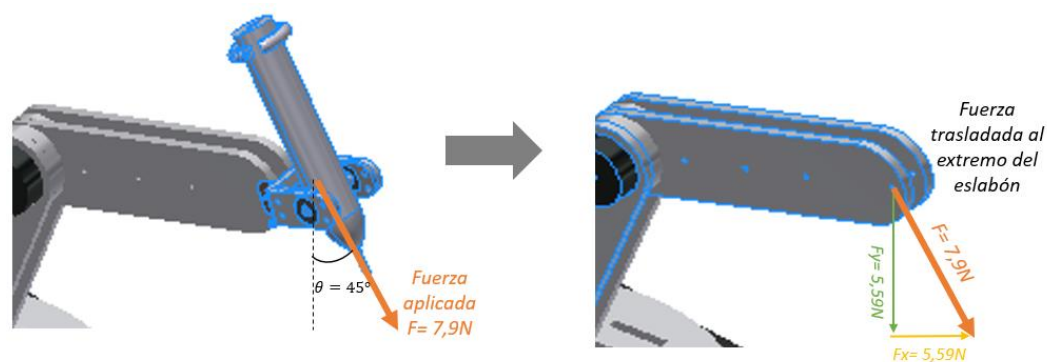
**Tabla 64**  
*Propiedades físicas del MDF*

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	800	Kg/ m <sup>3</sup>
Resistencia a la Tracción	100	N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la Flexión	45	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Elasticidad	4000	N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	150	MPa

Fuente: (Masisa, 2019)

Primero se debe obtener el valor de la fuerza aplicada en el eslabón como se indica en la

Figura 32, la fuerza de 7,9 N fue tomada de la Tabla 64.



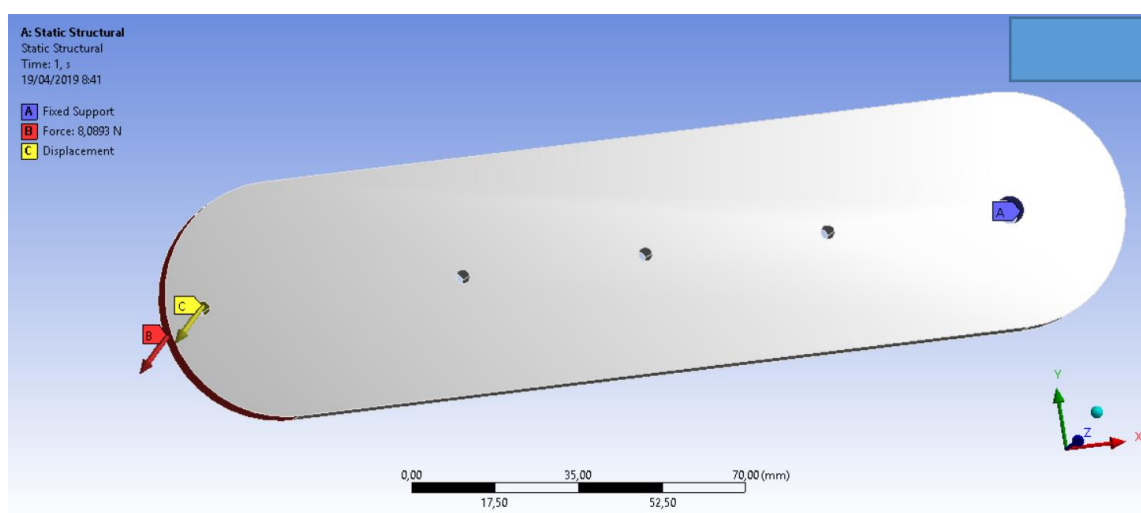
**Figura 32** Obtención de la fuerza aplicada en el eslabón

Después se deben identificar los tipos de soportes y el lugar en donde están ubicados, en el caso del eslabón cuenta con un soporte fijo y un soporte de rodamiento ubicados como se expone en la Figura 33.



**Figura 33** Soportes del eslabón

Luego se procede a crear el vector fuerza con cada una de sus componentes, así también los diferentes tipos de soportes, seleccionar las caras en donde van ubicados y colocar el valor correspondiente en el software CAE tal como se muestra en la Figura 34.





**Figura 34** Soportes y fuerza aplicada en el eslabón

Posteriormente se procede a crear una malla tomando en cuenta que mientras más fina sea esta, más preciso será el cálculo. Los resultados obtenidos son:

**Deformación**

Primero vamos a calcular la deformación total que es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a los esfuerzos producidos por las fuerzas aplicadas en este caso sobre el eslabón.

La deformación unitaria se define como la relación entre la deformación total a la longitud original como se puede observar en la (Ecuación 1).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

En donde:

$\delta$  es la deformación total

$L$  La longitud original

La rigidez del material es la función de su módulo de elasticidad, definida como:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Igualando las ecuaciones en función de  $\epsilon$  se obtiene:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma}{E} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Entonces la deformación total es:

$$\delta = \frac{\sigma L}{E} \quad (\text{Ecuación 4})$$

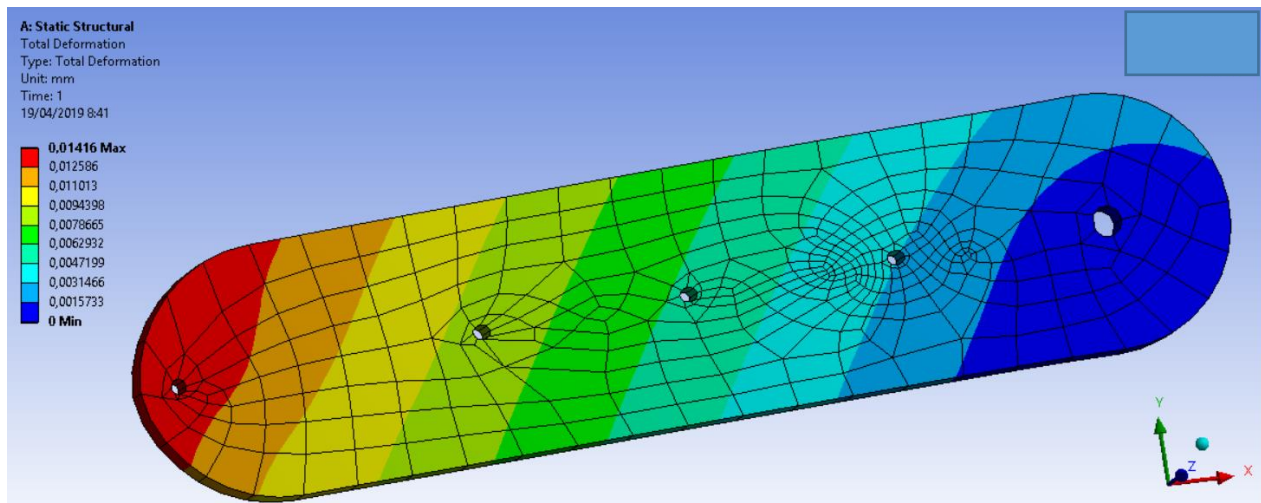
$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Reemplazar los valores de fuerza  $F=5.9\text{N}$ , longitud inicial  $L=180\text{ mm}$ , área  $A=23\ 105\text{ mm}^2$  y el módulo de elasticidad  $E=4\ 000\text{ MPa}$  para obtener la deformación total:

$$\delta = \frac{(5.9\text{N})(180\text{ mm})}{(23\ 105\text{mm}^2)(4\ 000\text{ N/mm}^2)}$$

$$\delta = 0.1149\text{ mm}$$

El valor obtenido en el software CAE de deformación total es  $0.01416\text{ mm}$  siendo este valor menor al valor de la deformación total calculada, por lo que se puede concluir que el diseño es seguro. Ver Figura 35.



**Figura 35** Deformación total del eslabón

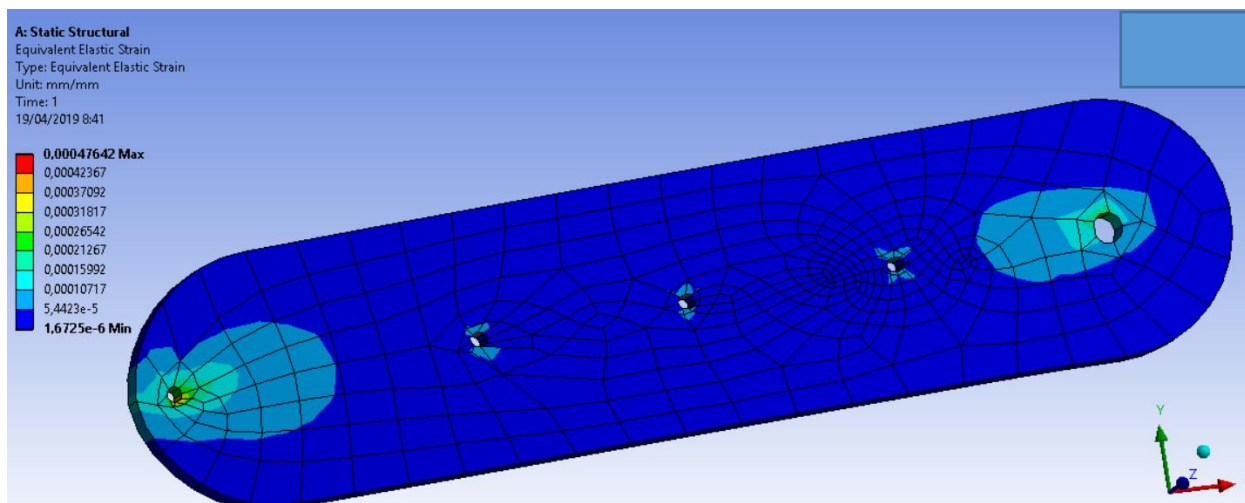
### Tensión de Von Mises

La tensión de Von Mises expone que al aplicar una fuerza a los materiales dúctiles estos tienden a deformarse sin romperse, es decir que la tensión de Von Mises debe ser menor a la tensión del límite elástico especificado en la (Ecuación 6).

$$\sigma_{VonMises} < \sigma_{LímiteElástico} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En la Figura 36 se puede observar que el valor máximo de la tensión de Von Mises proporcionado por el software es de 0,00047642, este dato se reemplaza en la 4) y se compara con la tensión del límite elástico del MDF de la Tabla 64.

$$4.7[MPa] < 150 [MPa]$$



**Figura 36** Tensión de Von Mises en el eslabón

Con la ((Ecuación 7)) se considera que el esfuerzo de diseño tiene que ser mayor al esfuerzo máximo que soporta la estructura, para que no provoque ningún fallo.

$$\sigma_d \geq \sigma' \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$S_y$ : Resistencia a la flexión

$N$ : Factor de seguridad

Despejando y sustituyendo en la (Ecuación 8):

$$\frac{S_y}{N} = \sigma_d$$

$$\frac{45 [MPa]}{1.5} = 30 [MPa]$$

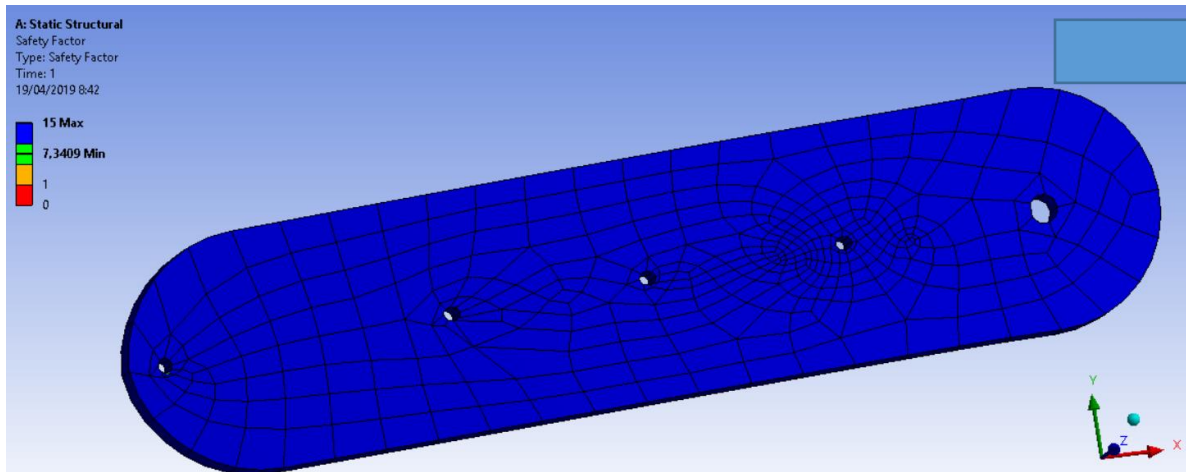
Una vez reemplazados los datos de la (Ecuación 8) con un factor de seguridad del 1.5 valor que se ha puesto por seguridad se tiene que la tensión de diseño es 30 [MPa].

$$30 [MPa] \geq 4.7[MPa]$$

Al aplicar la ( se puede decir que el esfuerzo de diseño es mayor o igual que el esfuerzo que soporta la estructura.

### Factor de seguridad

Como se puede observar en la Figura 37 el factor de seguridad del eslabón tiene un valor mínimo de 7.34 y un valor máximo de 15 por lo cual se concluye que es seguro y se puede construir.



**Figura 37** Factor de seguridad del eslabón

El diseño del eslabón debe ser robusto, puesto que es el elemento que soporta los encoders y la herramienta.

### 3.3.3. Diseño y análisis de la herramienta

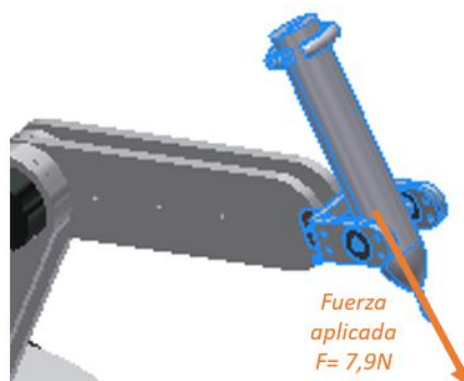
Para el diseño de la herramienta se emplea el material PLA (Ácido Poli láctico) que es un material biodegradable, no tóxico y utilizado en la impresión 3D. En la tabla se puede identificar algunas propiedades mecánicas y físicas del PLA.

**Tabla 65**

*Propiedades físicas del PLA*

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1.25	G / cm <sup>3</sup>
Módulo de corte	2 400	MPa
Módulo de flexión	4 000	MPa
Resistencia a la Flexión	80	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Elasticidad	3 500	N/mm <sup>2</sup>
Límite elástico	60	MPa
Límite de tracción	50	MPa

Primero se debe obtener el valor de la fuerza aplicada a la herramienta como se expone en la Figura 38.



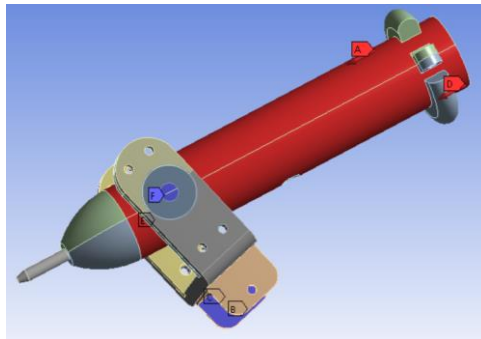
**Figura 38** Obtención de la fuerza aplicada en la herramienta

Después se deben identificar los tipos de soportes y el lugar en donde están ubicados, en el caso de la herramienta cuenta con un soporte fijo y dos soportes ubicados como se muestra en la Figura 39.



**Figura 39** Soportes de la herramienta

Luego se procede a crear el vector fuerza, así también los diferentes tipos de soportes, seleccionar las caras en donde van ubicados y colocar el valor correspondiente en el software CAE tal como se indica en la Figura 40.



**Figura 40** Soportes y fuerza aplicada en la herramienta

Posteriormente se procede a crear una malla tomando en cuenta que mientras más fina sea esta, más preciso será el cálculo.

## Deformación

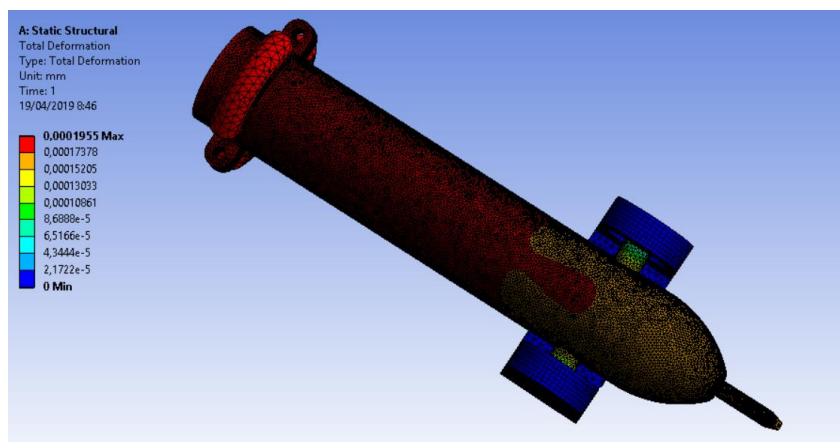
Primero vamos a calcular la deformación total que es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a los esfuerzos producidos por las fuerzas aplicadas en este caso sobre la herramienta.

Reemplazar en la (Ecuación 4) los valores de fuerza  $F=5.9\text{N}$ , longitud inicial  $L=140\text{ mm}$ , área  $\left(A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(12.5\text{mm})^2}{4}\right)$   $A= 122.718\text{ mm}^2$  y el módulo de elasticidad  $E=3\ 500\text{ MPa}$  para obtener la deformación total:

$$\delta = \frac{(5.9\text{N})(140\text{ mm})}{(122.718\text{ mm}^2)(3\ 500\text{ N/mm}^2)}$$

$$\delta = 0.001923\text{ mm}$$

El valor obtenido en el software CAE de deformación total es  $0.0001955\text{ mm}$  siendo este valor menor al valor de la deformación total calculada, por lo que se puede concluir que el diseño es seguro.



**Figura 41** Deformación total de la herramienta

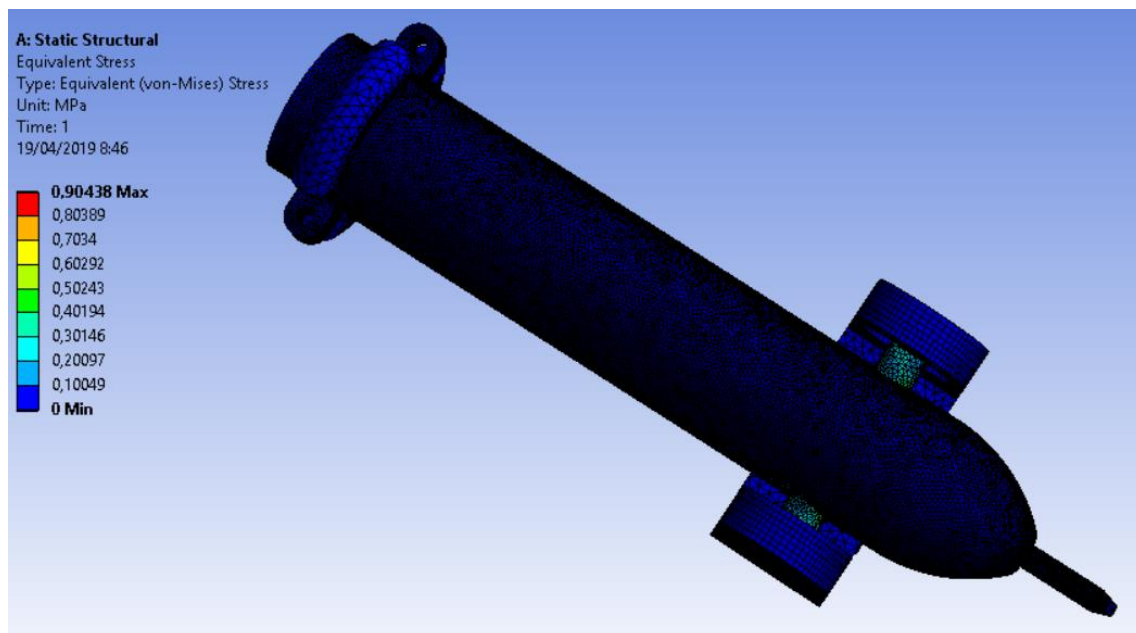


## Tensión de Von Mises

En la Figura 42 se puede observar que el valor máximo de la tensión de Von Mises proporcionado por el software es de 0,9044; este dato se reemplaza en la (Ecuación 6) y se compara con la tensión del límite elástico del PLA de la Tabla 65.

$$\sigma_{VonMises} < \sigma_{LímiteElástico}$$

$$0.904 \text{ [MPa]} < 60 \text{ [MPa]}$$



**Figura 42** Tensión de Von Mises en la herramienta

Con la (Ecuación 6) se considera que el esfuerzo de diseño tiene que ser mayor al esfuerzo máximo que soporta la estructura, para que no provoque ningún fallo.

Una vez reemplazados los datos en la (Ecuación 8) con un factor de seguridad del 1.5 valor que se ha puesto por seguridad se tiene que la tensión de diseño es 30 [MPa].

$$\frac{S_y}{N} = \sigma_d$$

$$\frac{80 \text{ [MPa]}}{1.5} = 53.33 \text{ [MPa]}$$

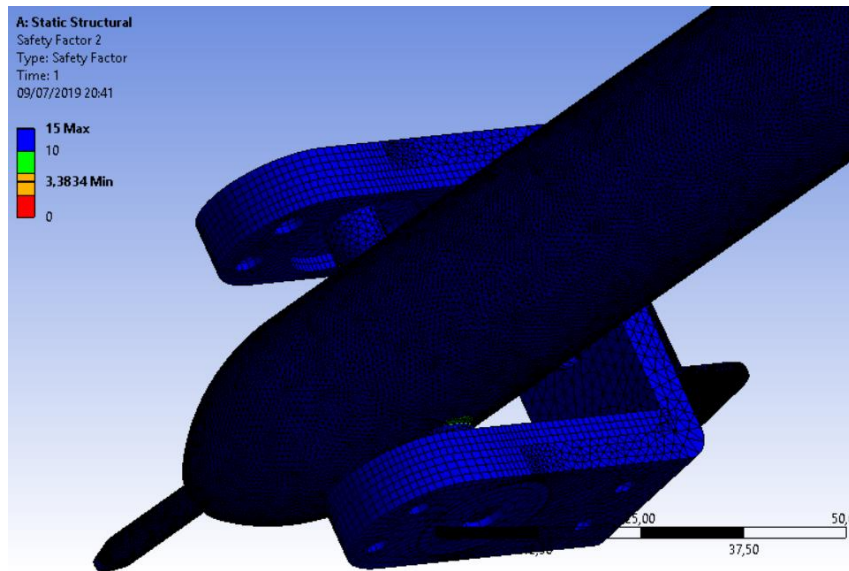
Al aplicar la (Ecuación 7) se puede decir que el esfuerzo de diseño es mayor o igual que el esfuerzo que soporta la estructura.

$$\sigma_d \geq \sigma'$$

$$53.33 \text{ [MPa]} \geq 0.9044 \text{ [MPa]}$$

### Factor de seguridad

Como se observa en la Figura 43 el factor de seguridad de la herramienta tiene un valor mínimo de 3,3843 y un valor máximo de 15 por lo cual se concluye que es seguro y se puede construir.

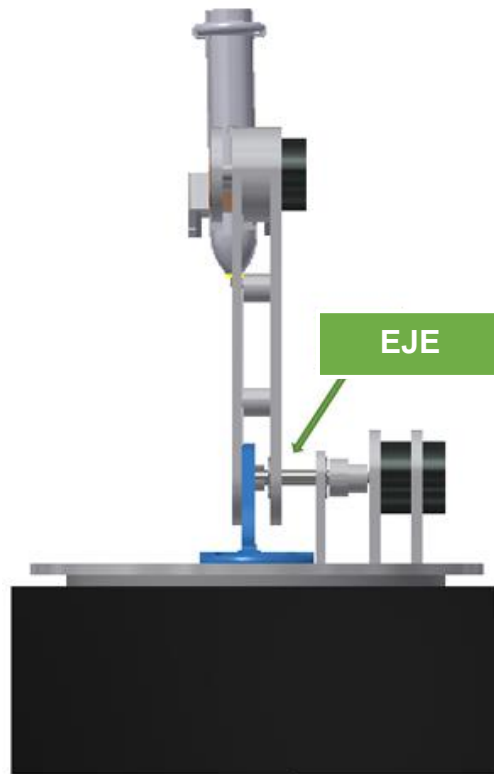


**Figura 43** Factor de seguridad de la herramienta.

El diseño de la herramienta debe ser bien robusto, puesto que es el elemento que soporta los sensores y actuadores.

### 3.3.4. Diseño y análisis del eje

La función del eje es transmitir la rotación del Eslabón B1 (Anexo B) mediante su acople a el Encoder B1, para lograr dicho acople debe tener una longitud de 62 mm y dos apoyos. En la Figura 44 se puede apreciar la disposición de elementos del diseño y las dimensiones se detalla en el Anexo A.



**Figura 44** Disposición del eje y los elementos de diseño

El eje se encuentra sometido a esfuerzos combinados debido a momentos flectores y los pares torsores, mismos que producen esfuerzos máximos en la superficie. Por tanto,

se realizará el análisis mediante la Teoría de la Energía de Distorsión o Teoría de Von Mises, misma que se expresa en la (Ecuación 9).

$$\sigma' = (\sigma)^2 + 3(\tau)^2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde:

$\sigma'$  Esfuerzo de von Mises [MPa].

$\sigma$  Sumatoria del esfuerzo axial y esfuerzo por flexión [MPa].

$\tau$  Esfuerzo cortante por torsión [MPa].

La (Ecuación 9), puede expresarse como una ecuación de diseño mediante la (Ecuación 10) obtenida de (Budynas & Nisbett, 2008):

$$\sigma' = \frac{S_y}{N} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Así también, la teoría de la energía de distorsión predice un aproximado de la resistencia a la fluencia cortante mediante la siguiente relación:

$$S_{ys} = 0,577S_y \quad (\text{Ecuación 11})$$

Igualando la (Ecuación 9) con la (Ecuación 10) y sustituyendo el valor de  $S_{ys}$  se tiene:

$$\left(\frac{\sigma}{S_y}\right)^2 + 3\left(\frac{\tau}{0,577S_y}\right)^2 = \left(\frac{1}{N}\right)^2 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Para el análisis de esfuerzos primero fue necesario calcular la masa de cada pieza a partir del software CAD , para ello se creó un nuevo material con las propiedades del MDF que se muestran en la Tabla 64 y se lo agregó a cada pieza que sea de dicho material.

En la Tabla 66 se tiene que el valor de la carga sobre el eje es de 3,83 N, la cual se divide en dos cargas de 1,915 N que se ubican a 35mm y 62 mm desde el extremo izquierdo del eje. El eje cuenta con dos apoyos localizados en 15 mm y 52,5 mm.

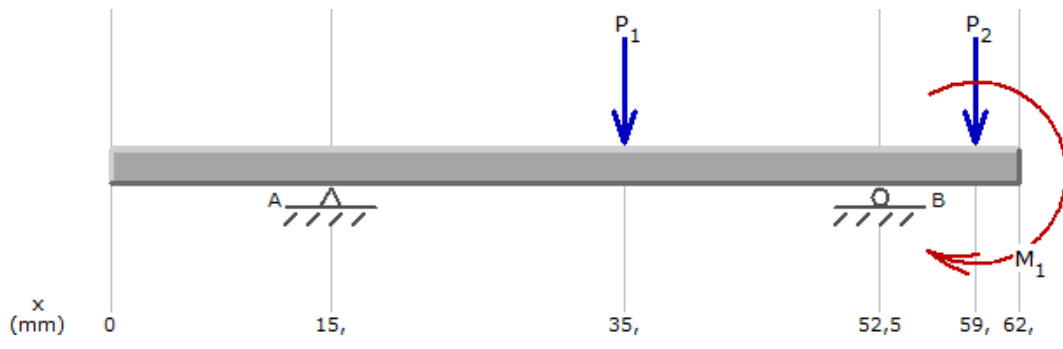
**Tabla 66**

*Valor de la carga aplicada sobre el eje*

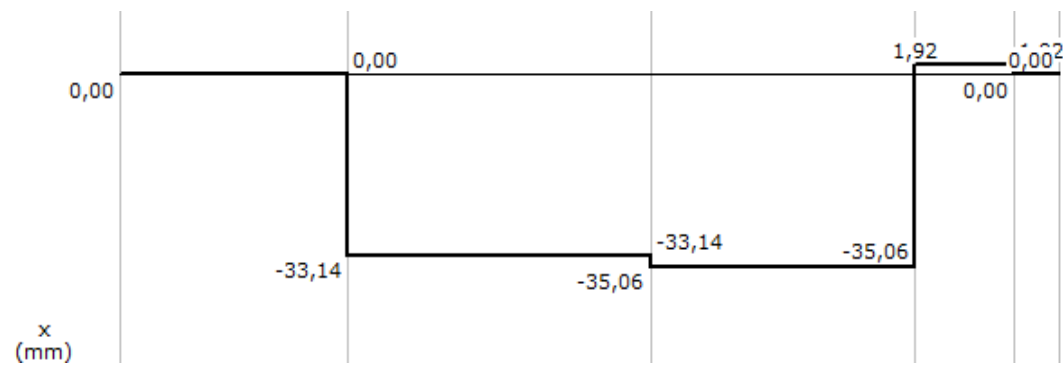
<b>Pieza</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Masa [Kg]</b>	<b>Peso [N]</b>
<b>Eslabón 1-1</b>	1	0,0463	0,454
<b>Eslabón 1-2</b>	1	0,0399	0,392
<b>Eslabón 2-1</b>	1	0,0476	0,467
<b>Eslabón 2-2</b>	1	0,0422	0,414
<b>Separador 1</b>	2	0,0018	0,0177
<b>Separador 2</b>	2	0,0009	0,00883
<b>Separador 3</b>	1	0,0023	0,02256
<b>Lápiz</b>	1	0,0114	0,112
<b>Muñeca</b>	1	0,0245	0,2403
<b>Encoder B2</b>	1	0,1734	1,7004
<b>TOTAL</b>			<b>3,83</b>

Para el cálculo del torque máximo posible, se tiene que la fuerza aplicada por una persona sea de 7,9 N como se indica en la Sección 3.3.1., y la distancia sea de 160,31 mm teniendo así que el torque máximo posible es de 1266,45 N\*mm.

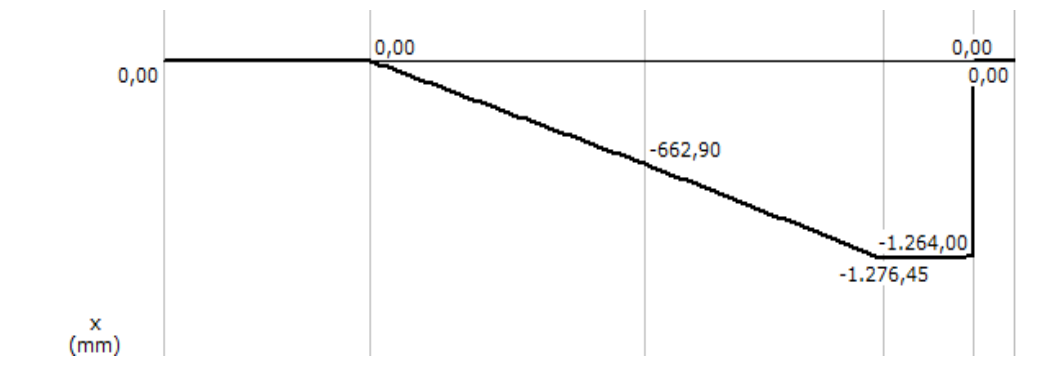
Iniciando con el análisis estático se considera al eje como una viga con dos apoyos simples, la Figura 45 se expone el diagrama de cuerpo libre en donde se puede observar las fuerzas cortantes a las que estaría sometido el eje.



a)



b)



c)

**Figura 45** Diagramas: a) Cuerpo libre b) Fuerzas cortantes c) Momentos flectores

Para realizar el cálculo de esfuerzo por flexión en función del diámetro del eje se utiliza la (Ecuación 13).

$$\sigma_f = \frac{M}{S_x} \quad (\text{Ecuación 13})$$

En donde,

$\sigma_f$  Esfuerzo por flexión [MPa].

$M$  Momento máximo o crítico [N\*mm].

$S_x$  Módulo de sección circular [mm<sup>3</sup>].

El módulo de sección circular viene dado por la (Ecuación 14),

$$S_x = \frac{\pi * d^3}{32} \quad (\text{Ecuación 14})$$

La Figura 45 muestra el valor del momento crítico es de 1276,45 N\*mm, reemplazamos este valor y el módulo de sección circular en la (Ecuación 13), obteniendo el valor del esfuerzo flector.

$$\sigma_f = \frac{1276,45 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\frac{\pi * d^3}{32}}$$

$$\sigma_f = \frac{40846,4 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi * d^3}$$

A continuación, se utiliza la (Ecuación 15) para el cálculo del esfuerzo cortante.

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde,

$\tau$  Esfuerzo cortante por torsión [MPa].

$T$  Momento torsor máximo [N\*mm].

$r$  Distancia al centro del eje [mm].

$J$  Momento polar de inercia [mm<sup>4</sup>].

El momento polar de inercia se calcula mediante la (Ecuación 16), ecuación específica para una forma circular.

$$J = \frac{\pi * d^4}{32} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Reemplazando los valores del módulo polar de inercia y del torque máximo en la (Ecuación 15) se obtiene el valor del esfuerzo cortante.

$$\tau = \frac{1266,45 * \frac{d}{2} N \cdot mm}{\frac{\pi * d^4}{32}}$$

$$\tau = \frac{20263,2 N \cdot mm}{\pi * d^3}$$

Se sustituye el esfuerzo normal generado por flexión y el esfuerzo cortante generado por torsión en la (Ecuación 15). Se seleccionó como material el Acero 1018 con valor de resistencia a la fluencia de 370 MPa, y con un valor de tres como factor de seguridad.

$$\left( \frac{40846,4}{370 * \pi * d^3} \right)^2 + 3 \left( \frac{20263,2}{0,577(370)\pi * d^3} \right)^2 = \left( \frac{1}{3} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 17})$$



$$1234,82 d^{-6} + 2738,31 d^{-6} = \frac{1}{9}$$

$$d = \left( \frac{1}{9 * 4018,13} \right)^{-1/6}$$

$$d = 5,75 \text{ mm}$$

El esfuerzo normal por flexión a la que estará sometido el eje es de:

$$\sigma_F = \frac{40846,4 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi * (5,75\text{mm})^3}$$

$$\sigma_F = 68,39 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante por torsión al que es sometido el eje será:

$$\tau = \frac{20263,2 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi * (5,75\text{mm})^3}$$

$$\tau = 33,93 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad se despejó de la (Ecuación 17), obteniendo:

$$\left( \frac{68,39}{370} \right)^2 + \left( \frac{33,93}{0,577(370)} \right)^2 = \left( \frac{1}{N} \right)^2$$

$$N = \left[ \frac{1}{\left( \frac{68,39}{370} \right)^2 + \left( \frac{33,93}{0,577(370)} \right)^2} \right]^{1/2}$$

$$N = 4,1$$

El factor de seguridad verifica que eje no fallará por flexión ni por torsión, sin embargo, debido a la disponibilidad comercial de barras de acero se selecciona un eje de acero

ANSI 1018 de 8 mm de diámetro, mismo que será maquinado hasta llegar a un diámetro de 7,86 mm para su correcto acople a los rodamientos.

### 3.3.5. Diseño y análisis de la estructura

Para realizar el análisis de la estructura se conoce el peso total al que se encuentra sometido es decir el peso del dispositivo háptico, fantoma dental, tablet y los soportes.

Los elementos del dispositivo háptico, así como cada uno de sus pesos y masas se describen en la Tabla 67.

**Tabla 67**

*Masa y peso de cada elemento del dispositivo háptico*

<b>Pieza</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Masa [Kg]</b>	<b>Peso [N]</b>
<b>Brazo</b>	1	0,3544	3,4778
<b>Lápiz</b>	1	0,0114	0,112
<b>Muñeca</b>	1	0,0245	0,2403
<b>Base rotacional</b>	1	0,2105	2,065
<b>Acople base</b>	1	0,014	0,1373
<b>Base rectangular</b>	1	0,4536	4,45
<b>Base deslizante</b>	1	0,108	1,0595
<b>Acople Encoder B</b>	1	0,0735	0,7208
<b>Acople Encoder B1</b>	1	0,1046	1,0260
<b>Encoder B</b>	1	0,1734	1,7004
<b>Encoder B1</b>	1	0,1734	1,7004
<b>TOTAL</b>			<b>16,69</b>

El peso total que soportaría la estructura de la estación de trabajo se detalla en la Tabla 68.

**Tabla 68**  
*Cargas de la estructura de la estación de trabajo*

<b>Pieza</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Masa [Kg]</b>	<b>Peso [N]</b>	<b>Tipo de esfuerzo</b>
<b>Dispositivo háptico</b>	1	1,70	16,69	Flexión
<b>Tablet Samsung Galaxy Tab 3</b>	1	0,429	0,112	Flexión
<b>Fantoma dental</b>	1	0,018	0,1776	Flexión
<b>Soporte Tablet</b>	1	0,204	2,0012	Flexión
<b>Soporte Fantoma</b>	1	0,175	1,7167	Flexión
<b>Base</b>	1	0,576	5,6506	Flexión
<b>Total</b>			26,3481	

La estructura de la estación está conformada por perfil angular de aluminio 6061. El punto más crítico se debe a que la base se encontrará sometida a momentos flectores, el momento flector se calcula con la (Ecuación 18).

$$M = F * r \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Donde,

$M$  Momento flector [N\*mm].

$F$  Fuerza aplicada [N].

$r$  Distancia perpendicular al eje de giro [mm].

Entonces el momento ejercido en la base es:

$$M = \frac{26,3481}{2} N * 300 \text{ mm}$$

$$M = 3952,215 \text{ MPa}$$

Se selecciona el perfil de angular de lados iguales, de aluminio 6061, cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Figura 46.

DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	<b>6061</b>	<a href="#">➔ Añadir a la comparación</a>
Estándar / País	Estados Unidos / SAE	
Subgrupo	SAE AMS 4025L (2008) Aleación de Aluminio, Chapa y Placa, 1.0mg 0.60si 0.28cu 0.20cr (6061-0)	
Aplicaciones	These products have been used typically for parts where moderate formability and response to solution and precipitation heat treatment are required, but usage is not limited to such applications.	

## Propiedades mecánicas

Unidades de medida  Métrico (SI)  Anglosajón

	Min.	Max	Aprox
<b>Plates, sheets; Recocido (O); &gt; 0.15 &lt;= 0.18 mm; (espesor)</b>			
Tensión de fluencia, R <sub>p0,2</sub> (MPa)	-	83	-
Tensión de tracción, R <sub>m</sub> (MPa)	-	152	-
Alargamiento, A (%)	10	-	-
	Lo= 50.8 mm;		
Reducción de área (%)	-	-	-
Valores de impacto, Kv/Ku (J)	-	-	-
<b>Plates, sheets; Solución, temple y envejecimiento artificial (T62); &gt; 0.15 &lt;= 0.18 mm; (espesor)</b>			
Tensión de fluencia, R <sub>p0,2</sub> (MPa)	241	-	-

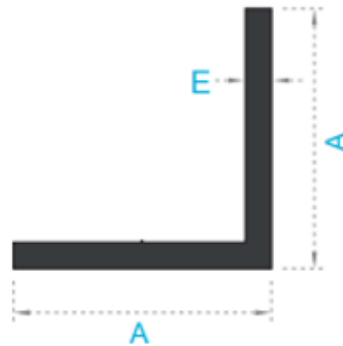
**Figura 46** Propiedades mecánicas del aluminio 6061

Fuente: (Total materia, 2019)

Para calcular el módulo de sección se utiliza la (Ecuación 19).

$$Z = \frac{I}{c} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

Antes de calcular el módulo de sección es necesario calcular el momento de inercia, para lo cual se utilizan las dimensiones de la sección transversal de un perfil de aluminio angular de lados iguales.



REFERENCIA	Lado (A)		Espesor (E)	Peso
	Milímetros	Pulgadas	mm	Kg/m
1003	25.40	1	1.20	0.213

**Figura 47** Dimensiones del perfil de aluminio

Fuente: (CEDAL, 2019)

A continuación, en la Tabla 69 se muestran los valores calculados para encontrar el momento de inercia empleando el teorema de ejes paralelos que se describe según la (Ecuación 20):

$$IY = I + Ad^2 \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde,

$I$  es el segundo momento del área respecto de su propio eje centroidal

$IY$  segundo momento del área con respecto a cualquier eje paralelo que se encuentre alejado una distancia  $d$ .

$A$  es el área de la sección.

**Tabla 69**  
Valores para el momento de inercia del perfil de aluminio

	A	I	YG	Y	d	d <sup>2</sup>	IY
<b>P1</b>	29,04	1417,25	12,7	12,1	0,6	0,36	1427,7
<b>P2</b>	30,48	3,6575	12,7	0,6	12,1	146,41	653369,5
						<b>IY total</b>	<b>654797,23</b>

La distancia desde el eje neutro hasta el punto de aplicación de la fuerza, es igual a 12,1 mm. Por tanto, el módulo de sección es igual a:

$$Z = \frac{654797,23}{12,1} = 54115,5 \text{ mm}^3$$

Entonces, sustituyendo en la (Ecuación 21) se obtiene el valor del esfuerzo producido por el momento flector que es de:

$$\sigma_F = \frac{M}{Z} \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$\sigma_F = \frac{3952,215 * \text{mm}}{54115,5 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_F = 0,073 \text{ MPa}$$

Aplicando un factor de seguridad de N=3, se tiene que el esfuerzo de diseño es de:

$$\sigma_D = \frac{152 \text{ MPa}}{3}$$

$$\sigma_D = 50,7 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo por flexión con el esfuerzo de diseño se tiene:

$$\sigma_F < \sigma_D$$

$$0,073 \text{ MPa} < 50,7 \text{ MPa}$$

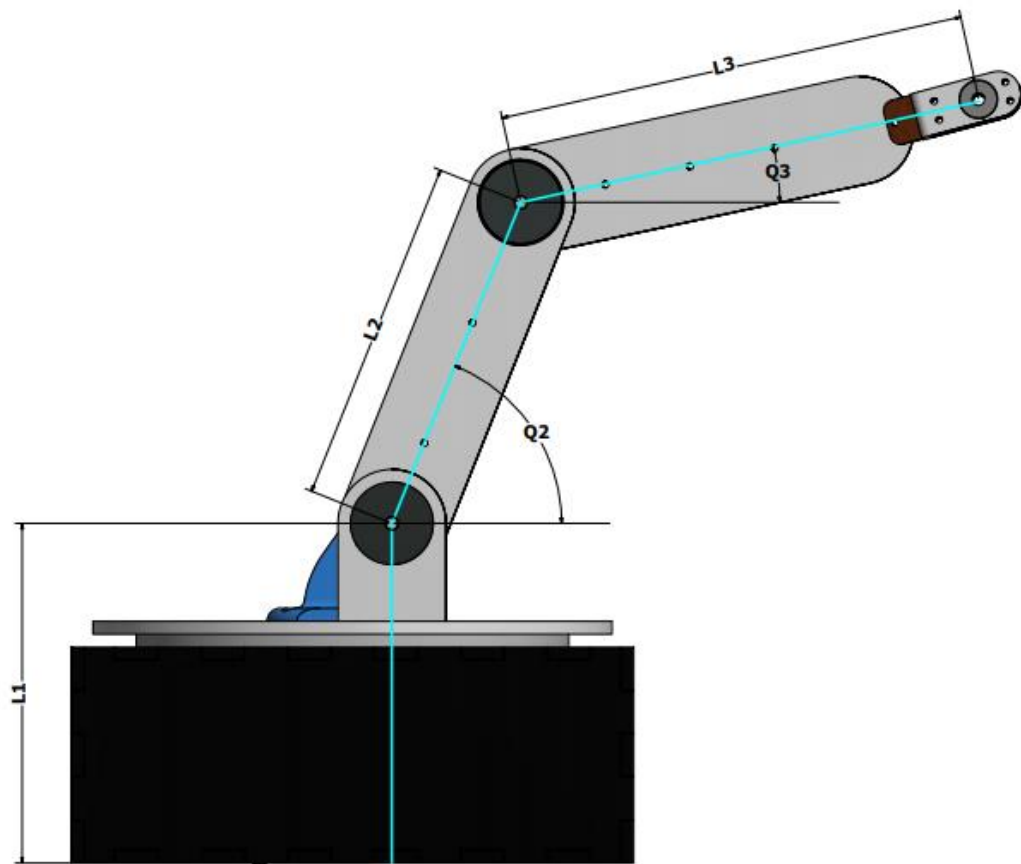
El valor obtenido para el esfuerzo de flexión es de 0,073 MPa, menor que el esfuerzo de diseño que es de 50,7 MPa, con lo que se confirma que el perfil de aluminio 6061 de dimensiones 25,4 mm x 25,4 mm x 1,2 mm es adecuado para la construcción de estructura de la estación.

### **3.4. Análisis cinemático**

El análisis cinemático comprende un estudio del movimiento del brazo articulado que conforma el dispositivo de percepción háptica con respecto a un sistema de referencia, en el cual se proporcionará las relaciones de localización del extremo del robot.

El dispositivo háptico cuenta con encoders incrementales que permiten conocer el valor del ángulo en el que se localiza cada una de las tres articulaciones y dado que también son conocidos los parámetros geométricos, el análisis será para una cinemática directa que permitirá conocer la posición del extremo del robot.

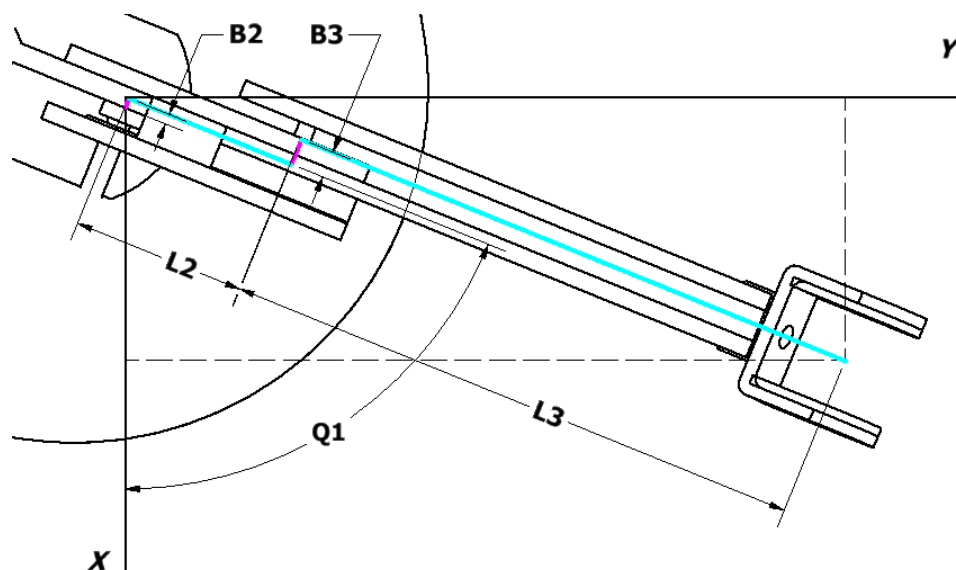
Para hallar las ecuaciones de cinemática se aplicó el método usado en el libro Robótica del autor Fernando Reyes Cortés. El brazo articulado de cinemática abierta en configuración serial, cuenta con tres juntas rotatorias cuyos ángulos se denominan Q1, Q2 y Q3, como se observa en la Figura 48.



**Figura 48** Brazo articulado con las longitudes y ángulos

Se toma en cuenta el desplazamiento generado por acoples mecánicos y el espesor del material, mismos que se denominan  $B2$  y  $B3$ , como lo observado en la Figura 49.





**Figura 49** Desplazamiento y espesor del brazo

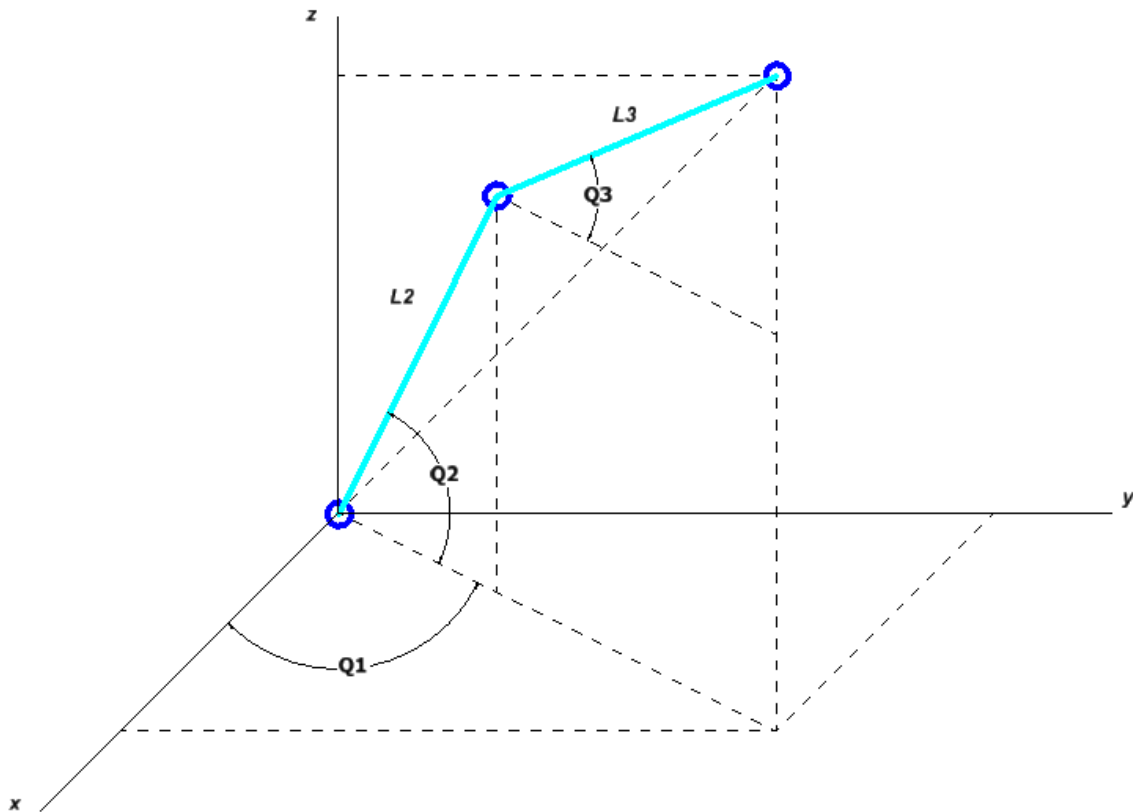
El valor dimensional de los parámetros geométricos del robot requeridos para el análisis, se encuentran detallados en la Tabla 70.

**Tabla 70**

*Valores dimensionales de los parámetros geométricos del brazo*

Denominación	Dimensión (mm)
L1	157,31
L2	160,31
L3	177,11
B2	3,46
B3	9,51

Para conocer la posición del extremo del brazo se busca hallar relaciones geométricas en base a los parámetros conocidos para llegar a ecuaciones que representen la posición del punto en el sistema de coordenadas tridimensional XYZ.



**Figura 50** Parámetros conocidos del brazo

Aplicando relaciones trigonométricas en base a la Figura 50, se tiene:

$$H1 = L2 * \text{sen}(Q2) \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$H2 = L3 * \text{sen}(Q2 + Q3) \quad (\text{Ecuación 23})$$

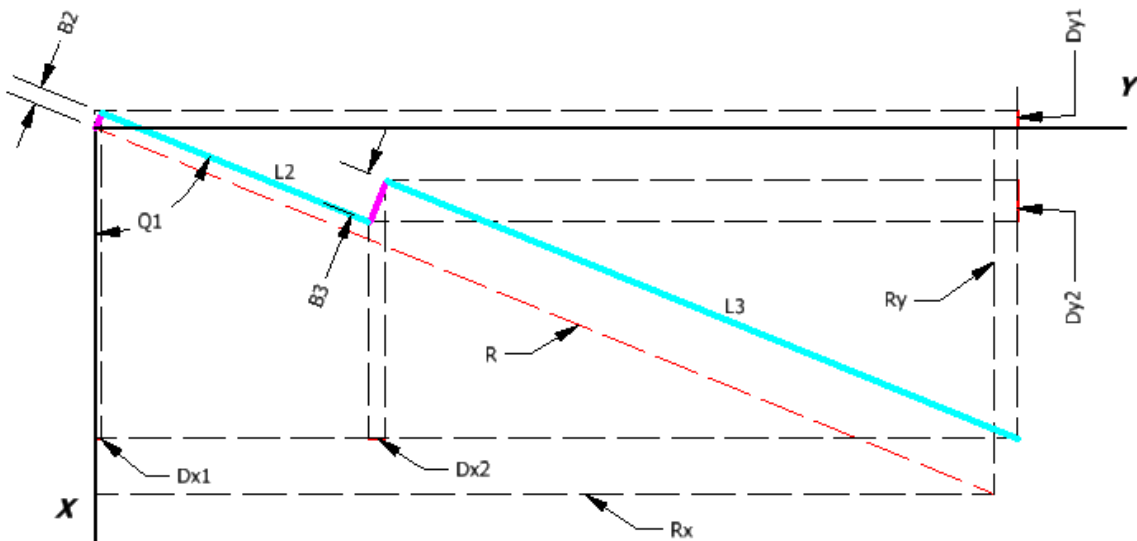
En la Figura 49 es notable el desplazamiento debido al espesor de los eslabones y acoples, por lo que dichos desplazamientos en X y Y, están dados por:

$$Dx_1 = B2 * \text{sen}(Q1) \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$Dx_2 = B3 * \text{sen}(Q1) \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$Dy_1 = B2 * \text{cos}(Q1) \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$Dy_2 = B3 * \text{cos}(Q1) \quad (\text{Ecuación 27})$$



**Figura 51** Posición del brazo a través de Rx y Ry

La Figura 51 se encuentra representada por Rx y Ry la posición del extremo del robot en el plano XY, sin el desplazamiento generado.

$$Rx = L2 * \text{cos}(Q2) + L3 * \text{cos}(Q2 + Q3) * \text{cos}(Q1) \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$Ry = L2 * \text{sen}(Q2) + L3 * \text{sen}(Q2 + Q3) * \text{cos}(Q1) \quad (\text{Ecuación 29})$$

Por tanto, el desplazamiento en x, y, z está dado por:

$$x = Rx + Dx_1 + Dx_2 \quad (\text{Ecuación 30})$$

$$y = Ry - Dy_1 - Dy_2 \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$z = H1 + H2 \quad (\text{Ecuación 32})$$

Sustituyendo desde la (Ecuación 30) a la (Ecuación 32) en la (Ecuación 28) y (Ecuación 29) se tiene:

$$x = (L2 * \cos(Q2) + L3 * \cos(Q2 + Q3)) * \cos(Q1) + B3 \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$* \sin(Q1) + B2 * \sin(Q1)$$

$$y = (L2 * \cos(Q2) + L3 * \cos(Q2 + Q3)) * \sin(Q1) - B3 \quad (\text{Ecuación 34})$$

$$* \cos(Q1) - B2 * \cos(Q1)$$

$$z = L1 + L2 * \sin(Q2) + L3 * \sin(Q2 + Q3) \quad (\text{Ecuación 35})$$

Finalmente, se reemplaza los valores de los parámetros conocidos que se encuentran en la Tabla 70:

$$x = (160,31 * \sin(Q2) + 177,11 * \sin(Q2 + Q3)) * \cos(Q1) \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$+ (12,97) * \sin(Q1)$$

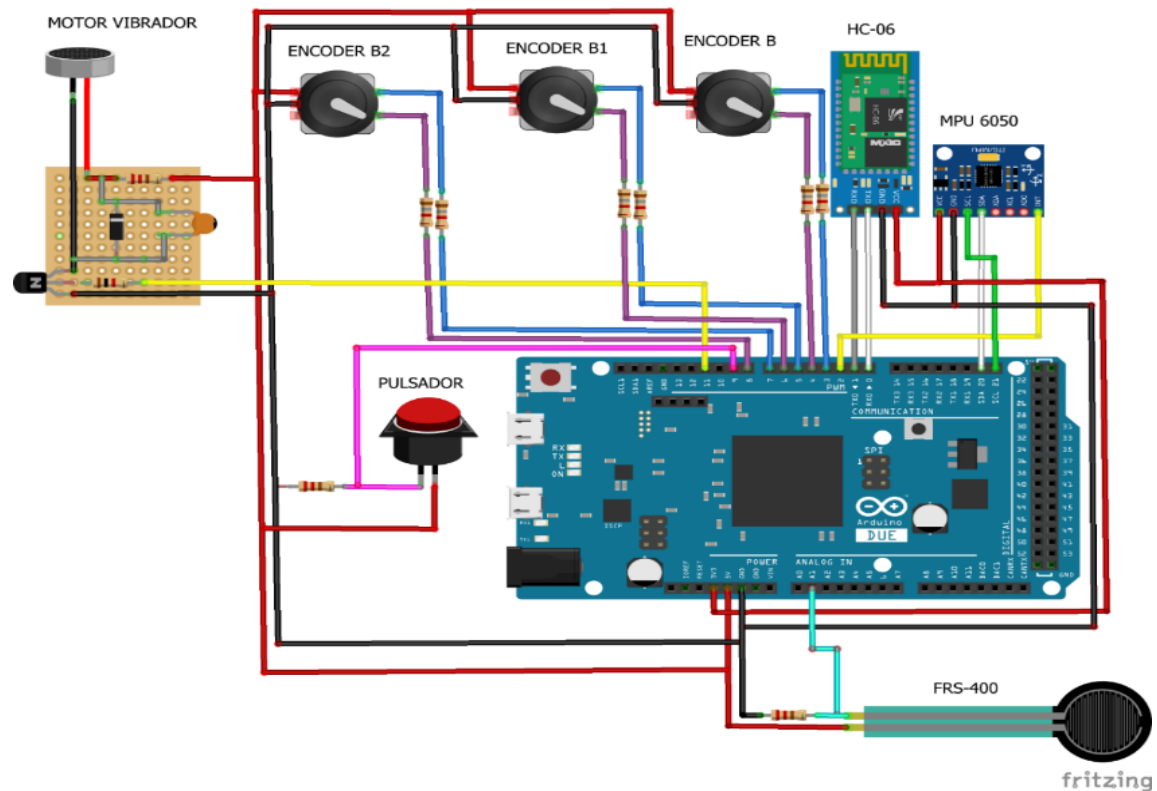
$$y = (160,31 * \cos(Q2) + 177,11 * \cos(Q2 + Q3)) * \sin(Q1) \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$- (12,97) * \cos(Q1)$$

$$z = 157,31 + 160,31 * \text{sen}(Q2) + 177,11 * \text{sen}(Q2 + Q3) \quad (\text{Ecuación 38})$$

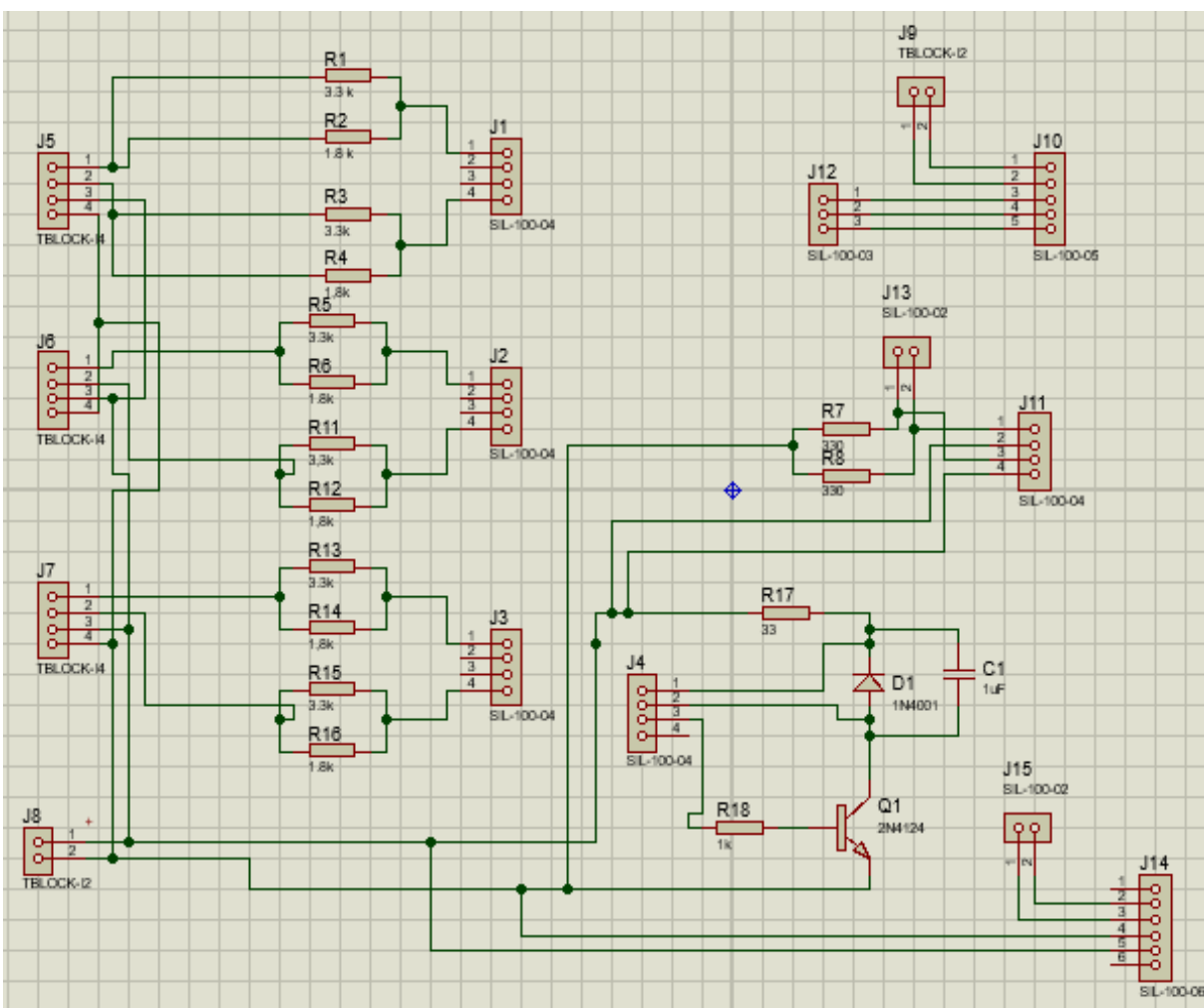
### 3.5. Diseño electrónico del sistema de percepción háptica

El sistema electrónico del dispositivo de percepción háptica está compuesto por un Arduino Due, módulo bluetooth HC-06, módulo acelerómetro – giroscopio MPU6050, sensor de fuerza resistivo FSR 400, encoders incrementales y un actuador vibratorio. El esquema de conexión con cada uno de los componentes se expone en la Figura 52.



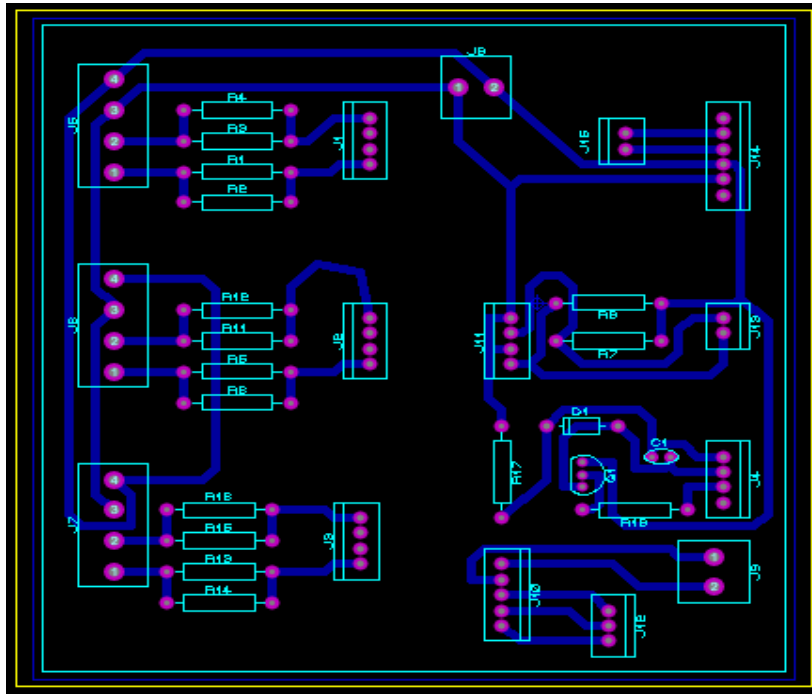
**Figura 52** Esquema de conexión con los componentes electrónicos

Para el diseño de la PCB, se utilizó el software para simulación electrónica. Primero se realizó un esquema con la conexión de elementos como borneras, transistor, capacitor, resistencias, basándonos en el esquema de conexión de la Figura 53. Ya que debe contener las borneras necesarios para la conexión de los módulos, sensores y actuadores.



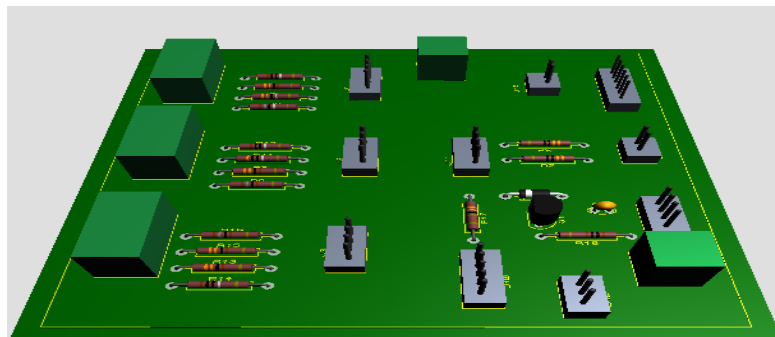
**Figura 53** Esquema de conexión con los diferentes pines

Seguidamente se observa en la Figura 54 el diseño de la PCB, prestando especial cuidado en que las pistas no tengan ángulos de  $90^\circ$  o ángulos agudos ya que esto podría impedir el correcto paso de la corriente.



**Figura 54** Diseño de la placa PCB

En la Figura 55 se puede observar la placa PCB con cada uno de los elementos en vista 3D.



**Figura 55** Vista superior de la placa PCB

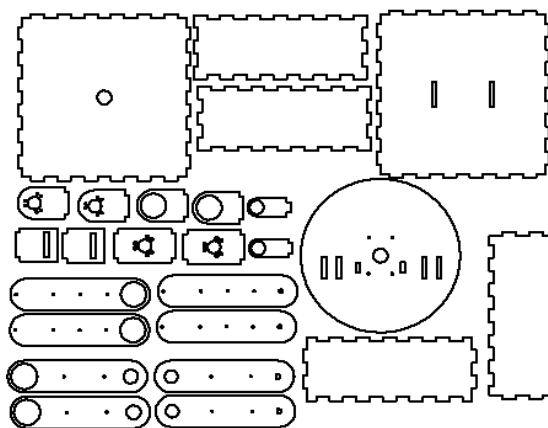
### 3.6. Construcción del sistema de percepción háptica

#### 3.6.1. Manufactura del dispositivo háptico

##### a. Corte láser de piezas en MDF

En la actualidad, la tecnología láser es uno de los métodos más usados para realizar corte de varios tipos de materiales, debido a la alta precisión y versatilidad. Esta versatilidad se debe a que el sistema láser puede seguir diversas formas y geometrías separando el material en el proceso, por lo que se puede realizar el corte de piezas complejas.

Como se muestra en la Sección 3.2.2. en donde se seleccionó el material MDF para realizar piezas de la estructura del brazo, material que es fácilmente manufacturable con el procedimiento de corte láser, la Figura 56 muestra el archivo en formato PDF para su corte. Los planos de cada una de las piezas se encuentran en el Anexo B.

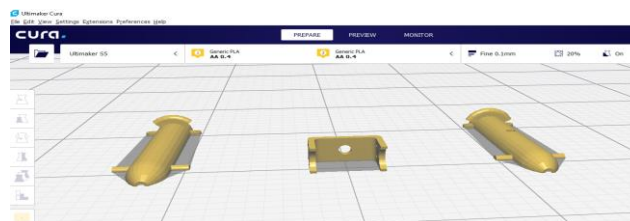


**Figura 56** Planos para el corte láser



## b. Impresión 3D

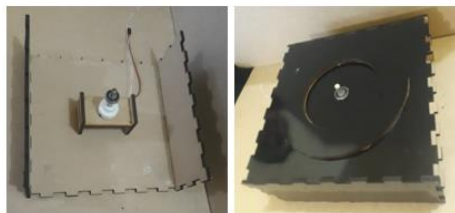
Para realizar la impresión la impresión fue necesario guardar el modelo 3D en formato STL, dicho formato es compatible con el software utilizado en la impresión 3D, Ultimaker CURA, también es importante tomar en cuenta la tolerancia que maneja la impresora 3D. La Figura 57 muestra algunas piezas que fueron realizadas mediante impresión como lo fue la parte del lápiz y la muñeca.



**Figura 57** Piezas previas para la impresión 3D

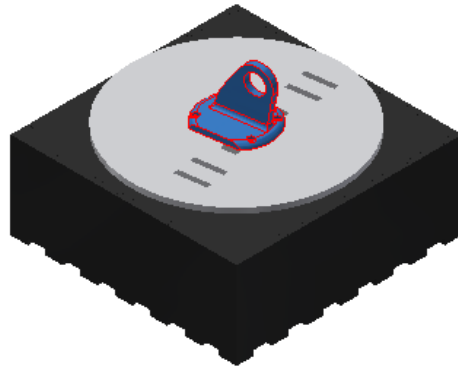
## c. Ensamblaje

El dispositivo de percepción háptica cuenta con piezas elaboradas en MDF y piezas en material ABS (por sus siglas en inglés, Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Para iniciar con el ensamblaje de las partes con MDF como la base se utilizó pega para madera, y se dejó secar por aproximadamente 5 horas, el ensamble se observa en la Figura 58.



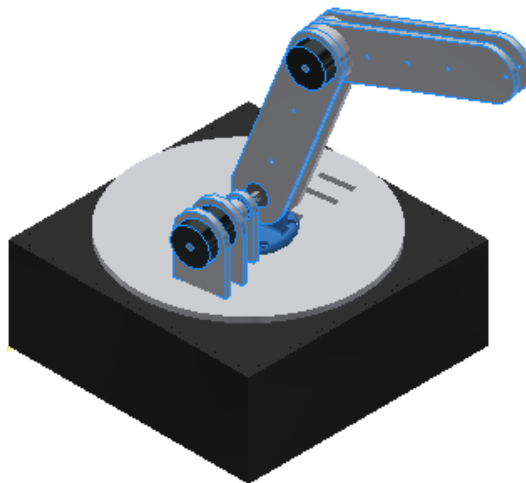
**Figura 58** Ensamblaje de la base

Seguidamente se debe colocar la base de rotación y ajustar a ella, el acople para el eslabon que se realizó con impresión 3D, por medio de pernos, como en la Figura 59.



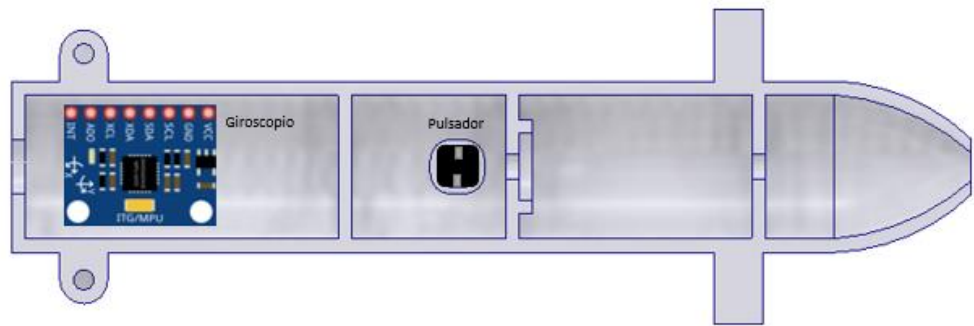
**Figura 59** Ensamble del acople con la base de rotación

Sobre la base de rotación se coloca el encoder en los soportes y se lo acopla al eje que a su vez está sujeto al eslabón, luego se coloca el segundo eslabón y encoder, para ello se utiliza pernos, el ensamble debe ser igual al expuesto en la Figura 60.

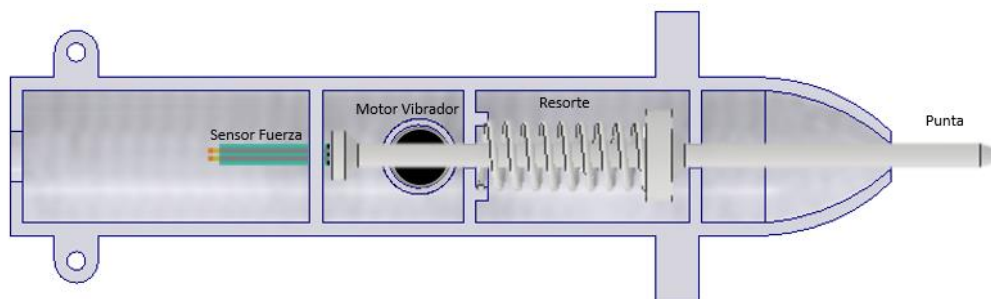


**Figura 60** Ensamble de los eslabones

El lápiz se encuentra constituido por dos partes como se muestra en la Figura 61, dentro del lápiz se encuentra el sensor giroscopio MPU6050, sensor de fuerza FSR-400, pulsador y motor vibrador, así también la punta y un resorte que funciona como amortiguador evitar que el sensor de fuerza sufra daños.



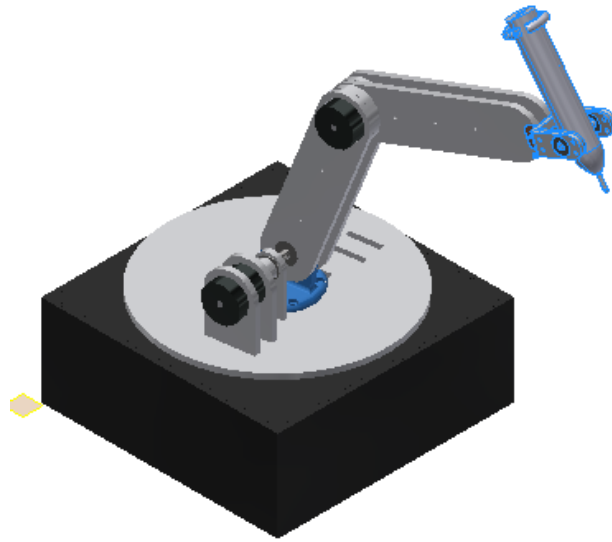
a)



b)

**Figura 61** Partes herramienta: a) Superior b) Inferior

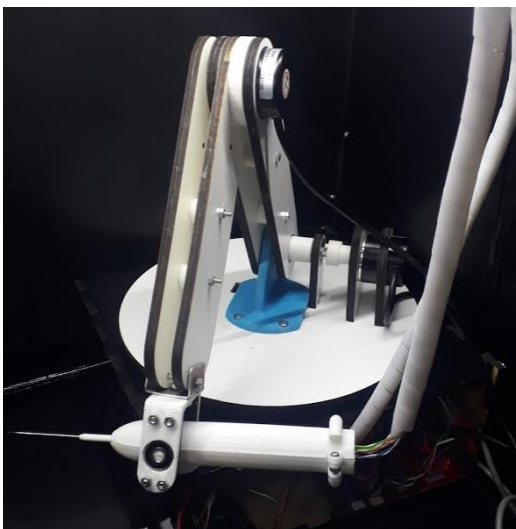
En la Figura 62 se ilustra el ensamble final del dispositivo de percepción háptica, para ello se colocó la muñeca y el lápiz, asegurándolos con pernos y rodamientos para que los movimientos sean suaves y fluidos.



**Figura 62** Ensamble final del dispositivo

### **3.6.2. Implementación total**

Implementación de cada módulo en la estación de trabajo: el módulo 2 estructura mecánica, módulo 3 sensores y actuadores, módulo 4 control y módulo 5 suministro de energía son los componentes que conforman el dispositivo de percepción háptica, este dispositivo está ubicado en la parte derecha de la estación de trabajo puesto que es diseñado para que lo utilice una persona diestra, tal como se muestra en la Figura 63.



**Figura 63** Dispositivo de percepción háptica en la estación de trabajo.

Un dispositivo (Tablet o celular) que permite interactuar con el entorno de realidad aumentada para realizar los procedimientos odontológicos.



**Figura 64** Galaxy Tab S3

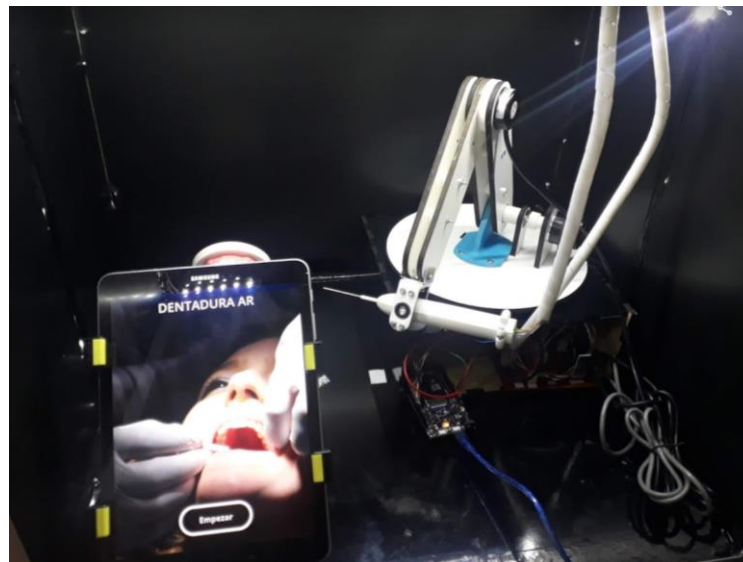
Además, tiene un fantoma dental (Figura 65), que es un modelo desmontable pedagógico con anatomía dental utilizado para el estudio y enseñanza, mismo que es

utilizado para simular la dentadura del paciente y sobre el cual se realiza la realidad aumentada.



**Figura 65** Fantoma de la mandíbula

Finalmente el módulo 1 que se refiere a la estación de trabajo hace referencia al espacio en el que se realizan las tareas, el cual posee los elementos que se observan en la Figura 66 y permite la interacción con los mismos.



**Figura 66** Ensamblaje total estación de trabajo

## CAPÍTULO IV

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ENTORNO CON RA

#### 4.1. Selección del software

##### 4.1.1. Selección del motor de juegos

Un motor de juegos es una estructura para los desarrolladores de juegos que reúne varias áreas básicas. Puede importar arte y assets en 2d y 3d, de otros tipos de softwares; ensamblar assets para formar escenas y entornos; agregar iluminación, audio, efectos especiales, física y animación, interacción y lógica de mecánica de juego; editar, depurar y optimizar el contenido para las diferentes plataformas destino. (Unity Technologies, 2019)

Los motores de juegos que se describen a continuación son los más populares en el mercado:

##### a. YOYO GAMES

Game Maker te permite implementar funciones de juego AAA sin complicaciones. Haga que sus juegos cobren vida con la física en 2D, cree una base de jugadores próspera con juegos en red multiplataforma y cree impresionantes efectos visuales utilizando sombreadores. (YoYo Games Ltd, 2013)

Las licencias que ofrece se pueden observar en la Tabla 71:

**Tabla 71**  
*Licencias que ofrece YoYo Games*

	PRUEBA	DESTOK	WEB	UWP	MÓVIL
<b>Recursos ilimitados</b>		*	*	*	*
<b>Características de expertos</b>		*	*	*	*
<b>Plataforma(s) de destino</b>	Solo PRUEBA	Windows, Mac, Ubuntu	HTML5	Microsoft UWP	Android, iOS
<b>Duración de la licencia</b>		12 meses	12 meses	12 meses	12 meses
<b>Compra mínima</b>		5 asientos	5 asientos	5 asientos	5 asientos
	Gratis	\$30 por asiento	\$50 por asiento	\$130 por asiento	\$130 por asiento

Fuente: (YoYo Games Ltd, 2013)

## b. GODOT

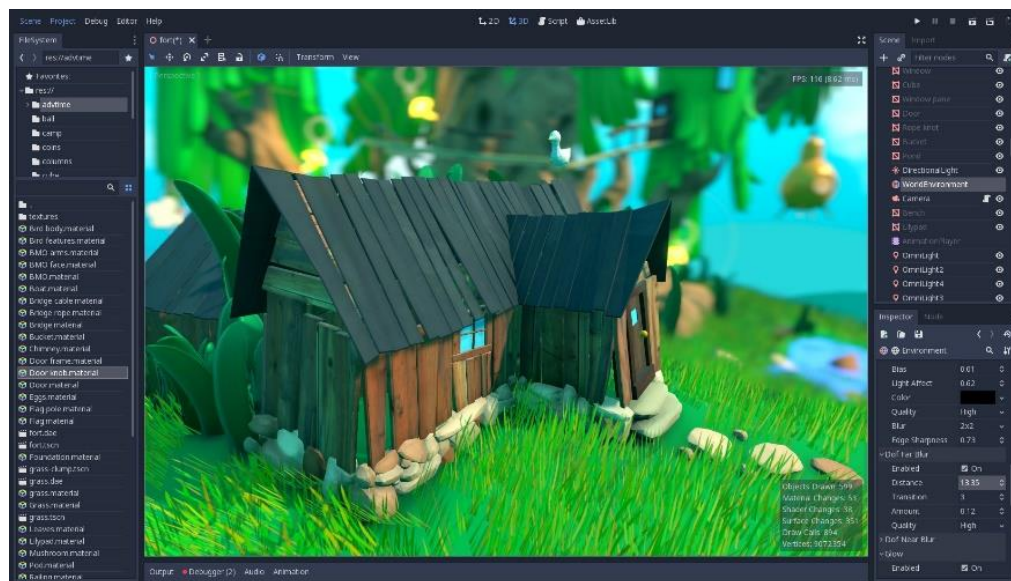
Godot proporciona un gran conjunto de herramientas comunes, por lo que puedes concentrarte en hacer tu juego sin reinventar la rueda. Godot es completamente gratuito y de código abierto bajo la licencia MIT muy permisiva. (Linietsky & Manzur, 2007)

Está diseñado desde cero para un trabajo en equipo sin problemas. Ver Figura 67.

- Uso amigable del sistema de archivos que funciona muy bien con sistemas de control de versiones como Git, Subversion, Mercurial, PlasticSCM, Perforce, lo que sea.



- La creación de instancias de escena hace que el trabajo en equipo sea una brisa. Cada miembro del equipo puede centrarse en su propia escena, ya sea un personaje, nivel, etc., y editar sin pisar los dedos de los demás.
- Formato de escena descriptivo y óptimo basado en texto.
- Sintaxis de script soportada por GitHub. (Linietsky & Manzur, 2007)

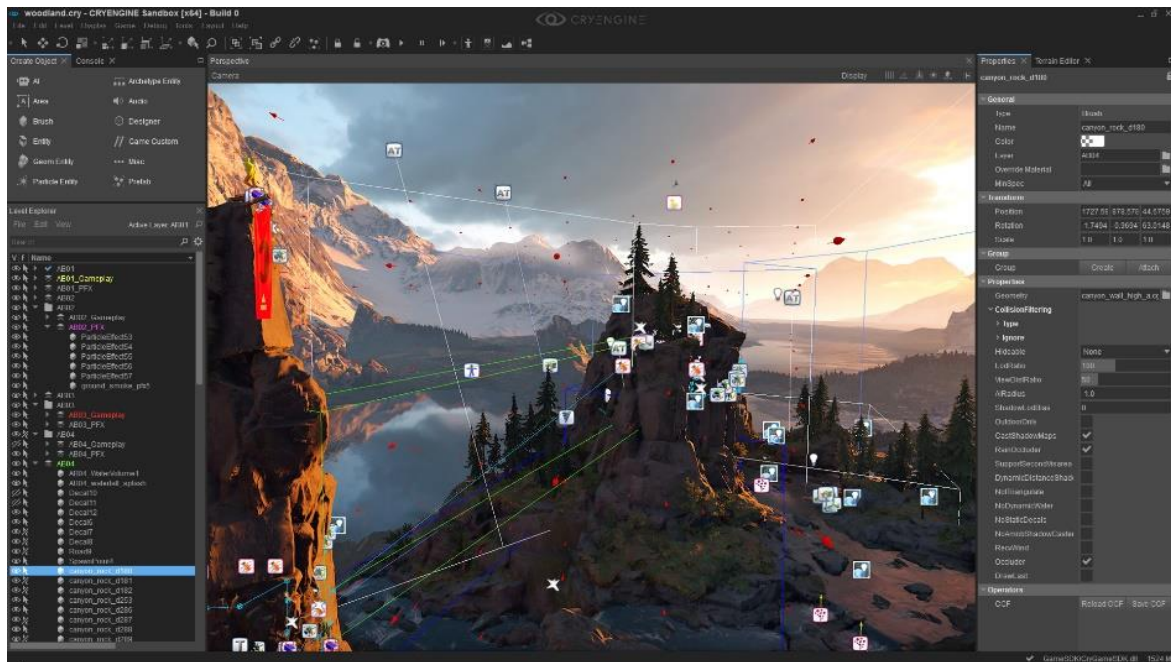


**Figura 67** Interfaz de GODOT

Fuente: (Linietsky & Manzur, 2007)

### c. CRYENGINE

Tiene como objetivo: crear el motor de juego más poderoso de la industria y darles a los creadores de todo el mundo las herramientas para aprovechar este poder para crear experiencias de entretenimiento de clase mundial, su interfaz de usuario se puede observar en la Figura 68. (CryTek GmbH, 2019)



**Figura 68** Interfaz CryEngine

Fuente: (CryTek GmbH, 2019)

#### d. UNREALENGINE

Es un conjunto de herramientas diseñadas para cumplir visiones artísticas ambiciosas, siendo lo suficientemente flexibles como para garantizar el éxito para equipos de todos los tamaños. Con un motor establecido y líder en la industria, Unreal brinda un rendimiento potente, comprobado y confiable. Es un paquete completo de productos que viene listo para la producción, sin la necesidad de complementos o compras adicionales (Figura 69). (Epic Games Inc, 2019)



**Figura 69** Interfaz Unrealengine

Fuente: (Epic Games Inc, 2019)

#### **e. UNITY**

Unity es una plataforma en tiempo real, que actualmente permite la creación de la mitad de los videojuegos producidos en el mundo, es impulsada por herramientas y servicios, ofrece muchas posibilidades para desarrolladores de juegos y creadores de distintas industrias y aplicaciones, su interfaz se muestra en la Figura 70.

Es una plataforma líder a nivel industrial que maneja alrededor de 25 plataformas, posee una tienda llamada Asset Store que permite elegir entre miles de herramientas de producción que son gratuitas o pagadas de acuerdo al creador. (Unity Technologies, 2019)



**Figura 70** Interfaz de Unity

Fuente: (Unity Technologies, 2019)

De los motores de juegos antes expuestos se realiza la comparación entre los dos principales UNREALENGINER y Unity, en la Tabla 72 se muestran las características para seleccionar el software que facilite la creación de entornos virtuales y la adaptación del dispositivo háptico:

**Tabla 72**

*Comparación entre las características de los motores de juegos*

Características	UNREALENGINE	UNITY
Tipo de licencia	Comercial	Personal, Pro y Plus
Motor	versátil	Potente

Continúa →

<b>Lenguaje de programación</b>	C++ y blueprints	C#
<b>Multi - Plataformas</b>	Medio	Alto
<b>Soporte</b>	poco	mucho
<b>Curva de aprendizaje</b>	complicada	sencilla
<b>Rendimiento PC</b>	Poco rendimiento	Mucho rendimiento
<b>Calidad gráfica</b>	Alto	Medio

Para la selección del motor de juegos se consideran los criterios de evaluación detallados en la Tabla 73 con su respectiva ponderación:

**Tabla 73**

*Ponderación de criterios de evaluación para el motor de juegos*

<b>Criterio</b>	<b>Compatibilidad</b>	<b>Multiplataforma</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Compatibilidad</b>	-	1	1	2.0	0.28
<b>Multiplataformas</b>	1	-	0.5	2.5	0.36
<b>Facilidad de uso</b>	1	0.5	-	2.5	0.36
		<b>Suma</b>		7	1

- Solución A: UnrealEngine
- Solución B: Unity

En la Tabla 74 se realiza la valoración del criterio de compatibilidad, para evaluar las alternativas de selección del motor de juegos.

**Tabla 74***Ponderación de compatibilidad para selección del motor de juegos*

Compatibilidad	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.40	1.40	0.47
<b>Solución B</b>	0.60	-	1.60	0.53
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 75 se realiza la valoración del criterio de tamaño, para evaluar las alternativas de selección del motor de juegos.

**Tabla 75***Ponderación de multiplataforma para selección del motor de juegos*

Multiplataforma	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0.3	1.30	0.43
Solución B	0.7	-	1.70	0.57
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 76 se realiza la valoración del criterio de facilidad de uso, para evaluar las alternativas de selección del motor de juegos.

**Tabla 76***Ponderación de facilidad de uso para selección del motor de juegos*

Facilidad de uso	Solución A	Solución B	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0.4	1.40	0.47
<b>Solución B</b>	0.6	-	1.60	0.53
		<b>Suma</b>	3	1

En la Tabla 77 se realiza la valoración de todos los criterios de evaluación con cada alternativa de solución.

**Tabla 77**  
*Selección de la alternativa del motor de juego*

	Compatibilidad	Multiplataformas	Facilidad de uso	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución A</b>	0.13	0.16	0.17	0.46	2
<b>Solución B</b>	0.15	0.21	0.19	0.55	1

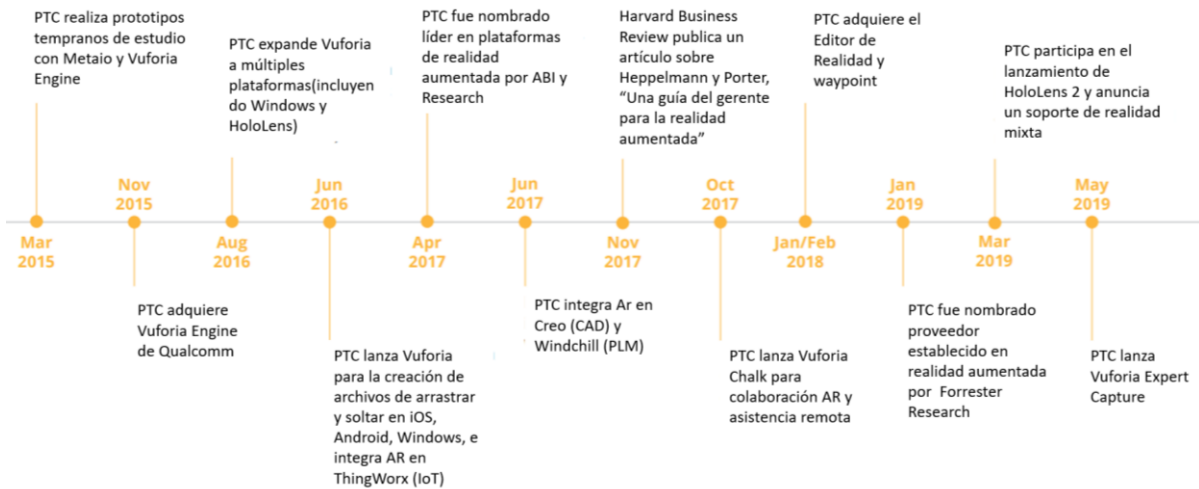
De acuerdo con la Tabla 77 la alternativa ideal para el motor de juegos es Unity ya que por su facilidad de uso y la integración de multiplataformas cumple con los requerimientos solicitados.

#### 4.1.2. Selección del software para realidad aumentada

El software para la parte de la realidad aumentada es Vuforia Engine la plataforma de AR que es un kit de desarrollo (SDK) orientado a la realidad aumentada para el motor de videojuegos Unity. Es muy reconocido mundialmente debido a su mejor tecnología de visión por computador, sus capacidades de rastreo robustas y un aliento de soporte de plataforma.

Es el software más utilizado para dispositivos de mano y gafas digitales disponibles en la actualidad. Con más de 600k de desarrolladores registrados y cientos de clientes empresariales globales líderes, ninguna otra tecnología se utiliza en más aplicaciones para brindar el poder de la realidad aumentada. (PTC, 2019)

La evolución de Vuforia se puede observar en la Figura 71, como línea de tiempo.



**Figura 71** Evolución de Vuforia Engine

Fuente: (PTC, 2019)

La Tabla 78 muestra las características del uso de Unity 3D y Vuforia.

**Tabla 78**  
*Características de Vuforia Engine*

Unity 3D + Características	
Vuforia	Interfaz de fácil uso
	Múltiples plataformas móviles y PC
	Permite realizar juegos y aplicaciones con elementos virtuales 3D
	Lenguaje de programación: JavaScript y C#.
	Alto costo computacional
	Permite reconocimiento de textos e imágenes.

Continúa



---

Rastreo robusto (el objeto rastreado no se pierde tan fácilmente, incluso n movimiento)

---

Detección y rastreo simultáneo de targets.

---

Detección rápida de targets (objetivos).

---

### **Software ARCore**

ARCore es la plataforma de Google se aplica para crear aplicaciones con realidad aumentada. Utiliza diferentes API, ARCore hace posible que su teléfono sienta su entorno, es decir entienda el mundo e interactúe con la información. ARCore usa tres capacidades clave para integrar contenido virtual con el mundo real como se ve a través de la cámara de su teléfono:

- El seguimiento de movimiento permite que el teléfono entienda y rastree su posición en relación con el mundo.
- La comprensión ambiental permite que el teléfono detecte el tamaño y la ubicación de todo tipo de superficies: horizontales, verticales y n ángulo, como el suelo, una mesa de centro o paredes.
- La estimación de la luz permite al teléfono estimar las condiciones de iluminación actuales del entorno. (ARCore, 2019)

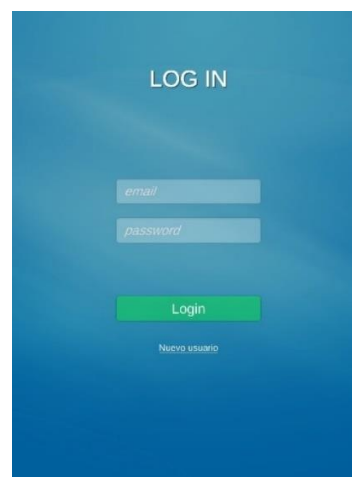
### **4.2. Diseño de interfaces**

La pantalla principal muestra datos significativos como el nombre de la universidad, la carrera, el tema y el botón de empezar como se observa en la Figura 72.




**Figura 72** Pantalla principal de la app

La segunda pantalla presenta el login in en donde hay que ingresar los datos solicitados como email y password como se observa en la Figura 73, en el caso que los datos ingresados sean erróneos tiene un identificador que emitirá un mensaje.



**Figura 73** Pantalla de log in

Por otra parte, si es la primera vez que va a ingresar debe seleccionar la opción de nuevo usuario ubicado en la pantalla de log in de la Figura 73 para poder registrarse.



The image shows a registration form on a blue background. At the top, the word "REGISTRO" is written in white capital letters. Below it are four light blue input fields, each with a label in italics: "Nombre", "Apellido", "E-mail", and "Password". At the bottom of the form is a dark blue button with the word "Registrar" in white text.

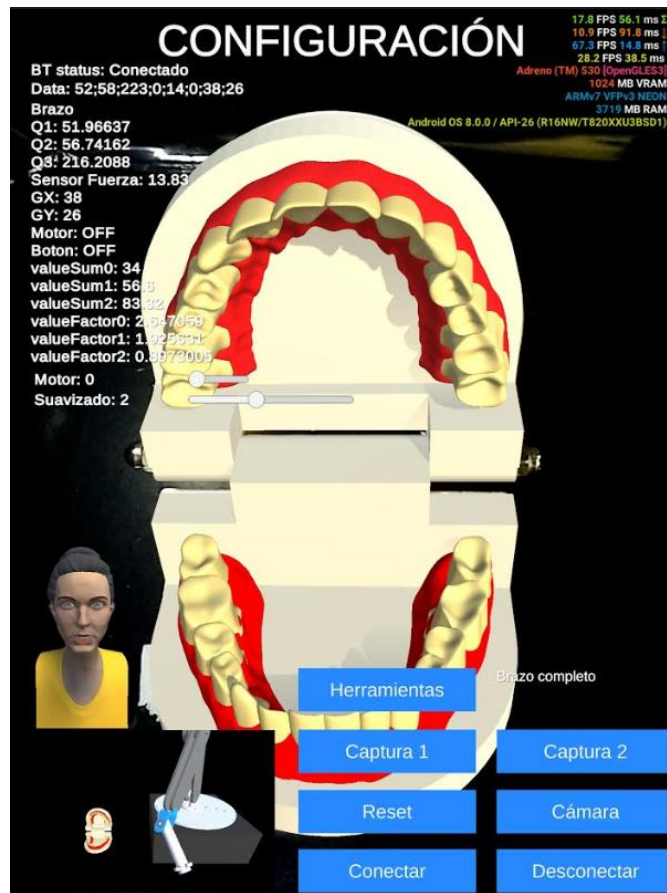
**Figura 74** Pantalla de registro

La siguiente pantalla denominada de tareas muestra en opciones los 3 procedimientos odontológicos que puede realizar, al momento de escoger uno de ellos se expone una breve descripción del procedimiento y luego se escoge entre realizar la tarea o resultados para conocer la calificación obtenida, tal como se observa en la Figura 75.



**Figura 75** Pantalla de la tarea 1 – Exploración

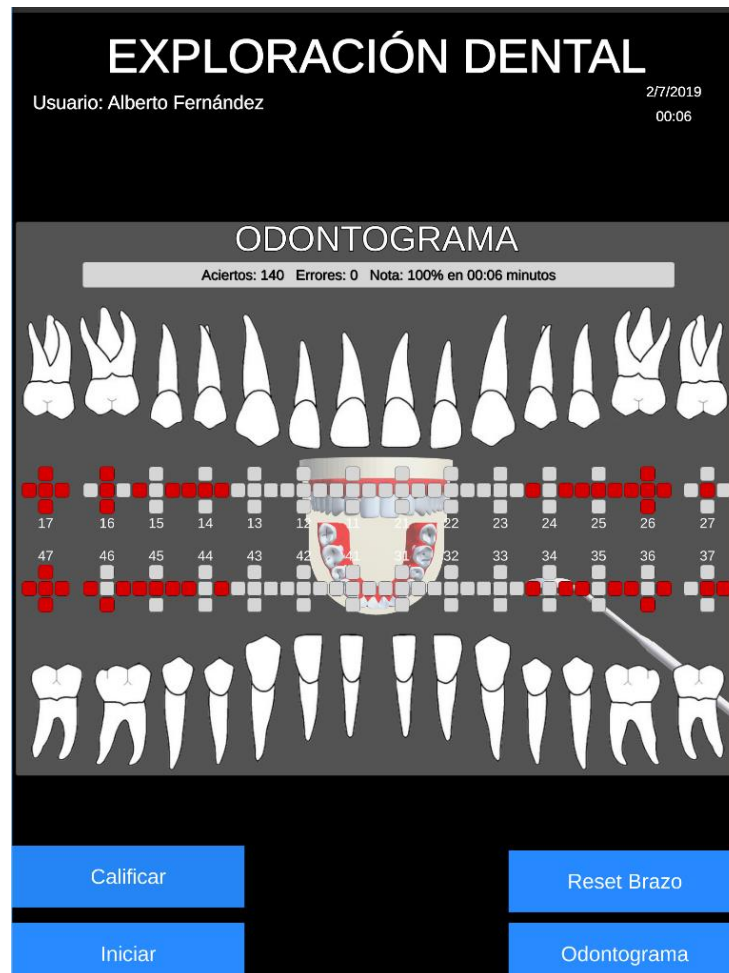
En el botón conexión ubicado en la parte inferior de pantalla de tareas de la Figura 75 se realiza la configuración de la conexión de bluetooth seleccionando en botón conectar hasta recibir el mensaje en el status que diga conectado y recibiendo datos como se muestra en la Figura 76.



**Figura 76** Pantalla de configuración de la app

En la pantalla de configuración de la Figura 76, se debe seguir una serie de pasos para realizar la configuración, mismos que se detallan en el Manual de Usuario ubicado en el Anexo B. En esta pantalla se puede observar el correcto envío de datos en la parte superior izquierda.

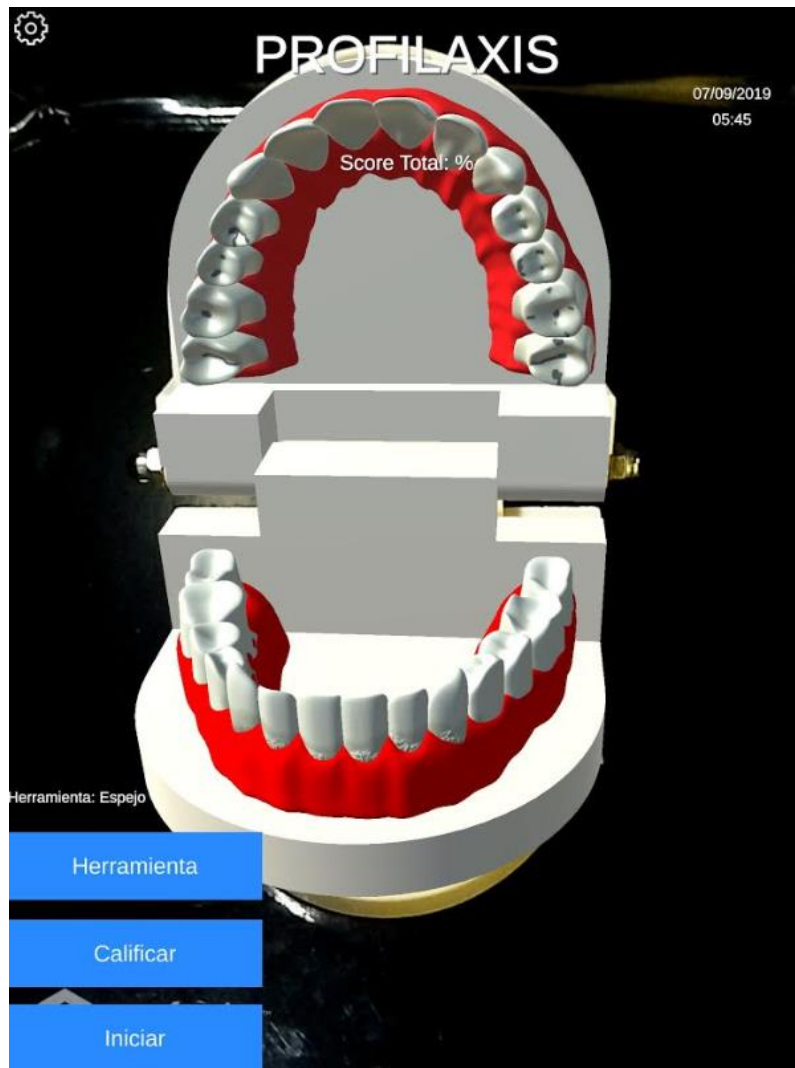
En la pantalla de la Tarea 1 se encuentra la exploración dental en donde aparecen el espejo y el odontograma para registrar cada uno de los hallazgos y de acuerdo al tiempo, a los errores y a los aciertos cometidos se indicará la calificación final obtenida, misma que se registrará en la base de datos creada para el proyecto (Figura 77).



**Figura 77** Pantalla de Exploración.

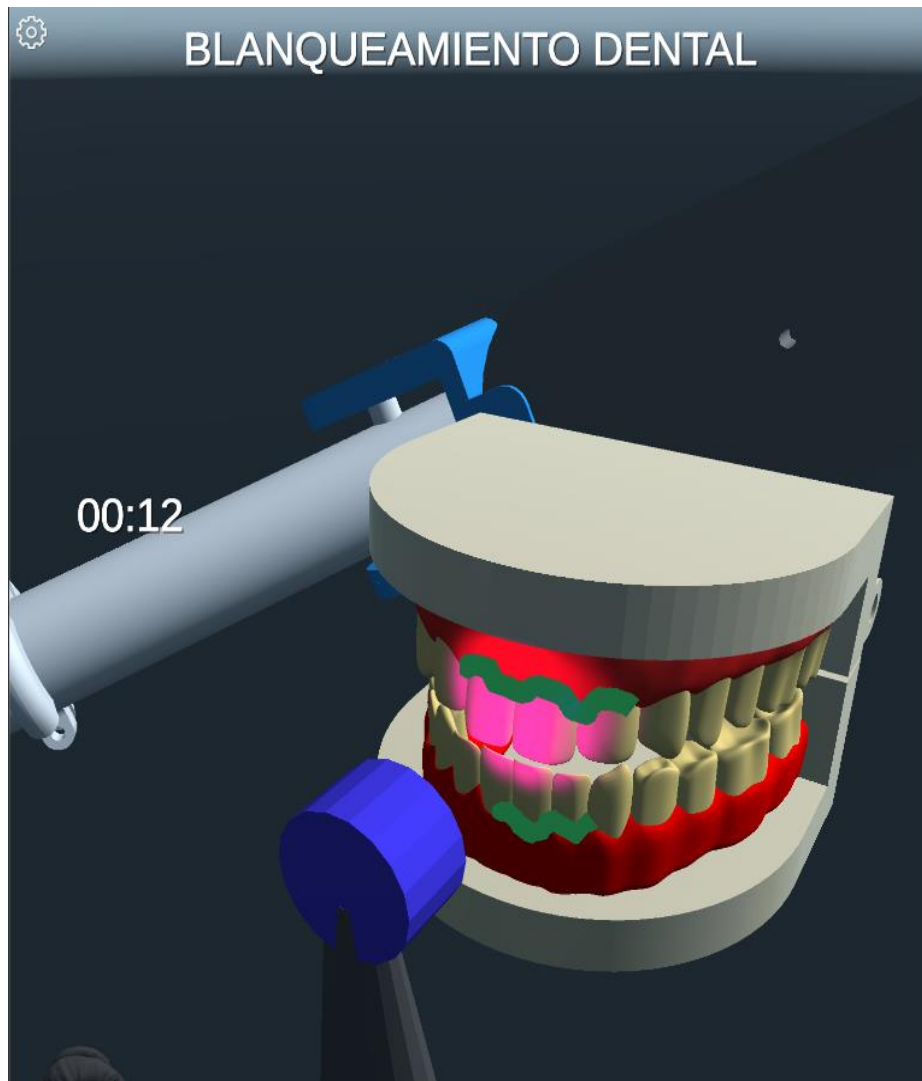
Para llenar el odontograma se debe presionar sobre la posición indicada, si se presiona una vez el cuadro se pinta de azul, lo cual indica que es una amalgama, y si se presiona dos veces el cuadro se pinta de color rojo, indicando que es una carie.

En la pantalla de la Tarea 2 se encuentra la profilaxis dental en donde aparecen el espejo, cepillo robinson, pinzas periodontales y de acuerdo al tiempo, se indicará la calificación final obtenida, misma que se registrará en la base de datos creada para el proyecto (Figura 78).



**Figura 78** Profilaxis dental semiprofunda

En la pantalla de la Tarea 3 se encuentra el blanqueamiento dental en donde aparecen el dosificador, la luz alógena, absorbedor y de acuerdo al tiempo, a los errores y a los aciertos cometidos se indicará la calificación final obtenida, misma que se registrará en la base de datos creada para el proyecto (Figura 79).

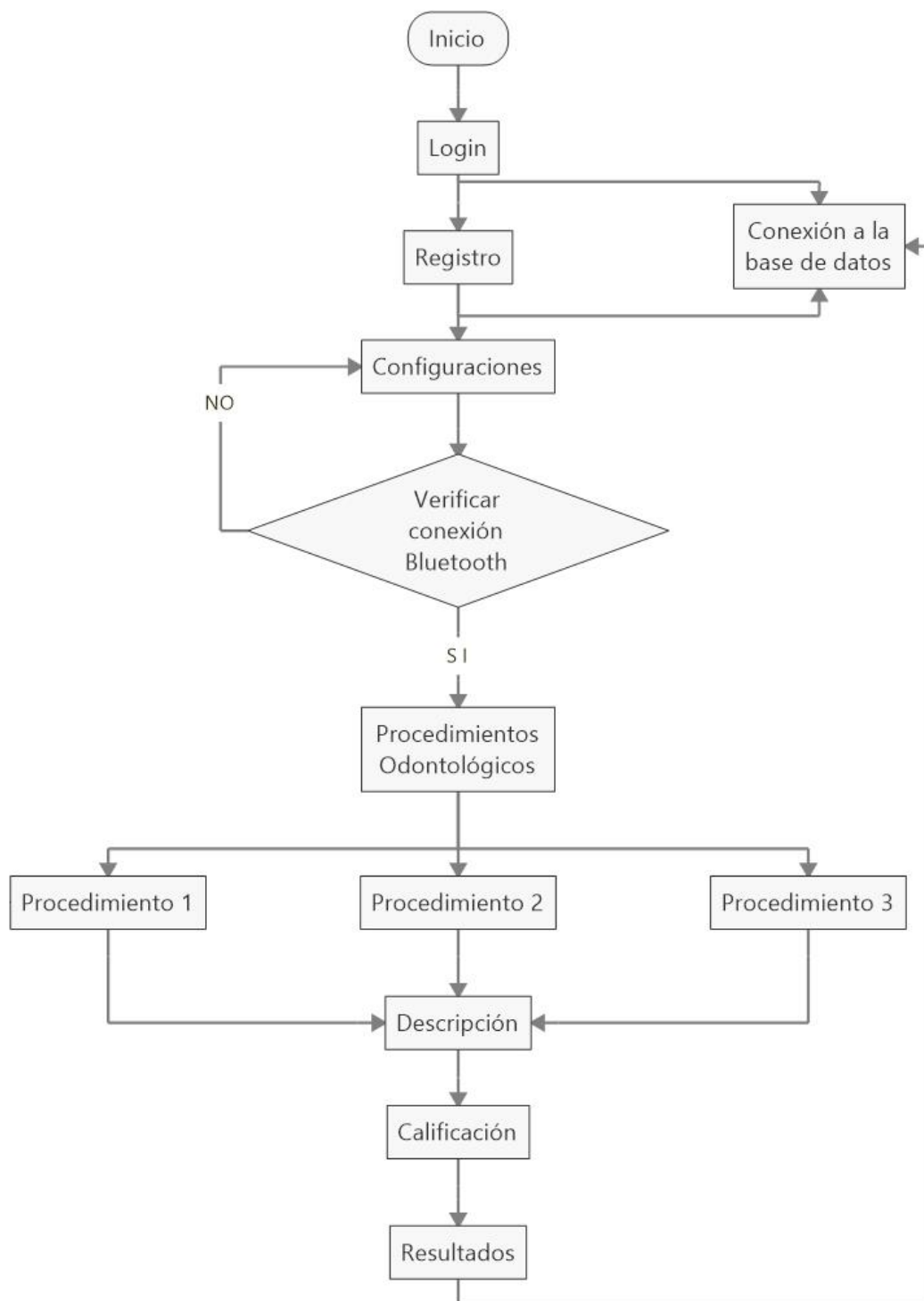


**Figura 79** Blanqueamiento dental

#### **4.3. Diagramas de flujo de la programación**

La aplicación permite al usuario mejorar sus habilidades en tres procedimientos odontológicos específicos: exploración, limpieza dental semiprofunda y blanqueamiento dental, su funcionamiento se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 80.





**Figura 80** Diagrama de flujo del funcionamiento de la app

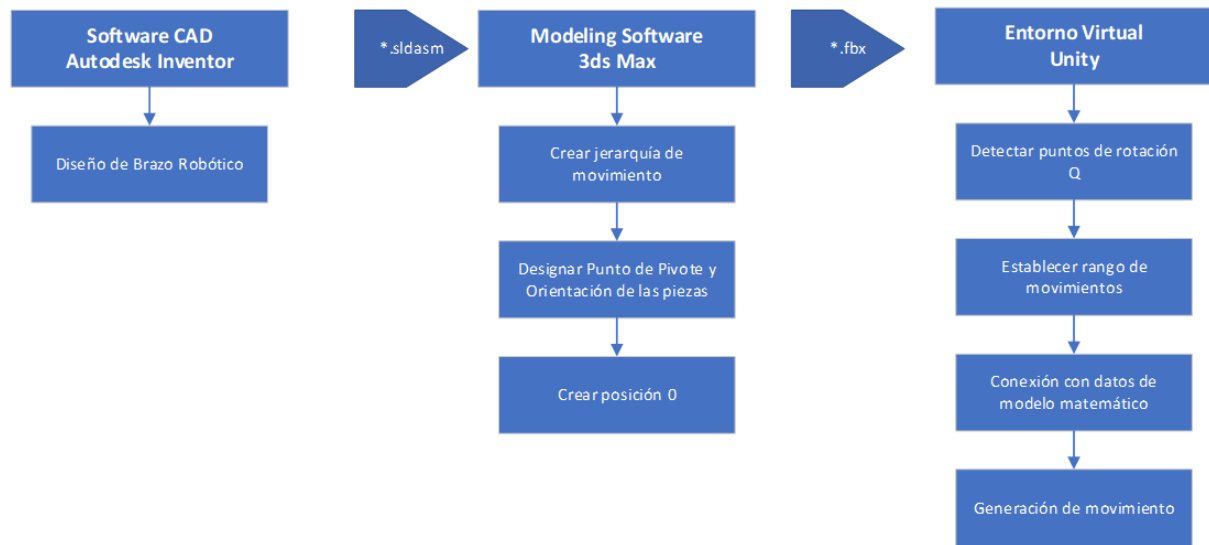
La aplicación empieza con una pantalla de presentación la cual contiene un botón que permite acceder a la pantalla login en donde se debe iniciar la sesión con los datos del usuario registrado, y en el caso de no contar con datos registrados, se puede crear un nuevo usuario con la función Registro presente en las opciones de login.

Cuenta con un apartado denominado configuraciones en donde se comprueba la conexión bluetooth con el módulo de la práctica.

Al momento de ingresar en el menú de procedimientos odontológicos se visualizan los tres procedimientos, en donde cada uno cuenta con una breve descripción del procedimiento, además de dos botones: empezar a realizar la tarea y el botón de calificación y finalmente el apartado de resultados en donde se puede observar los resultados de la actividad para el usuario actual, mismos que serán almacenados en la base de datos online creada para la aplicación.

### **Brazo robótico en entornos virtuales**

El brazo robótico del sistema háptico fue diseñado utilizando un software CAD 3D, para agilizar estas tareas se utilizó software CAD. El brazo robótico del entorno del software no se puede usar directamente en el entorno de Unity para programarlo como herramienta en las tareas de entrenamiento de la aplicación. Por dicha razón se debe pasar por un proceso de transformación de formato y modificación de propiedades del modelo 3D por medio del uso del software 3D, hasta lograr un modelo totalmente manipulable en el entorno de Unity, estas fases de modificaciones se muestran en el diagrama a continuación (Figura 81).



**Figura 81** Proceso de transformación de modelo CAD

En primera instancia se tiene al software CAD en el cual se construye el modelo del brazo robótico, el formato en el que se exporta para la siguiente fase de desarrollo es \*.iam

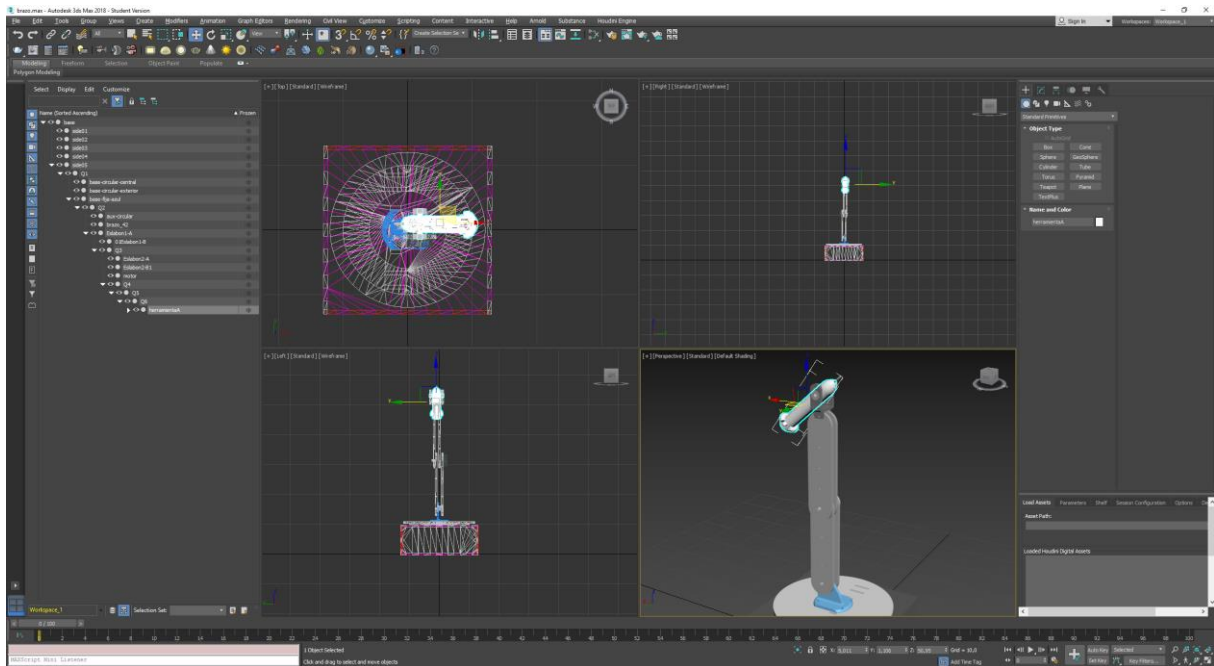
La siguiente fase empieza por importar el modelo del brazo robótico al software de modelado 3ds Max, al momento de la importación es posible que las piezas que componen al objeto se encuentren en un orden alfabético que no coincide con el sistema de organización creada en el software CAD además por la naturaleza de movimiento de un brazo robótico mediante puntos de rotación se hace evidente la necesidad de agrupar las piezas en una jerarquía que permita el movimiento libre del brazo robótico. Entonces se empieza por identificar los puntos de rotación o Q y en base a ellos se realiza la jerarquía de piezas.

Para comprobar que cada punto de rotación funcione adecuadamente es necesario asignar el punto pivote al punto de rotación y orientar la pieza a coordenadas locales. Por último, se modifica la posición del brazo a una posición 0 en la cual todos los puntos de rotación tengan un valor de 0. Posición referencial a partir de la cual se generará el movimiento en los puntos de rotación. Por último, se exporta el modelo en formato \*.fbx para que sea compatible con el entorno de Unity.

Como tercera y última fase se tiene el trabajo que se realizará en el entorno de Unity en el que se importará el modelo en formato \*.fbx proveniente de 3ds Max. La primera acción es detectar los puntos de rotación o Q previamente realizados en el software de modelado, se realiza movimientos de prueba desde el panel transform del inspector con el objetivo de establecer un rango de movimiento en el que no existe conflicto con otras piezas que conforman el modelo 3d del brazo.

Inmediatamente se realiza la conexión con el modelo matemático del brazo previamente programado en un Script en C#. este modelo proveerá la posición correcta del modelo virtual en función a la posición real del brazo en el módulo de pruebas.

Finalmente, mediante un script que controla los límites de rotación y asigna los valores del modelo matemático a cada punto del modelo 3d, se genera la animación de movimiento del dispositivo que se usa en las tareas de entrenamiento.



**Figura 82** Modelo del brazo en software compatible con Unity

## Base de datos

En la tabla de usuarios se guardan los campos imprescindibles de información del usuario como nombre, apellido, email, password y nivel de usuario en los que se puede elegir entre estudiante y profesor. Para el módulo de login se usan únicamente los campos email y password para los cuales se cuenta con un sistema que verifica que el email ingresado sea único en la tabla.



**Figura 83** Almacenamiento de datos de usuario

En la tabla de tareas se ha realizado una tabla para cada tarea con el fin de agilizar la consulta SQL al momento de guardar y mostrar los resultados históricos por usuario. Los campos utilizados son: usuarioID, para identificar al usuario que realizó la tarea, tiempo, duración de tiempo para completar la tarea, dificultad, el modo en el cual se

ejecutó la tarea (fácil, evaluación), fecha, día y hora en el que se realizó la prueba, calificación, nota que asigna el sistema a la tarea realizada. El acceso a esta tabla se estableció al usuario estudiantes y profesor.

Para la configuración de detalles de cada tarea se han utilizado la tabla tarea config en la cual se detalla el nivel de dificultad y el tiempo establecido para realizar la tarea en dicha dificultad. Este campo lo utiliza el algoritmo para asignar la calificación correspondiente a la tarea realizada. Además, se cuenta con el campo descripción en el cual se puede añadir una corta frase acerca de la tarea y la dificultad seleccionada. El acceso a esta tabla está restringido al usuario profesor y/o admin de la plataforma debido a que los cambios producen resultados sustanciales en el rendimiento del estudiante al realizar cada tarea.

#### **4.4 Implementación del simulador con RA**

En el diseño de las actividades fue necesario documentar los elementos que intervienen, así como como el procedimiento a realizar, con el fin de facilitar la interacción con el entorno de realidad aumentada. En la Tabla 79, Tabla 80 y Tabla 81 se detalló los aspectos básicos que se debe conocer de la tarea de exploración, profilaxis semiprofunda y blanqueamiento dental, respectivamente.

*Tabla 79*  
*Tarea 1: procedimiento de Exploración.*

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Procedimiento</b>	El dispositivo de percepción háptica captura el movimiento realizado, mismo que se traduce en el movimiento dentro del entorno de realidad aumentada, controlando los instrumentos.
<b>Objetivos</b>	Realizar la exploración y llenar el odontograma según corresponda.
<b>Reglas</b>	Mediante realidad aumentada aparecerán 3 modelos de caries sobre el fantoma de forma aleatoria.  Deberá marcar en el odontograma las posiciones que se encuentran con caries.
<b>Recursos</b>	Dispositivo de percepción háptica.  Estación de trabajo.  Ambiente de realidad aumentada.  Espejo de exploración.  Odontograma.



Tabla 80

Tarea 2: procedimiento de Limpieza o Profilaxis Semiprofunda.

Elemento	Descripción
<b>Procedimiento</b>	El dispositivo de percepción háptica captura el movimiento realizado, mismo se traduce dentro del ambiente con realidad aumentada, controlando los instrumentos.
<b>Objetivos</b>	Realizar la limpieza semi profunda de las caries o hallazgos hasta que las mismas desaparezcan.
<b>Reglas</b>	<p>Se evaluará si ha logrado limpiar todas las caries o sarro.</p> <p>En caso de aplicar fuerza excesiva tendrá una retroalimentación háptica.</p> <p>Tendrá una calificación sobre 100 puntos.</p>
<b>Recursos</b>	<p>Dispositivo de percepción háptica.</p> <p>Estación de trabajo.</p> <p>Ambiente de realidad aumentada.</p> <p>Espejo</p> <p>Cepillo Robinson</p> <p>Pinzas</p> <p>Cavitrón</p>

**Tabla 81***Tarea 3: procedimiento de Blanqueamiento.*

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Procedimiento</b>	El dispositivo de percepción háptica captura el movimiento realizado, mismo que se traduce en el ambiente con realidad aumentada, controlando instrumentos.
<b>Objetivos</b>	Realizar el blanqueamiento dental.
<b>Reglas</b>	Usar de forma correcta los recursos.  Aplicar los aditamentos durante el tiempo adecuado y luego retirar.
<b>Recursos</b>	Dispositivo de percepción háptica.  Estación de trabajo.  Ambiente de realidad aumentada.  Dosificador con gel aislante  Dosificador con gel peróxido  Luz alógena  Aspirador

En el Anexo C se encuentra el manual de usuario mismo que contiene información como requisitos para el uso, partes importantes, encendido y conexión, explicación a detalle del funcionamiento de cada tarea y descripción de los botones de la aplicación.

## **CAPÍTULO V**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

En este capítulo se realizan las respectivas pruebas que permiten validar el adecuado funcionamiento del sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada.

Las pruebas se realizaron a estudiantes de odontología en las cuales las autoras realizan la validación de los requerimientos de diseño para un correcto funcionamiento, los estudiantes además realizan un test para conocer el grado de usabilidad del sistema, finalmente a través de los datos registrados en la base de datos del sistema se analiza la evolución de los estudiantes al realizar las actividades odontológicas escogidas.

#### **5.1. Valoración médica del sistema de mecatrónico de percepción háptica con RA**

El presente proyecto está relacionado con el área odontológica ya que busca mejorar las habilidades en los estudiantes que en un futuro serán odontólogos, para lo cual se ha acudido a la Dra. Sonia Viteri Odontóloga.

Durante el desarrollo del sistema mecatrónico con percepción háptica y realidad aumentada se realizó conversatorios para adaptar las sugerencias de la especialista en base a su experiencia y finalmente se realizó las respectivas pruebas de funcionamiento, ejecutando cada uno de los procedimientos disponibles en el simulador y obteniendo una valoración positiva del sistema mencionado mismo que sirve para mejorar el proceso de aprendizaje de los estudiantes de Odontología en las diferentes universidades de la zona centro del país.

## 5.2. Evaluación con estudiantes de odontología

Las pruebas se realizaron con estudiantes de odontología de diferentes universidades de la zona centro del país, son tres estudiantes que se seleccionaron de acuerdo a los parámetros de inclusión y exclusión que se detallan a continuación.

### 5.2.1. Criterios de inclusión

- Estudiantes de la carrera de odontología.
- Estudiantes hombres y mujeres de los primeros semestres de la carrera.
- Estudiantes que tengan disposición de participar.

### 5.2.2. Criterios de exclusión

- Estudiantes de otras carreras.
- Estudiantes con escaso conocimiento sobre las actividades.

### 5.2.3. Valoración del sistema con estudiantes

Los estudiantes seleccionados cumplen con los parámetros de inclusión y exclusión por lo cual se consideran aptos para participar en el presente trabajo de investigación.

En la Tabla 82 se detallan los datos de los estudiantes seleccionados.

**Tabla 82**  
*Información de estudiantes seleccionados*

Nombre	Universidad	Semestre
Mayra Alejandra Jácome Torres	UNACH	Cuarto
Anderson David Jácome Torres	UNIANDES	Tercero
Diego Mauricio Illescas Fierro	UNACH	Segundo

Los estudiantes reciben las materias detalladas a continuación.

**Estudiante 1:** Srta. Mayra Jácome

La señorita Mayra Alejandra Jácome Torres es estudiante de cuarto semestre de la carrera de Odontología de la Universidad Nacional de Chimborazo - UNACH, actualmente recibe las materias de estomatología comunitaria, prótesis, cariología, patología oral, ética odontológica.

**Estudiante 2:** Sr. Anderson Jácome

El señor Anderson David Jácome Torres es estudiante de tercer semestre de la carrera de Odontología de la Universidad Autónoma de los Andes - UNIANDES, actualmente recibe las materias de histología II, microbiología general, bioquímica, bioseguridad, biomateriales dentales II y salud pública.

**Estudiante 3:** Srta. Vanessa Torres

El señor Daniel Illescas es estudiante de segundo semestre perteneciente a la carrera de Odontología de la Universidad Nacional de Chimborazo - UNACH, actualmente recibe las materias de bioquímica, embriología, biofísica, anatomía, histología.

Los estudiantes realizaron las pruebas en tres días y en cada sesión ejecutaron el simulador dos veces, todos los datos de evaluación son registrados automáticamente en la base de datos del sistema.

Para el análisis se han construido tablas con la información obtenida, además de un diagrama de barras con los promedios de las repeticiones realizadas en cada sesión, mismo que permiten observar de forma clara y precisa los avances que ha desarrollado

cada estudiante gracias al uso del sistema mecatrónico de percepción háptica y realidad aumentada.

### **Procedimiento 1** - Exploración y visualización dental

Este procedimiento tiene como objetivo que el estudiante llene correctamente el odontograma reconociendo cada uno de los hallazgos, las caries aparecen de manera aleatoria y la calificación se realiza en base al tiempo y a los aciertos obtenidos, mismos que se registran en la base de datos de manera automática.

- **Estudiante 1:**

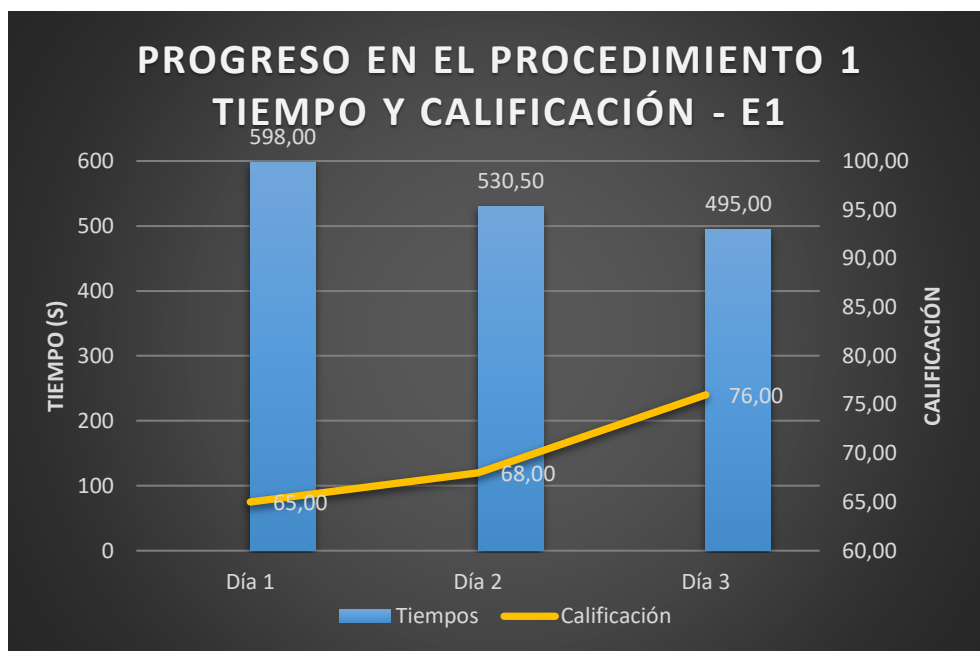
En la Tabla 83 se expone la información obtenida del estudiante 1 en el procedimiento de exploración y visualización dental.

**Tabla 83**  
*Avances del estudiante 1 en el procedimiento 1*

<b>Estudiante 1</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Promedio Tiempo</b>	<b>Nota</b>	<b>Promedio Nota</b>
<b>Día 1</b>	1	631		60	
	2	565	598,00	74	67,00
<b>Día 2</b>	1	575		65	
	2	486	530,50	71	68,00
<b>Día 3</b>	1	508		85	
	2	482	495,00	67	76,00

Los parámetros establecidos para el seguimiento que tiene el estudiante en este procedimiento es el tiempo en el cual realiza la tarea y el número de aciertos.

En la Figura 84 se observa la tendencia en tiempo que presenta el estudiante con el uso del simulador en el primer procedimiento, en el primer día obtuvo 598 segundos y finalmente obtuvo 495 segundos, presentando un avance descendente que significa que realizó el procedimiento cada vez en menos tiempo debido a que el estudiante se adaptó al uso del simulador.



**Figura 84** Resultados Tarea 1- Estudiante 1

Mientras que el gráfico amarillo de la Figura 84 representa la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 65 puntos y al final un promedio de 76 puntos, lo que indica una mejora en su aprendizaje.

**Estudiante 2:**

En la Tabla 84 se expone la información obtenida del estudiante 2 en el procedimiento de exploración y visualización dental.

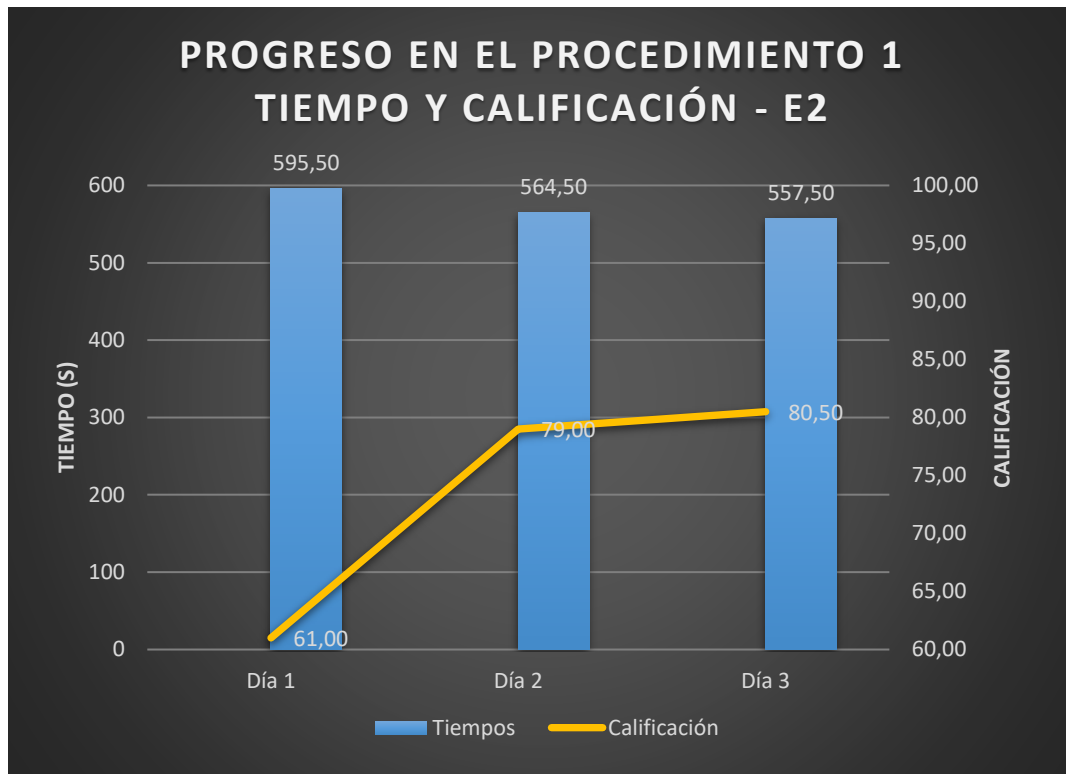
**Tabla 84**

*Avances del estudiante 2 en el procedimiento 1*

Estudiante 2	Repeticiones	Tiempo	Promedio Tiempo	Nota	Promedio Nota
<b>Día 1</b>	1	623		63	
	2	568	595,50	59	61,00
<b>Día 2</b>	1	550		82	
	2	579	564,50	76	79,00
<b>Día 3</b>	1	602		78	
	2	513	557,5	83	80,5

En el diagrama de barras de la Figura 85 se observa la tendencia en tiempo que le tomo al estudiante realizar el procedimiento 1, el primer día obtuvo 595,5 segundos y finalmente obtuvo 557,50 segundos presentando un avance descendente que significa que realizó el procedimiento cada vez en menos tiempo ya que por el uso el estudiante se adaptó.





**Figura 85** Progreso Tarea 1-Estudiante 2

Mientras que el gráfico de color amarillo de la Figura 85 muestra la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 61 puntos y al final un promedio de 80, 50 puntos lo que indica una mejora en su aprendizaje.

### **Estudiante 3:**

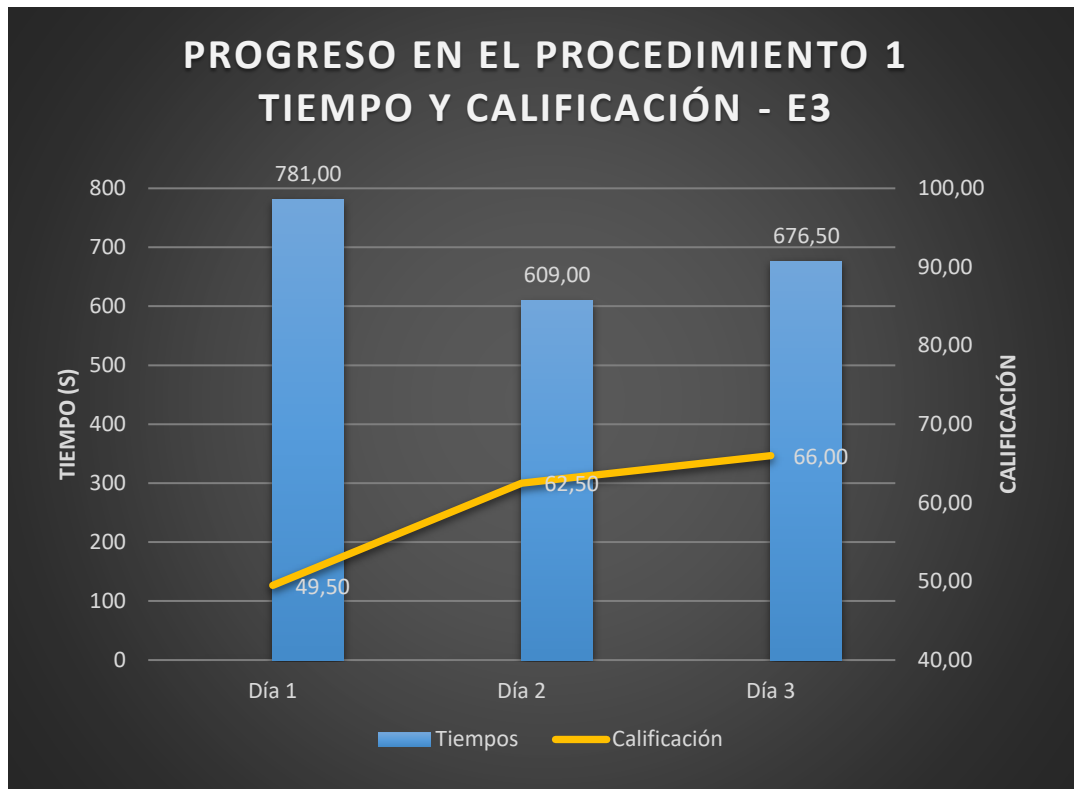
En la Tabla 85 se expone la información obtenida del estudiante 3 en el procedimiento de exploración y visualización dental.

**Tabla 85**  
*Avances del estudiante 3 en el procedimiento 1*

<b>Estudiante 3</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Promedio Tiempo</b>	<b>Nota</b>	<b>Promedio Nota</b>
<b>Día 1</b>	1	832		42	
	2	730	781,00	57	49,50
<b>Día 2</b>	1	630		53	
	2	588	609,00	72	62,50
<b>Día 3</b>	1	619		68	
	2	734	876,5	64	66,00

Los parámetros establecidos para el seguimiento que tiene el estudiante en este procedimiento es el tiempo en el cual realiza la tarea.

En el diagrama de barras de la Figura 86 se observa la tendencia en tiempo que presenta el estudiante con el uso del simulador en el primer procedimiento, ya que el primer día obtuvo 781 segundos y finalmente obtuvo 876 segundos presentando un avance ascendente lo cual indica que no se adaptó al uso del simulador o que se le dificultó cumplir con la actividad debido a la poca familiarización con el uso odontograma.



**Figura 86** Progreso Tarea 1-Estudiante 3

Mientras que la línea amarilla de la Figura 86 representa la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 49,5 puntos y al final un promedio de 66 puntos, lo que indica una mejora en su aprendizaje.

### **Procedimiento 2 – Profilaxis dental**

El objetivo de este procedimiento es eliminar la placa bacteriana ubicada sobre la boca, ya que la placa bacteriana es la principal causa de caries dental, si no se remueve se acumula en la base del diente. El simulador emite un estímulo vibratorio al momento

de aplicar demasiada fuerza sobre la dentadura, mientras que los datos del paciente, el tiempo y la calificación se almacenan automáticamente en la base de datos del sistema.

### **Estudiante 1:**

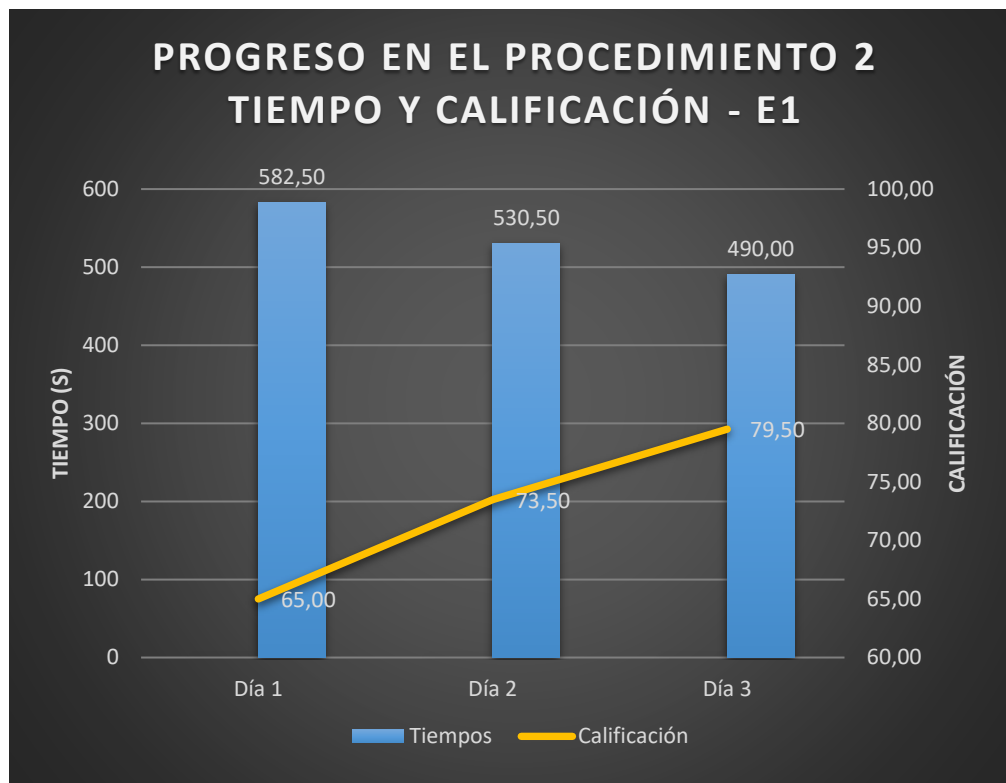
En la Tabla 86 se expone la información obtenida del estudiante 1 en el procedimiento de profilaxis dental.

**Tabla 86**  
*Avances del estudiante 1 en el procedimiento 2*

<b>Estudiante 1</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Promedio Tiempo</b>	<b>Nota</b>	<b>Promedio Nota</b>
<b>Día 1</b>	1	600		60	
	2	565	582,5	70	65,00
<b>Día 2</b>	1	575		65	
	2	486	530,5	82	73,50
<b>Día 3</b>	1	500		75	
	2	480	490,0	84	79,50

Los parámetros establecidos para el seguimiento que tiene el estudiante en este procedimiento es el tiempo en el cual realiza la tarea y la calificación obtenida.

En el diagrama de barras de la Figura 87 se observa la tendencia en tiempo que presenta el estudiante con el uso del simulador en el segundo procedimiento, ya que el primer día obtuvo 582,5 segundos y finalmente obtuvo 490 segundos, presentando un avance descendente que significa que realizó el procedimiento cada vez en menos tiempo ya sea porque el estudiante se adaptó al uso del simulador.



**Figura 87** Progreso Tarea 2-Estudiante 1

Mientras que en el diagrama de líneas de la Figura 87 se observa la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 65 puntos y al final un promedio de 79,5 puntos lo que indica una mejora en su aprendizaje y por tanto que fue posible evaluarlo.

### **Estudiante 2:**

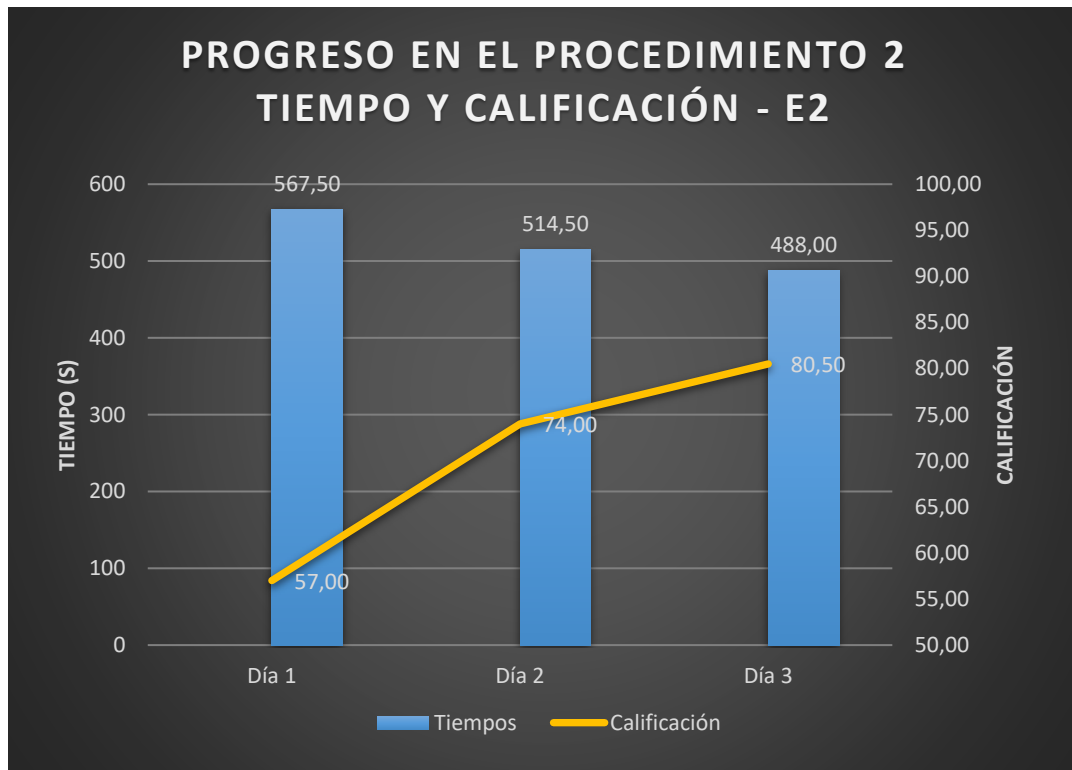
En la Tabla 87 se expone la información obtenida del estudiante 2 en el procedimiento de profilaxis dental.

**Tabla 87**  
*Avances del estudiante 2 en el procedimiento 2*

<b>Estudiante 2</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Promedio Tiempo</b>	<b>Nota</b>	<b>Promedio Nota</b>
<b>Día 1</b>	1	580		50	
	2	555	567,5	64	57,00
<b>Día 2</b>	1	550		62	
	2	479	514,5	86	74,00
<b>Día 3</b>	1	500		78	
	2	476	488,0	83	80,05

Los parámetros establecidos para el seguimiento que tiene el estudiante en este procedimiento es el tiempo en el cual realiza la tarea y la calificación obtenida.

En el diagrama de barras de la Figura 88 se observa la tendencia en tiempo que presenta el estudiante con el uso del simulador en el segundo procedimiento, ya que el primer día obtuvo 567,5 segundos y finalmente obtuvo 488 segundos, presentando un avance descendente que significa que realizó el procedimiento cada vez en menos tiempo ya que por el uso el estudiante se adaptó.



**Figura 88** Progreso Tarea 2-Estudiante 2

Mientras que en el diagrama de líneas de la Figura 88 se observa la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 57 y al final un promedio de 80,5 lo que indica una mejora en su aprendizaje y que fue posible evaluar.

**Estudiante 3:**

En la Tabla 88 se expone la información obtenida del estudiante 3 en el procedimiento de profilaxis dental.

**Tabla 88**

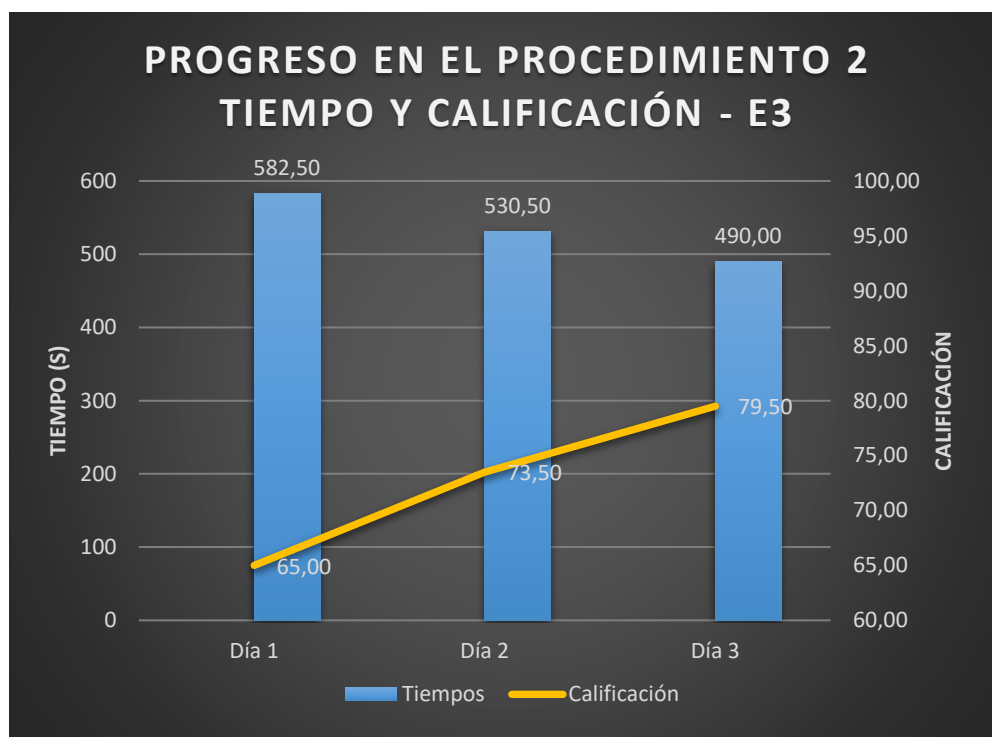
*Avances del estudiante 3 en el procedimiento 2*

Estudiante 3	Repeticiones	Tiempo	Promedio Tiempo	Nota	Promedio Nota
<b>Día 1</b>	1	660		60	
	2	565	582,5	70	65,00
<b>Día 2</b>	1	575		65	
	2	486	530,5	82	73,50
<b>Día 3</b>	1	500		75	
	2	480	490,0	84	79,50

Los parámetros establecidos para el seguimiento que tiene el estudiante en este procedimiento es el tiempo en el cual realiza la tarea y la calificación obtenida.

En el diagrama de barras de la Figura 89 se observa la tendencia en tiempo que presenta el estudiante con el uso del simulador en el segundo procedimiento, ya que el primer día obtuvo 582,5 y finalmente obtuvo 490 presentando un avance descendente que significa que realizó el procedimiento cada vez en menos tiempo ya que por el uso el estudiante se adaptó y mejoró notablemente.





**Figura 89** Progreso Tarea 2-Estudiante 3

Mientras que en el diagrama de líneas de la Figura 89 se observa la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 65 y al final un promedio de 79,5 lo que indica una pequeña mejora en su aprendizaje.

### **Procedimiento 3 – Blanqueamiento dental**

El propósito del tercer procedimiento es de eliminar las manchas en los dientes por pigmentos de comida y bebida, mismas que penetran en la dentina y provocan decoloración. La evaluación se realiza en base al tiempo y a los aciertos y errores

cometidos durante el proceso, mismos que son almacenados en la base de datos del sistema.

### **Estudiante 1:**

En la Tabla 89 se expone la información obtenida del estudiante 1 en el procedimiento de blanqueamiento dental.

**Tabla 89**  
*Avances del estudiante 1 en el procedimiento 3*

<b>Estudiante 1</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Promedio Tiempo</b>	<b>Nota</b>	<b>Promedio Nota</b>
<b>Día 1</b>	1	668,00	627,50	56,00	62,00
	2	587,00		66,00	
<b>Día 2</b>	1	656,00	561,00	61,00	71,00
	2	466,00		81,00	
<b>Día 3</b>	1	567,00	540,00	62,00	69,00
	2	513,00		76,00	

Los parámetros establecidos para el seguimiento que tiene el estudiante en este procedimiento es el tiempo en el cual realiza la tarea y la calificación obtenida.

En el diagrama de barras de la Figura 90 se observa la tendencia en tiempo que presenta el estudiante con el uso del simulador en el tercer procedimiento, ya que el primer día obtuvo 627,50 segundos y finalmente obtuvo 540,00 segundos presentando un avance descendente que significa que realizó el procedimiento cada vez en menos tiempo ya que por el uso el estudiante se adaptó y mejoró notablemente.



**Figura 90** Progreso en procedimiento 3 - E1

Mientras que en el diagrama de líneas de la Figura 90 se observa la tendencia en cuanto a la calificación obtenida por el estudiante con el uso del simulador, al inicio obtiene un promedio de 62 puntos y al final un promedio de 69 puntos lo que indica una pequeña mejora en su aprendizaje.

### **5.3. Validación de la usabilidad del sistema mecatrónico**

Es fundamental realizar un estudio de usabilidad del sistema mecatrónico con el propósito de proporcionar un dispositivo fácil de usar y con la seguridad garantizada. En el presente proyecto se valida la usabilidad a través del test SUS (System Usability Scale – Escala de Usabilidad de un Sistema) que es una herramienta metodológica que mide la usabilidad de un objeto, dispositivo, sistema o aplicación.

Este test consiste en 10 preguntas las mismas que determinaran si el usuario está totalmente de acuerdo o no con la utilización del nuevo sistema con una escala del 1 al 5, donde 1 significa total desacuerdo y 5 significa total acuerdo, el test aplicado se encuentra en el Anexo D.

Para calcular la puntuación del SUS hay que sumar las contribuciones de cada pregunta, para los puntos 1, 3, 5, 7 y 9, la contribución será la posición de la escala menos 1. Para los puntos 2, 4, 6, 8 y 10, la contribución será 5 menos la posición en la escala. Se multiplica la suma de los resultados por 2.5 para obtener el valor global del SUS; el resultado estará entre 0 y 100%.

Después de obtener las respuestas del test de cada estudiante, se registran los datos en la Tabla 90 para el respectivo análisis, en la tabla se describe las respuestas de cada pregunta, el total del cuestionario y el promedio global.

**Tabla 90**  
*Test SUS en estudiantes*

	Estudiante 1	Estudiante 2	Estudiante 3
<b>Pregunta 1</b>	2	3	4
<b>Cálculo 1</b>	3	1	3
<b>Pregunta 2</b>	3	2	2
<b>Cálculo 2</b>	2	3	3
<b>Pregunta 3</b>	3	3	4
<b>Cálculo 3</b>	2	2	3
<b>Pregunta 4</b>	2	2	3

Continúa 

<b>Cálculo 4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
<b>Pregunta 5</b>	2	3	4
<b>Cálculo 5</b>	3	2	3
<b>Pregunta 6</b>	2	2	1
<b>Cálculo 6</b>	3	3	4
<b>Pregunta 7</b>	2	3	3
<b>Cálculo 7</b>	1	2	2
<b>Pregunta 8</b>	2	2	3
<b>Cálculo 8</b>	3	3	2
<b>Pregunta 9</b>	3	3	2
<b>Cálculo 9</b>	2	2	1
<b>Pregunta 10</b>	1	2	3
<b>Cálculo 10</b>	4	3	3
<b>SUMATORIA</b>	44	46	52
<b>TOTAL INDIVIDUAL</b>	110	115	130
<b>TOTAL GLOBAL</b>	118,33		

Según los resultados obtenidos en la Tabla 90 se verifica que la puntuación obtenida por el sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada fue de 118,33 en el total global. De acuerdo con la escala establecida por el test SUS tenemos que:

- Si llega a 25 puntos, es escenario es lo peor imaginable
- Si va de 25 hasta 38, entonces la usabilidad es pobre
- De 38 hasta 52, digamos que está ok (esto ya es como un mínimo aceptable)
- De 52–73 la usabilidad está considerada como buena

- Si llega hasta 85, entonces es excelente
- De 85 a 100 es lo mejor posible, a esto es lo que debería aspirar cualquier plataforma digital, sistema o dispositivo.

Por lo que podemos decir que el sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada tiene un nivel de usabilidad apto

#### **5.4. Validación de la hipótesis**

##### **5.4.1. Planteamiento de la hipótesis**

¿El sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada simulará actividades básicas en el área de odontología?

##### **5.4.2. Variables de investigación**

- **Variable Independiente**

Sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada.

- **Variable dependiente**

Evaluación confiable de la simulación de las actividades básicas en el área de odontología.

##### **5.4.3. Validación de la hipótesis**

Para la validación de la hipótesis del presente proyecto se escogió el popular método estadístico del Chi-cuadrado que es una prueba de hipótesis basada en la comparación de la distribución observada de los datos con la distribución esperada de los datos; para lo cual se establece la hipótesis alternativa y la hipótesis nula:

- **Hipótesis alternativa (Hi):** El sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada simulará actividades básicas en el área de odontología.
- **Hipótesis nula (Ho):** El sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada no simulará actividades básicas en el área de odontología.

Para el cálculo del valor del chi cuadrado aplica el método descrito en el libro Estadística de Mario Triola, el cálculo del chi cuadrado se rige según la (Ecuación 39):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (\text{Ecuación 39})$$

Donde;

$\chi^2$ : *chi cuadrado*

$O_i$ : frecuencia absoluta observada

$E_i$ : frecuencia esperada


Nivel de confianza = 95%

Con los datos obtenidos mediante pruebas experimentales que se aplicó a los estudiantes se procede a calcular el Chi-cuadrado, en la

se observan los datos más relevantes obtenidos con cada una de las actividades. En la primera actividad se considera la calificación obtenida por cada estudiante como variable de análisis cuyo valor referencial es de 100 puntos, en la segunda y tercera actividad se establece como parámetro la calificación cuyo valor máximo puede ser de 100 puntos.

**Tabla 91**  
*Datos obtenidos de pruebas de funcionamiento*

<b>Tarea</b>	<b>Estudiante</b>	<b>Funciona</b>	<b>No funciona</b>	<b>Referencia</b>
<b>Procedimiento 1</b>	Estudiante 1	67,00	33,00	100,00
		68,00	32,00	100,00
		76,00	24,00	100,00
	Estudiante 2	61,00	39,00	100,00
		79,00	21,00	100,00
		80,50	19,50	100,00
	Estudiante 3	49,50	50,50	100,00
		62,50	37,50	100,00
		66,00	34,00	100,00
<b>Procedimiento 2</b>	Estudiante 1	65,00	35,00	100,00
		73,50	26,50	100,00
		79,50	20,50	100,00
	Estudiante 2	57,00	43,00	100,00
		74,00	26,00	100,00
		80,50	19,50	100,00

Continúa 



<b>Procedimiento 3</b>	Estudiante 1	62,00	48,00	100,00
		71,00	29,00	100,00
		69,00	31,00	100,00
<b>Suma total</b>		<b>1241</b>	<b>569</b>	<b>1800</b>

Con la frecuencia observada se procede a calcular la frecuencia esperada mediante la (Ecuación 40) :

$$E_{ij} = \frac{O_i * O_j}{O} \quad (\text{Ecuación 40})$$

Donde:

$O_i = \text{Frecuencia observada}$

$E_{ij} = \text{Frecuencia esperada}$

$O = \text{Total}$


Reemplazando los valores en la (Ecuación 40) se obtiene:

$$E_{ij} = \frac{100 * 1241}{1800} = 68,94$$

$$E_{ij} = \frac{100 * 569}{1800} = 31,0$$

**Tabla 92***Datos de frecuencia esperada.*

<b>Tarea</b>	<b>Estudiante</b>	<b>Funciona</b>	<b>No funciona</b>	<b>Referencia</b>
<b>Procedimiento 1</b>	Estudiante 1	68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
	Estudiante 2	68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
	Estudiante 3	68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
<b>Procedimiento 2</b>	Estudiante 1	68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
	Estudiante 2	68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00

Continúa 

<b>Procedimiento 3</b>	Estudiante 1	68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
		68,94	31,06	100,00
	<b>Suma total</b>	<b>1241</b>	<b>569</b>	<b>1800</b>

Con los valores calculados en la

*Tabla 92* de frecuencia esperada se calcula el valor del Chi-cuadrado para lo que se utiliza la (Ecuación 41) .

$$\chi^2 = \frac{O_{ij} - E_{ij}}{O} \quad (\text{Ecuación 41})$$

Donde:

*i* = Número de filas

*j* = Número de columnas

$\chi^2$  = Chi – cuadrado calculado

En la siguiente tabla se muestran los resultados calculados de Chi-cuadrado.

**Tabla 93**  
*Datos calculados de Chi-cuadrado*

<b>Tarea</b>	<b>Estudiante</b>	<b>Funciona</b>	<b>No funciona</b>
<b>Procedimiento 1</b>	Estudiante 1	0,05	0,12
		0,01	0,03
		0,72	1,60
	Estudiante 2	0,91	2,03
		1,47	3,26
		1,94	4,30
	Estudiante 3	5,48	12,17
		0,60	1,34
		0,13	0,28
<b>Procedimiento 2</b>	Estudiante 1	0,23	0,50
		0,30	0,67
		1,62	3,59
	Estudiante 2	2,07	4,59
		0,37	0,82
		1,94	4,30

Continúa 

<b>Procedimiento 3</b>	Estudiante 1	0,70	9,24
		0,06	0,14
		0,00	0,00
<b>Suma total</b>		<b>18,60</b>	<b>48,98</b>
<b>Chi-cuadrado</b>		<b>67,58</b>	

Para calcular el grado de libertad se aplica la (Ecuación 42).

$$v = (i - 1)(j - 1) \quad (\text{Ecuación 42})$$

$$v = (18 - 1)(2 - 1) = 17$$

Los valores de los puntos porcentuales para la distribución de Chi-cuadrado se pueden observar en el Anexo E. Considerando un 95% de confiabilidad, se obtiene:

$$\lambda_{\text{tabulado}}^2 = 35,72$$

A continuación, para validar la hipótesis alternativa como verdadera se necesita que el valor del Chi-cuadrado calculado sea mayor que el tabulado.

$$\lambda_{\text{calculado}}^2 \geq \lambda_{\text{tabulado}}^2$$

$$67,58 \geq 35,72$$

El valor del Chi-cuadrado calculado es mayor que el tabulado, por tanto, el sistema mecatrónico de percepción háptica simula actividades básicas de odontología.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- El sistema de percepción háptica con realidad aumentada permite simular actividades básicas de odontología ya que proporciona a los estudiantes de una retroalimentación sensorial vibro táctil y un ambiente con RA y herramientas para su desarrollo.
- Mediante la aplicación del diseño concurrente aplicando el método ordinal corregido de criterios ponderados fue posible seleccionar sensores, actuadores, materiales y diferentes componentes para el dispositivo háptico, este método permite realizar una selección de las alternativas de diseño con la finalidad que cumplan los requisitos para la correcta implementación.
- El dispositivo háptico consta de una estructura mecánica serial de cinemática abierta con 5 grados de libertad, del cual se realizó un modelo CAD y posteriormente se utilizó la técnica de corte láser e impresión 3D para su construcción.
- Los cálculos de esfuerzos y deformaciones de las partes del dispositivo háptico indican que la estructura de construcción mixta es funcional y con un costo menor que al ser realizado con un solo material.
- El análisis cinemático permitió corregir errores de posicionamiento debido a ruido en la lectura de las señales de los encoders.

- Para la selección del motor de videojuegos Unity 3D se tomó en cuenta la compatibilidad con diferentes componentes, las múltiples herramientas y librerías para el desarrollo, y la amplia documentación propia y creada por la comunidad de usuarios.
- La plataforma de desarrollo Unity 3D cuenta con herramientas que ayudan a lograr el cambio de color en los dientes de la aplicación al realizar el blanqueamiento y la limpieza, teniendo un correcto uso de los recursos que brinda la plataforma de desarrollo.
- La aplicación con realidad aumentada cuenta con tres actividades básicas mismas que consisten en la exploración dental, profilaxis dental semi profunda y el blanqueamiento dental. Estas actividades se consideran básicas debido a que se aprenden en los primeros semestres de la Carrera de odontología.
- Las pruebas de valoración experimental del sistema mecatrónico de percepción háptica con realidad aumentada se realizaron con estudiantes de diferentes universidades que cursan la Carrera de Odontología en sus primeros niveles. Los estudiantes muestran una respuesta positiva debido a que el sistema les resulta amigable por ser similar a un juego, en base al análisis de los resultados obtenidos se comprueba que la aplicación si permite simular las tres actividades básicas.

## 6.2 Recomendaciones

- Para realizar la impresión 3D y corte láser de piezas es necesario tener en consideración las tolerancias de las máquinas, para realizar una compensación y evitar problemas en el ensamblado.
- Es necesario actualizar la librería de Bluetooth para Unity a una de las últimas versiones debido a que suelen presentarse problemas en la transmisión de datos.
- El uso del sistema de percepción háptica con RA debe usarse para evaluación de estudiantes de primero a tercer nivel de la Carrera de Odontología, debido a que cuenta con actividades básicas.



## Referencias Bibliográficas

- 3D Systems. (2018). *Touch X*. Recuperado el 20 de Marzo de 2019, de <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x/specifications>
- Acosta, C. (14 de Diciembre de 2014). *Historia de la realidad aumentada*. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <https://www.scoop.it/topic/cac-by-cristina-acosta-de-la-cruz/p/4033562308/2014/12/14/historia-de-la-realidad-aumentada>
- Arboleda, M. E. (2017). *Color dental predominante de piezas naturales anterosuperiores en hombres y mujeres de 18 a 5 años de edad*. Quito: Universidad de las Américas. Recuperado el 19 de Abril de 2019
- ARCore. (17 de Abril de 2019). *Supported Devices*. Recuperado el 23 de Febrero de 2019, de <https://developers.google.com/ar/discover/supported-devices>
- Athenea Dental Institute. (2017). *Cómo ser un profesional de la profilaxis dental*. Recuperado el 26 de Octubre de 2018, de <https://atheneainstitute.com/profesional-la-profilaxis-dental/>
- B., J., Kyung, K.-U., & Kassner, S. (2010). Setting the Standards for Haptic and Tactile Interactions: ISO's Work. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 353–358.
- Baca, P., Rosel, E., & González, M. P. (2018). *Universidad de Granada*. Recuperado el 16 de Abril de 2019, de Historia clínica en odontología preventiva. Índices de caries y periodontales: <http://www.ugr.es/~pbaca/p1historiaclinicaenop/02e60099f41016303/pr1.pdf>

Baez Martinez , L. (2000). *BREVE HISTORIA DE LA SILLA DE RUEDAS*. Recuperado el 22 de Abril de 2019, de Cronología y curiosidades históricas desde la antigüedad hasta nuestros días.: [http://www.minusval2000.com/otros/reportajes/historia\\_silla\\_de\\_ruedas/index.htm](http://www.minusval2000.com/otros/reportajes/historia_silla_de_ruedas/index.htm)

Ballesteros, S. (1993). Percepción háptica de objetos y patrones realizados: una revisión. *Psicothema*, 311-321.

Baratieri, L. N., Monteiro, S., Spezia de MElo, T., Ferreira de Rocha, K. B., Hilgert, L. A., Schlichting, L. H., . . . Zanatta Brandeburgo, G. (2011). Instrumental y material. En L. N. Baratieri, & S. Monteiro, *Odontología restauradora. Fundamentos y técnicas* (págs. 49-53). Santos Editor.

Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). Características a considerar en la selección de un robot. En A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, & R. Aracil, *Fundamentos de robótica* (pág. 263). MAdrid: Mc Graw Hill.

Budynas, R. G., & Nisbett, K. J. (2008). Fallas resultantes de carga estática. En R. G. Budynas, & K. J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (pág. 215). México: Mc Graw Hill.

Canals, A. S., & Masgrau, N. G. (2011). *Blanqueamiento dental y estética buco-facial*. Recuperado el 16 de Febrero de 2019, de Evaluación de cuatro métodos de blanqueamiento dental y el blanqueamiento dental como tratamiento dentro de un marco multidisciplinar en la estética del tercio inferior de la cara:

<http://www.semcc.com/master/files/Blanqueamiento%20dental%20-%20Dras.%20Gironella%20y%20Saurina.pdf>

CCM. (12 de Septiembre de 2017). *Qué es y cómo funciona la realidad aumentada*. Recuperado el 20 de Febrero de 2019, de <https://es.ccm.net/faq/30104-que-es-y-como-funciona-la-realidad-aumentada>

CEDAL. (2019). *Catálogo Cedal*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2018, de <http://www.cedal.com.ec/uploads/product/01-cedal-angulos-lados-iguales.pdf>

Clínica dental Galindo. (2017). *Blanqueamiento dental paso a paso*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2018, de <http://www.dentalgalindo.com/blog/blanqueamiento-dental-paso-a-paso/>

Colegio Odontológico de Perú. (2006). *Norma Técnica del Odontograma*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2018, de <http://www.cop.org.pe/wp-content/uploads/2015/05/Normas-tecnicas-del-Odontograma.pdf>

CryTek GmbH. (2019). *Why choose Cryengine?* Recuperado el 14 de Abril de 2019, de <https://www.cryengine.com/>

ECVV Challenge Your Trading. (20 de Noviembre de 2014). *Cepillo micro dental*. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de <https://www.ecvv.com/product/2007163.html>

El Comercio. (8 de enero de 2016). *10 facultades de Odontología del Ecuador fueron acreditadas*. Recuperado el 23 de Julio de 2018, de 10 facultades de Odontología

del Ecuador fueron acreditadas: <http://www.elcomercio.com/actualidad/carreras-odontologia-ecuador-acreditadas.html>

EL dentista académico. (06 de Septiembre de 2016). *¿Qué es el fotopolimerizador? ¿Para qué sirve?* Recuperado el 23 de Junio de 2019, de <http://www.odentistaacademico.com.br/2016/09/o-que-e-o-fotopolimerizador-para-que.html>

Electrónicos Caldas. (2018). *Sensor de fuerza*. Recuperado el 6 de Marzo de 2019, de <https://www.electronicoscaldas.com/sensores-de-fuerza-peso-estres/255-sensor-de-fuerza-fsr-402.html>

Epic Games Inc. (2019). *UNREAL ENGINE*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019, de <https://www.unrealengine.com/en-US/>

Esclatec. (2015). *Esclatec*. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de Estel: <http://esclatec.com/portfolio/estel/>

Escuela Superior de Auxiliares y Técnicos. (2015). *Pautas para una correcta exploración bucodental*. Recuperado el 26 de Enero de 2019, de <https://essatformacion.com/blog/posts-odontologia/pautas-para-una-correcta-exploracion-bucodental>

Fiallos, C. (30 de Abril de 2012). *Informática Educativa*. Recuperado el 25 de Febrero de 2019, de <http://cinthyaraquelfiallos.blogspot.com/2012/04/simuladores.html>

Gaerma. (28 de Septiembre de 2015). *Instrumental odontología*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2018, de <https://es.slideshare.net/Gaerma/instrumental-odontologia-53277949>

García, J. (2018). *Robots Manipuladores Seriales*. Recuperado el 22 de Marzo de 2019, de <http://sfproyectoiprobotica.blogspot.com/2013/01/robots-manipuladores-seriales.html>

Gardoqui, J. (2017). *Háptica*. Recuperado el 6 de Febrero de 2019, de <http://jaimegardoqui.com/knowledge%20base/haptica/>

Hannaford, B., & Okamura, A. M. (2016). Capítulo 42. Hápticos. En B. Siciliano, & O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics* (págs. 1063-1083). Suiza: Springer.

Hayward, V., & Maclean, K. (Diciembre de 2007). *Do it yourself haptics: Part I*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019, de <http://web.stanford.edu/class/me327/readings/3-Hayward07-RAM-DIY1.pdf>

HETPRO. (25 de Abril de 2014). *MPU6050 Arduino, Acelerómetro y Giroscopio*. Recuperado el 14 de Febrero de 2019, de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/modulo-acelerometro-y-giroscopio-mpu6050-i2c-twi/>

Hoyer, H., Borgolte, U., & Jochheiman, A. (1999). *La Silla de Ruedas Omnidireccional*. Tokyo: Japanese Society for Rehabilitation of Persons with Disabilities.

Iberia, M. (13 de Mayo de 2015). *FP Técnicas de Ayuda Odontológica y Estomatológica*. Recuperado el 26 de Abril de 2019, de [https://issuu.com/macmillaniberia/docs/fp\\_tecnicas\\_ayudas\\_odontologicas\\_es](https://issuu.com/macmillaniberia/docs/fp_tecnicas_ayudas_odontologicas_es)

Impresoras3D. (01 de Enero de 1970). *El material de impresion ABS y sus características*.

Recuperado el 21 de Noviembre de 2018, de <https://www.impresoras3d.com/el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas/>

Inglobe Technologies Srl. (2011). *AR-media Augmented reality media*. Recuperado el 02

de Agosto de 2018, de La realidad aumentada en el futuro del mundo editorial:  
[https://www.inglobetechnologies.com/docs/whitepapers/AR\\_editoria\\_whitepaper\\_es.pdf](https://www.inglobetechnologies.com/docs/whitepapers/AR_editoria_whitepaper_es.pdf)

Interlink Electronics. (2018). *FSR 400 Series Data Sheet*. Caldas. Recuperado el 10 de Diciembre de 2018

Linietsky, J., & Manzur, A. (2007). *GODOT*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de <https://godotengine.org/>

Maderas Santana. (16 de abril de 2015). *Características de los tablero o madera MDF*.

Recuperado el 18 de Junio de 2018, de <https://www.maderasantana.com/caracteristicas-tableros-madera-mdf/>

Masisa. (2019). *Ficha técnica*. México. Recuperado el 23 de Marzo de 2019

Melo , I. M. (2018). Realidad aumentada y aplicaciones. *TIA Tecnología, Investigación y Academia*, 28-35.

Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social El Salvador. (Diciembre de 2004). *MAnual de procedimientos en Odontoestomatología*. Recuperado el 1 de Marzo de 2019, de

[http://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/derogados/Manual\\_de\\_Procedimientos\\_en\\_Estomatologia\\_\(Salud\\_Bucal\).pdf](http://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/derogados/Manual_de_Procedimientos_en_Estomatologia_(Salud_Bucal).pdf)

MOOG. (2016). *Moog dental trainer*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de <http://www.moogdentaltrainer.com/>

Moog. (2019). *Tecnología háptica en Realidad Virtual Simodont Dental Trainer*. Recuperado el 17 de Marzo de 2019, de <https://www.moog.com/markets/medical-dental-simulation/haptic-technology-in-the-moog-simodont-dental-trainer.html#>

Moreno, H. (12 de Septiembre de 2012). *Robots Paralelos, Conceptos y Aplicaciones*. Recuperado el 10 de Marzo de 2019, de <https://es.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos>

Multimedia gratis. (17 de Mayo de 2017). *Realidad aumentada*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de [¿Qué es la RA?: http://www.multimedigratis.com/imagen/que-es-la-realidad-aumentada.htm](http://www.multimedigratis.com/imagen/que-es-la-realidad-aumentada.htm)

Observatorio del Gabinete de Tele-Educación. (4 de Julio de 2018). *¿Qué es un motor de videojuegos?* Recuperado el 18 de Noviembre de 2018, de <http://blogs.upm.es/observatoriogate/2018/07/04/que-es-un-motor-de-videojuegos/>

Odontomecum. (21 de Julio de 2017). *Productos necesarios para el blanqueamiento dental*. Recuperado el 5 de Febrero de 2019, de <https://dvd-dental.com/blogodontomecum/productos-blanqueamiento-dental/>

- Okamura, A. M. (15 de Marzo de 2018). *Stanford University | Mechanical Engineering*. (A. Okamura, Ed.) Recuperado el 05 de Enero de 2019, de ME 327: Design and Control of Haptic Systems: <http://web.stanford.edu/class/me327/?fbclid=IwAR10cRZ3CNHdwWKWZldmzQA0TYu0GQNK00A8qlwSPySCo3nhAS3015PRNpk>
- Pérez, J., & Gardey, A. (2014). *Definición de Simulador*. Recuperado el 11 de Abril de 2019, de <https://definicion.de/simulador/>
- Plan Nacional de Desarrollo. (2017). Recuperado el 25 de Marzo de 2019, de [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Plan\\_Nacional\\_para\\_el\\_Buen\\_Vivir.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Plan_Nacional_para_el_Buen_Vivir.pdf)
- Plus Dental. (2017). *Abreboca arcflex medio FGM*. Recuperado el 27 de Julio de 2018, de <https://tiendaplusdental.com/abreboca-arcflex-medio-fgm.html>
- Psicothema. (1993). *Percepción háptica de objetos y patrones realizados: una reivisión*. Recuperado el 10 de Junio de 2018, de <http://www.psicothema.com/psicothema.asp?id=885>
- PTC. (2019). *Augmented REality Innovation*. Recuperado el 26 de Abril de 2019, de <https://www.ptc.com/en/products/augmented-reality>
- Rambal Automatización y robótica. (Noviembre de 2018). *Encoder Incremental de 400 pulsos/rev*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2018, de [www.rambal.com](http://www.rambal.com)
- Romeva, C. R. (2010). El enmarque del diseño. En C. R. Romeva, *Diseño Concurrente* (pág. 59). Barcelona: Edicions UPC.



- SAMSUNG. (2019). *Samsung*. Recuperado el 4 de Julio de 2019, de <https://www.samsung.com/es/tablets/galaxy-tab-s3-4g/SM-T825NZKAPHE/>
- Sassi, C., Picapedra, A., Ferreira, P. H., Groppo, F., Francesquini, L., Daruge, E., & Bevilacqua, F. (2012). Comparación antropométrica entre mandíbulas de poblaciones Uruguay y Brasileña. *International Journal of Morphology*, 379-387.
- SENPLADES. (2012). *Secretaría Nacional de Desarrollo*. Recuperado el 21 de Marzo de 2019, de Transformación de la Matriz Productiva: [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/matriz\\_productiva\\_WEBtodo.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/matriz_productiva_WEBtodo.pdf)
- Ticona, L. (2014). *Comparación del adiestramiento manual para la preparación cavitaria clase II para resina compuesta según la metodología tradicional vs el uso de una metodología innovadora en los alumnos de Pre-grado de la Escuela de Odontología de la UPC*. Recuperado el 13 de Febrero de 2019, de <https://core.ac.uk/download/pdf/54246619.pdf>
- Toribio, V. A., & Torronteras, A. (16 de Septiembre de 2015). *Introducción a la háptica. Nuevos dispositivos de entrada y salida*. Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de Universidad Politécnica de Catalunya: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/84154/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Total materia. (2019). *Propiedades de los materiales*. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de [www.totalmateria.com](http://www.totalmateria.com)

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. México: McGraw Hill.

ULTIMAKER. (2017). *Ficha de datos técnicos PLA*. Recuperado el 17 de Octubre de 2018

Ultradent Products. (2019). *OpalDam*. Recuperado el 14 de Enero de 2019 , de <https://intl.ultradent.com/es-la/Productos-Dentales/Blanqueamiento-Dental/Materiales-auxiliares-protectores/OpalDam-y-OpalDam-Green-barrera-de-resina-fotopolimerizable/Pages/default.aspx>

Unidental. (25 de Marzo de 2014). *La historia de la odontología*. Recuperado el 4 de Enero de 2019, de <http://www.unidental.es/blog/curiosidades/la-historia-de-la-odontologia>

Unidental. (26 de enero de 2017). *Limpieza dental profesional*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2018, de <http://www.unidental.es/blog/salud/limpieza-dental-profesional-paso-a-paso>

Unity Technologies. (2019). *Game Engine ¿How do they work?* Recuperado el 28 de Febrero de 2019, de <https://unity3d.com/es/what-is-a-game-engine>

Unity Technologies. (2019). *The world's leading real-time creation platform*. Recuperado el 19 de Marzo de 2019, de [https://unity3d.com/es/unity?\\_ga=2.100566237.278227714.1556062751-364952547.1536601668](https://unity3d.com/es/unity?_ga=2.100566237.278227714.1556062751-364952547.1536601668)

Universia. (2016). *Odontólogo en España*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018, de <http://profesiones-ocupaciones.universia.net/profesion/odontologo/147>

Universidad Europea Miguel de Cervantes. (2018). *Grado de Odontología*. Recuperado el 11 de Febrero de 2019, de <http://www.uemc.es/documents/download/186>

Universidad Rey Juan Carlos. (11 de Febrero de 2014). *Introducción a la Clínica Odontológica*. Recuperado el 14 de Marzo de 2019, de Instrumental y MAteriales Odontológicos: <https://es.scribd.com/doc/206482618/instrumental-odontologia>

Velazquez, A. (08 de Agosto de 2012). *Instrumental, materiales y procedimientos clínicos en odontología conservadora*. Recuperado el 27 de Marzo de 2019, de <https://es.scribd.com/doc/102398044/Instrumental-Materiales-y-Procedimientos-Clinicos-en-Odontologia-Conservadora>

Virteasy Dental. (2018). *Realidad virtual al servicio de la salud y la industria*. Recuperado el 24 de Febrero de 2019, de <http://www.hrv-simulation.com/virteasy-dental/virteasy-dental-savoir-plus.html>

Woods, B. (30 de Octubre de 2006). *The University of Western Australia*. Recuperado el 29 de Marzo de 2019, de <http://robotics.ee.uwa.edu.au/theses/2006-Wheelchair-Woods.pdf>

YoYo Games Ltd. (2013). *GameMAker Studio 2 TM*. Recuperado el 30 de Julio de 2019, de <https://www.yoyogames.com/gamemaker/features>

# ANEXO



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **PUSDÁ MEJÍA, KARLA ESTEFANÍA Y SAIGUA PARRA, JOHANNA ALEJANDRA**

En la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de julio del 2019.

**Aprobado por:**

Ing. Gordón Garcés Andrés Marcelo

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Ing. Dario Mendoza Chipantay

**DIRECTOR DE CARRERA**

Dr. Rodrigo Vaca Corrales

**SECRETARIO ACADÉMICO**