



**Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños**

Almeida Ushiña, Jefferson Daniel y Balladares Oleas, Dorian Antonio

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

Ing. Tobar Quevedo, Johana Belén

18 de agosto de 2021



### Document Information

<b>Analyzed document</b>	Trabajo_Titulacion_AlmeidaDaniel_y_BalladaresAntonio (1).pdf (D111465271)
<b>Submitted</b>	8/19/2021 2:45:00 PM
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	dcloza@espe.edu.ec
<b>Similarity</b>	7%
<b>Analysis address</b>	dcloza.espe@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Trabajo_Titulacion_ZunigaPablo.pdf</b> Document Trabajo_Titulacion_ZunigaPablo.pdf (D111181538) Submitted by: dcloza@espe.edu.ec Receiver: dcloza.espe@analysis.orkund.com	 3
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Titulacion_ProceL_Capitulos (1) (1).docx</b> Document Titulacion_ProceL_Capitulos (1) (1).docx (D77244123) Submitted by: jbtobar@espe.edu.ec Receiver: jbtobar.espe@analysis.orkund.com	 75
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9269/1/T-ESPEL-MAI-0501.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9269/1/T-ESPEL-MAI-0501.pdf</a> Fetched: 7/17/2020 10:08:11 PM	 1
<b>SA</b>	<b>ZapataPaulo-CaisaguanoPaul.pdf</b> Document ZapataPaulo-CaisaguanoPaul.pdf (D103349142)	 1
<b>W</b>	URL: <a href="http://192.188.51.77/bitstream/123456789/14591/1/65832_1.pdf">http://192.188.51.77/bitstream/123456789/14591/1/65832_1.pdf</a> Fetched: 5/30/2021 2:23:42 AM	 1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Manipulador Movil Robayo-Pazmiño.pdf</b> Document Manipulador Movil Robayo-Pazmiño.pdf (D36338257) Submitted by: grtorres@espe.edu.ec Receiver: grtorres.espe@analysis.orkund.com	 1

Firma:



Ing. Tobar Quevedo, Johana Belén

DIRECTOR



**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 escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños**" fue realizado por los señores **Almeida Ushiña, Jefferson Daniel** y **Balladares Oleas, Dorian Antonio** 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 las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de agosto de 2021

Firma:

**Ing. Tobar Quevedo, Johana Belén**

C. C. 171717124-1



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

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Nosotros, **Almeida Ushiña, Jefferson Daniel** y **Balladares Oleas, Dorian Antonio** con cédulas de ciudadanía n ° 1718435413 y n ° 0603947540 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 20 de agosto de 2021**

Firman

.....  
**Almeida Ushiña, Jefferson Daniel**

C.C.: 171843541-3

.....  
**Balladares Oleas, Dorian Antonio**

C.C.: 060394754-0



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

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros, **Almeida Ushiña, Jefferson Daniel** y **Balladares Oleas, Dorian Antonio** con cédulas de ciudadanía n ° 1718435413 y n° 0603947540, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 20 de agosto de 2021**

Firman

.....  
**Almeida Ushiña, Jefferson Daniel**

C.C.: 171843541-3

.....  
**Balladares Oleas, Dorian Antonio**

C.C: 060394754-0

## **Dedicatoria**

### **Daniel**

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios y la Virgen María.

A mis padres Cesar y Lidia, por ser el pilar más importante durante toda mi vida y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional en todo momento, ya que han sabido formarme con buenos hábitos y valores.

A mi hermana Katherine, por el apoyo incondicional, sus consejos, sus palabras de aliento y su amor, a ella dedico cada día de esfuerzo para lograr lo que hoy soy.

A mi familia y amigas/os que con su entusiasmo, confianza y cariño me dieron el valor para seguir adelante.

### **Antonio**

El presente trabajo lo dedico a la Madre Dolorosa, que me ha llenado de bendiciones a lo largo de mi vida y con fe me encomiendo a ella para un futuro exitoso siendo un hombre de bien. A mis padres Dorian y María Luisa que con su cariño, entrega y optimismo han sido mi motor de superación y un ejemplo a seguir. A mi hermano José Antonio por su amor y la alegría que me brinda. A mi novia Daniela quien ha logrado que su compañía se convierta en mi fortaleza y me motivó a seguir adelante. A mi familia que siempre confió en mí y me ha brindado apoyo para que alcance mis metas y cumpla mis sueños.

## **Agradecimiento**

### **Daniel**

Agradezco a Dios por cubrirme de bendiciones. A mi padre Cesar, porque hasta el día de hoy me sigue dando lecciones de vida y sigo aprendiendo de él, por compartir esfuerzo para cumplir este objetivo con amor. A mi madre Lidia, quien me otorgó la vida por ser un apoyo incondicional, por sus consejos llenos de sabiduría, y sobre todo por el amor y confianza que deposito en mí. A mi hermana Katherine que me incentivo a seguir adelante, a ser un ejemplo para ella y sobre todo a ser un buen hermano. A mi gran amiga Massiel que, con su amor, comprensión y apoyo, se convirtió en un pilar fundamental en mi vida que me lleno de valentía e inspiración. Agradezco a mi familia por su constante apoyo. A mi tutora, Ing. Johana Tobar, quien depositó su confianza en mí y que además me ha guiado en el desarrollo de este proyecto. A mi compañero Antonio, que se convirtió en mi mejor amigo, alentándome, guiándome y apoyándome para culminar nuestro objetivo en común.

### **Antonio**

Gratitud con Dios y la Madre Dolorosa, que me permitieron llegar a esta etapa con salud y bienestar. Agradezco a mis padres por su responsabilidad, amor y confianza depositada en mí, por su apoyo incondicional para lograr este objetivo. A mi hermano quien con su linda energía siempre me llenó de felicidad y con su cariño y admiración me motiva a ser mejor. A mi novia por su cariño y por compartir conmigo alegrías y dificultades que se presentaron en el camino. Agradezco a toda mi familia que de forma incondicional me alentó para alcanzar este logro. Agradezco a Daniel, por su amistad y lealtad, me brindó apoyo para que logremos este sueño. Agradezco a mis maestros que han compartido sus conocimientos formación profesional, en especial a mi tutora de tesis Ing. Johana Tobar quien nos encaminó para alcanzar lograr proyecto.

## Índice de Contenido

Resultados de Urkund .....	2
Certificado de Aprobación .....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de Contenido.....	8
Índice de Tablas .....	14
Índice de Figuras.....	17
Resumen.....	21
Abstract .....	22
Capítulo 1 .....	23
Generalidades .....	23
Antecedentes.....	23
Métodos de enseñanza Infantil.....	24
Tecnología como herramienta de enseñanza Infantil.....	26
Robótica como herramienta de apoyo en la educación Infantil .....	27
Robótica Social .....	29
Robot humanoide Nao.....	29
Justificación e Importancia .....	30
Alcance .....	32
Objetivos.....	34
Objetivo General .....	34



Objetivos Específicos .....	34
Estructura del Documento.....	34
Conclusión de Capítulo 1 .....	36
Capítulo 2.....	37
Investigación Bibliográfica .....	37
Robótica .....	37
Evolución de la Robótica .....	37
Robótica en el siglo XX.....	39
Robótica en la Actualidad .....	42
Robótica Social .....	43
Robot Romeo.....	45
Robot Sophia .....	45
Robot KISMET .....	46
Robot Atlas .....	47
Robot ASIMO.....	48
Robot Nao .....	48
Robot Pepper.....	49
Robótica Educativa .....	50
Robótica aplicada en la educación de niños. ....	52
Robótica de Asistencia Social .....	55
Trastorno del Espectro Autista .....	56
Robótica aplicada en personas con TEA .....	59

	10
Protocolo MQTT.....	62
Arquitectura del Protocolo MQTT .....	63
Funcionamiento del Protocolo MQTT .....	64
Mosquitto.....	66
Conclusión del Capítulo 2 .....	67
Capítulo 3.....	68
Diseño y Construcción de la Escenografía .....	68
Metodología de Diseño y Construcción.....	68
Etapa de Planeación.....	70
Consideraciones y Requerimientos .....	70
Investigación de Parámetros educativos, cognitivos y sociales.....	70
Identificación de Necesidades .....	72
Métricas .....	73
Matrices de necesidades y métricas .....	75
Desarrollo del Concepto.....	77
Diseño Primario del Subsistema de Escenografía .....	78
Módulo Escenario: Estructura .....	78
Módulo Telón: Mecanismo .....	82
Módulo Elevador: Mecanismo.....	89
Módulo de Sistemas Audiovisuales.....	94
Diseño a Nivel Sistema.....	96
Diseño Mecánico del Subsistema de Escenografía .....	96

Módulo Escenario: Estructura .....	97
Módulo Telón: Mecanismo .....	106
Módulo Elevador: Mecanismo .....	110
Diseño Eléctrico y Electrónico .....	129
Módulo Eléctrico: Escenario.....	129
Módulo Electrónico: Telón.....	130
Módulo Electrónico: Elevador .....	132
Módulo Eléctrico: Sistemas Audiovisuales .....	136
Diseño de subsistema de Control .....	138
Diseño de Detalle.....	142
Diseño de Detalle del Subsistema de Escenografía .....	142
Diseño de Detalle del Módulo Escenario: Estructura.....	142
Diseño de Detalle del Módulo Telón: Mecanismo .....	146
Diseño de detalle del Módulo: Elevador .....	147
Diseño de Detalle de Módulos Eléctricos y Electrónicos.....	156
Diseño de Detalle del Módulo de Control.....	164
Pruebas y Refinamiento.....	167
Análisis del Subsistema de Escenografía .....	168
Análisis de fallas Eléctricas .....	171
Inicio de Fabricación .....	173
Conclusión del Capítulo 3 .....	180

Capítulo 4.....	181
Desarrollo e Implementación de Software .....	181
Desarrollo del Subsistema de Actuación.....	181
Creación de rutinas .....	181
Desarrollo de rutinas .....	183
Implementación del Narrador .....	187
Establecimiento de las acciones del escenario.....	187
Estructura general del guion teatral.....	188
Desarrollo del subsistema de Control.....	190
Estructura MQTT.....	191
Desarrollo de la HMI.....	193
Implementación del Software .....	199
Conclusión del Capítulo 4 .....	208
Capítulo 5.....	210
Validación y Análisis de Resultados .....	210
Evaluación de la Herramienta Tecnológica .....	210
Estudio y recolección de Datos .....	210
Resultados .....	212
Conclusión del capítulo 5 .....	218
Capítulo 6.....	219
Conclusiones, Recomendaciones Y Trabajo a futuro .....	219
Conclusiones .....	219
Recomendaciones .....	222

Trabajo a Futuro .....	223
Referencias Bibliográficas .....	224
Anexos .....	233

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Niveles de gravedad del TEA .....	57
<b>Tabla 2</b> Nivel de Calidad de servicio QoS .....	64
<b>Tabla 3</b> Necesidades y requerimientos en el Escenario .....	72
<b>Tabla 4</b> Necesidades y requerimientos en el telón .....	72
<b>Tabla 5</b> Necesidades y requerimientos en el Elevador .....	73
<b>Tabla 6</b> Necesidades y requerimientos en los Efectos Especiales .....	73
<b>Tabla 7</b> Métricas de la escenografía .....	74
<b>Tabla 8</b> Métricas del telón .....	74
<b>Tabla 9</b> Métricas del elevador .....	74
<b>Tabla 10</b> Métricas de efectos especiales.....	75
<b>Tabla 11</b> Matriz de Métricas y necesidades de la escenografía .....	75
<b>Tabla 12</b> Matriz de Métricas y necesidades del telón .....	76
<b>Tabla 13</b> Matriz de Métricas y necesidades del elevador .....	76
<b>Tabla 14</b> Matriz de Métricas y necesidades de los efectos audiovisuales y especiales	77
<b>Tabla 15</b> Propiedades mecánicas y físicas del roble .....	80
<b>Tabla 16</b> Comparación ponderada de los mecanismos de apertura del telón.....	83
<b>Tabla 17</b> Propiedades mecánicas del nylon y POM .....	86
<b>Tabla 18</b> Características del mecanismo de transmisión por cadena .....	87
<b>Tabla 19</b> Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A36 .....	94
<b>Tabla 20</b> Partes de la estructura del escenario .....	106
<b>Tabla 21</b> Tensión en la cadena de transmisión del Telón.....	107
<b>Tabla 22</b> Esfuerzos en el eslabón y reacciones en la rueda dentada .....	108
<b>Tabla 23</b> Comparación entre actuadores neumáticos, eléctricos e hidráulicos.....	118
<b>Tabla 24</b> Características de la Rosca Métrica .....	127
<b>Tabla 25</b> Calibre AWG .....	130

<b>Tabla 26</b>	Especificaciones Técnicas del motor utilizado en el Telón .....	131
<b>Tabla 27</b>	Especificaciones del Motor utilizado en el Elevador .....	135
<b>Tabla 28</b>	Características de Rendimiento del motor del elevador y telón. ....	136
<b>Tabla 29</b>	Características de la Luz Principal del escenario.....	136
<b>Tabla 30</b>	Características de la Luz secundaria RGB del escenario .....	137
<b>Tabla 31</b>	Características de la cámara de humo .....	137
<b>Tabla 32</b>	Características Técnicas del Módulo ESP8266 .....	139
<b>Tabla 33</b>	Características Técnicas del Driver Vnh2sp30 .....	140
<b>Tabla 34</b>	Características de los fines de carrera del elevador .....	141
<b>Tabla 35</b>	Características eléctricas de los reed switch del Telón.....	142
<b>Tabla 36</b>	Elementos estructurales del escenario .....	143
<b>Tabla 37</b>	Dispositivos del Circuito de control .....	156
<b>Tabla 38</b>	Dispositivos eléctricos del circuito del elevador .....	158
<b>Tabla 39</b>	Dispositivos eléctricos del circuito del telón .....	160
<b>Tabla 40</b>	Dispositivos Eléctricos del sistema de iluminación principal .....	161
<b>Tabla 41</b>	Dispositivos eléctricos del sistema de iluminación LED RGB .....	162
<b>Tabla 42</b>	Dispositivos eléctricos del circuito de la cámara de humo .....	163
<b>Tabla 43</b>	Asignación de Pines del Módulo ESP8266 1 y Driver Vnh2sp30.....	164
<b>Tabla 44</b>	Asignación de Pines del Módulo ESP8266 2 y Driver Vnh2sp30.....	164
<b>Tabla 45</b>	Configuración de las paredes del escenario .....	174
<b>Tabla 46</b>	Rutinas realizadas por los robots actores NAO .....	182
<b>Tabla 47</b>	Funciones para el control del movimiento de las extremidades del robot NAO .....	185
<b>Tabla 48</b>	Secuencias desarrolladas para las rutinas de los robots actores NAO .....	185
<b>Tabla 49</b>	Secuencias implementadas para la rutina “Saludar”.....	186
<b>Tabla 50</b>	Acciones para controlar el funcionamiento del Escenario Robótico .....	188

<b>Tabla 51</b> Tópicos para la comunicación MQTT con el teatro robótico .....	192
<b>Tabla 52</b> Descripción de componentes y funcionalidades de la Ventana de Bienvenida .....	200
<b>Tabla 53</b> Descripción de componentes y funcionalidades de la Ventana de Inicio .....	200
<b>Tabla 54</b> Descripción de la pestaña de Gestión del Guion .....	202
<b>Tabla 55</b> Descripción de la pestaña de Ejecución del guion.....	203
<b>Tabla 56</b> Descripción de la pestaña de Ejecución del Escenario.....	205
<b>Tabla 57</b> Descripción de la ventana de Gestión de Tareas .....	206
<b>Tabla 58</b> Descripción de la ventana de Configuración de Recursos.....	207
<b>Tabla 59</b> Listado de preguntas de la encuesta .....	211
<b>Tabla 60</b> Escala de ponderación Likert .....	212
<b>Tabla 61</b> Resultados de ingenieros con experiencia en tecnologías de asistencia .....	213
<b>Tabla 62</b> Resultados de ingenieros sin experiencia en tecnologías de asistencia .....	214
<b>Tabla 63</b> Resultados obtenidos de Neuropsicólogos infantiles.....	214
<b>Tabla 64</b> Estadística descriptiva del Grupo 1 .....	215
<b>Tabla 65</b> Estadística descriptiva del Grupo 2 .....	216
<b>Tabla 66</b> Estadística descriptiva Grupo 3 .....	217



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Ejemplos de Robots antiguos .....	38
<b>Figura 2</b> Robots de asistencia social (a) Pepper, (b) Robot Romeo, (c) y (d) Nao .....	44
<b>Figura 3</b> Robot Romeo .....	45
<b>Figura 4</b> Robot Sophia.....	46
<b>Figura 5</b> Robot KISMET.....	47
<b>Figura 6</b> Robot Atlas.....	47
<b>Figura 7</b> Robot ASIMO .....	48
<b>Figura 8</b> Robot Nao .....	49
<b>Figura 9</b> Robot Pepper .....	50
<b>Figura 10</b> Robot Nao interactuando con niños .....	54
<b>Figura 11</b> Robot Terapeuta Pabi.....	59
<b>Figura 12</b> Robot asistente Bliss .....	60
<b>Figura 13</b> Robots Nao en terapias con niños TEA .....	61
<b>Figura 14</b> Gestos realizados por el robot Nao.....	61
<b>Figura 15</b> Teatro robótico ART .....	62
<b>Figura 16</b> Arquitectura del protocolo MQTT .....	63
<b>Figura 17</b> Protocolo de Comunicación MQTT .....	65
<b>Figura 18</b> Metodología de Diseño y Desarrollo de Productos .....	68
<b>Figura 19</b> Subsistema de escenografía.....	69
<b>Figura 20</b> Barras de madera sometidas (a) esfuerzo a compresión (b) esfuerzo a flexión .....	80
<b>Figura 21</b> Mecanismos de apertura del telón (a) Plegable (b) Acordeón (c) Guillotina .	83
<b>Figura 22</b> Mecanismo del Telón.....	84
<b>Figura 23</b> Embrague de Persiana, piñón y cadena de nylon .....	85
<b>Figura 24</b> Elementos del mecanismo de movimiento del telón.....	88

<b>Figura 25</b> Diseño del telón .....	89
<b>Figura 26</b> Mecanismo elevador del Teatro Robótico .....	90
<b>Figura 27</b> Eslabones y pares de movimiento del mecanismo de tijeras .....	91
<b>Figura 28</b> Análisis de cargas en el elevador.....	102
<b>Figura 29</b> Carga puntual en el elevador .....	103
<b>Figura 30</b> Análisis del mecanismo de tijeras en posición final.....	111
<b>Figura 31</b> Análisis del mecanismo de tijeras en posición inicial .....	112
<b>Figura 32</b> Reacciones en los apoyos del elevador en posición inicial .....	114
<b>Figura 33</b> Reacciones en los apoyos del elevador en posición final.....	115
<b>Figura 34</b> Posición y orientación del actuador en el elevador .....	116
<b>Figura 35</b> Análisis cinemático de la configuración seleccionada .....	117
<b>Figura 36</b> Diagrama del mecanismo de tijeras en 2D.....	118
<b>Figura 37</b> Diagrama de Cuerpo libre de las tijeras .....	119
<b>Figura 38</b> Análisis de reacciones en los eslabones.....	122
<b>Figura 39</b> Nomenclatura y partes eje roscado.....	124
<b>Figura 40</b> Análisis de fuerzas en el tornillo de potencia .....	125
<b>Figura 41</b> Ensamble de la estructura del teatro robótico .....	144
<b>Figura 42</b> Soportes del Telón.....	146
<b>Figura 43</b> Perfil de rosca del tornillo de potencia .....	147
<b>Figura 44</b> Pasador de las tijeras del mecanismo elevador .....	154
<b>Figura 45</b> Diagrama 2D del mecanismo elevador .....	155
<b>Figura 46</b> Perno utilizado como pasador en el mecanismo .....	156
<b>Figura 47</b> Diagrama esquemático de control y potencia del Telón y salidas de módulos .....	165
<b>Figura 48</b> Diagrama esquemático de control del elevador .....	166
<b>Figura 49</b> Diagrama esquemático de potencia del elevador.....	166

<b>Figura 50</b> Diagrama de conexiones del escenario .....	167
<b>Figura 51</b> Simulación del mecanismo del elevador en software CAD .....	169
<b>Figura 52</b> Simulación de la pared frontal del escenario en software CAD .....	170
<b>Figura 53</b> Simulación del techo del escenario en software CAD .....	170
<b>Figura 54</b> Simulación del techo del escenario en software CAD .....	171
<b>Figura 55</b> Simulación del circuito en Proteus .....	172
<b>Figura 56</b> Simulación del circuito dedicado al elevador.....	173
<b>Figura 57</b> Proceso de construcción del escenario.....	174
<b>Figura 58</b> Fotografías de la construcción del escenario .....	175
<b>Figura 59</b> Proceso de Construcción del elevador.....	176
<b>Figura 60</b> Imágenes de la construcción del Elevador.....	176
<b>Figura 61</b> Proceso de construcción del mecanismo del Telón .....	177
<b>Figura 62</b> Imágenes de construcción del Telón.....	177
<b>Figura 63</b> Cableado y Montaje de los dispositivos eléctricos y electrónicos.....	178
<b>Figura 64</b> Placa PCB del circuito .....	179
<b>Figura 65</b> Teatro Robótico Interactivo ensamblado.....	179
<b>Figura 66</b> Diagrama de Flujo: Ejecución general de cada rutina .....	184
<b>Figura 67</b> Estructura general del guion de la obra teatral.....	190
<b>Figura 68</b> Estructura MQTT del teatro robótico interactivo .....	191
<b>Figura 69</b> Jerarquía de ventanas y pestañas .....	193
<b>Figura 70</b> Esquema para la ventana de Bienvenida.....	194
<b>Figura 71</b> Esquema para la ventana de inicio .....	194
<b>Figura 72</b> Esquema para la pestaña de Gestión del Guion .....	195
<b>Figura 73</b> Esquema para la pestaña Ejecución del Guion.....	195
<b>Figura 74</b> Esquema para la pestaña ejecución manual del Escenario .....	196
<b>Figura 75</b> Esquema para la ventana de Gestión de Tareas .....	198

<b>Figura 76</b> Esquema para la ventana de Configuración de recursos de Personajes.....	198
<b>Figura 77</b> Interfaz. Ventana de Bienvenida .....	199
<b>Figura 78</b> Interfaz. Ventana de Inicio. ....	200
<b>Figura 79</b> Interfaz de la pestaña de Gestión del Guion .....	202
<b>Figura 80</b> Interfaz de la pestaña de Ejecución del Guion “Cargar/Actuar” .....	203
<b>Figura 81</b> Interfaz de la pestaña de Ejecución del Escenario.....	204
<b>Figura 82</b> Interfaz de la pestaña de Gestión de Tareas .....	205
<b>Figura 83</b> Interfaz. Ventana para la configuración de Recursos de Personajes .....	207
<b>Figura 84</b> Exposiciones del teatro robótico .....	212

## Resumen

Este es un proyecto de robótica social destinado a la enseñanza en niños y a la ayuda terapéutica de pacientes con TEA. El teatro robótico interactivo es una herramienta de asistencia social innovadora en la que se usan tres robots Nao, un robot virtual y un sistema mecatrónico en la escenografía para mejorar la experiencia del usuario. Se usan dispositivos audiovisuales y de efectos especiales para complementar las obras con los robots. La estructura principal del escenario es liviana, de fácil transporte y muy estable. Se diseñan y construyen dos estructuras automatizadas, la primera es un elevador basado en el mecanismo de tijeras y un telón tipo guillotina. Se diseña una HMI según el criterio Gedis para controlar todo el sistema y crear los guiones teatrales de una manera fácil. Los robots Nao pueden caminar, hablar en inglés y español y realizar diez distintos gestos programados en Python. La comunicación entre los dispositivos del teatro robótico y la HMI es inalámbrica y se realiza por medio del protocolo MQTT. Se utilizaron dos módulos ESP8266 para controlar el funcionamiento general del sistema permitiendo la transmisión de datos en paralelo. Para validar la funcionalidad de la herramienta tecnológica se realizó un análisis estadístico a partir de encuestas a personas profesionales con distinta especialidad. Según el análisis de ingenieros y neuropsicólogos el teatro robótico es funcional, flexible e intuitivo.

- Palabras clave
  - **ROBÓTICA SOCIAL**
  - **ROBOT HUMANOIDE NAO**
  - **TRASTORNO DEL ESPECTRO AUTISTA**
  - **PROTOCOLO MQTT**
  - **INTERFAZ HUMANO MÁQUINA HMI**

### **Abstract**

This is a social robotics project aimed at teaching children and therapeutic help for patients with ASD. The interactive robotic theater is an innovative social assistance tool that uses three Nao robots, a virtual robot, and a mechatronic system on the set to enhance the user experience. Audiovisual and special effects devices are used to complement the plays with the robots. The main stage structure is lightweight, easy to transport and very stable. Two automated structures are designed and built, the first is an elevator based on the scissor's mechanism and a guillotine-type curtain. An HMI is designed according to the Gedis criteria to control the whole system and create the theatrical scripts in an easy way. Nao robots can walk, speak in English and Spanish, and perform ten different gestures programmed in Python. The communication between the robotic theater devices and the HMI is wireless and is done using the MQTT protocol. Two ESP8266 modules were used to control the general operation of the system allowing data transmission in parallel. To validate the functionality of the technological tool, a statistical analysis was carried out from surveys of professionals with different specialties. According to the analysis of engineers and neuropsychologists, robotic theater is functional, flexible and intuitive.

- Keywords

- **SOCIAL ROBOTICS**
- **HUMANOID ROBOT NAO**
- **AUTISM SPECTRUM DISORDER**
- **MQTT PROTOCOL**
- **HUMAN MACHINE INTERFACE HMI**

## **Capítulo 1**

En el primer capítulo de este trabajo de titulación se detallan los aspectos relevantes para el desarrollo del teatro mecatrónico con robots Nao, así como la importancia e impacto social y tecnológico que involucra el proyecto. Al final del capítulo se redacta brevemente el contenido del documento y su estructura.

### **Generalidades**

A continuación, se redacta información referente a las condiciones sociales y tecnológicas actuales que sustenten al desarrollo del proyecto. Los antecedentes, justificación y alcance del mismo, son parte de la fundamentación para este teatro robótico. De igual forma es importante señalar los objetivos que se cumplen con la realización de este proyecto.

### **Antecedentes**

La robótica ha crecido aceleradamente en el último siglo, los robots han pasado a formar parte de nuestra vida cotidiana, la tecnología ha pasado de los centros de investigación y laboratorios a nuestro hogar, escuelas y trabajo. El avance tecnológico de los últimos años marca el inicio de una era moderna rodeada de dispositivos digitales que a la vez son inteligentes y se adaptan al uso que más nos beneficie. Es notable que esta era con tecnología de vanguardia presente en cualquier lugar que vamos, se fortalece y se vuelve cada vez más ambiciosa (Rus, 2018).

Fácilmente podemos encontrar robots en la industria médica; usados en sistemas de rehabilitación, monitoreo de pacientes, robots de precisión para cirugías y robots para sistemas quirúrgicos controlados remotamente. Incluso existen robots para tratar y brindar terapia a pacientes con trastornos psicológicos, como la ansiedad, depresión, autismo, esquizofrenia, estrés, etc. En la industria alimenticia existen robots encargados de procesos como mezcla, siembra y cosecha. En industrias con trabajos

más pesados como la fabricación de acero, maquinaria agroindustrial, aviones, vehículos se utilizan robots ya que aportan flexibilidad, seguridad y protección a trabajadores en ambientes hostiles o desagradables. En la industria militar existen múltiples robots diseñados para aplicaciones que van desde el transporte, búsqueda y rescate hasta el combate y ataque remoto. Y de esta manera podemos enlistar una gran cantidad de actividades en las que la robótica es protagonista y permite mejorar la calidad de vida de seres vivos y cuidar la naturaleza (Bischoff & Graefe, 2004).

La capacidad operativa de los robots va en aumento, cada vez se diseñan robots más personalizados y a la vez estos son más accesibles y potentes para la sociedad. Los robots sociales o personales tienen una gran versatilidad, poseen capacidades de autonomía muy altas y permiten una fácil comunicación con múltiples tipos de interacciones con el entorno. La robótica social se está desarrollando a pasos agigantados y aporta de gran manera en áreas como la salud y educación. En el campo de la salud la robótica social puede ser utilizada como terapia psicológica en enfoques psicoanalíticos, cognitivo – intelectual, dialéctica – conductual, interpersonal, relajación, etc. De igual manera, se puede utilizar como tratamiento para trastornos psicológicos como la ansiedad, autismo y estrés. En el campo de la educación la robótica social puede ser considerada como una herramienta muy potente para técnicas de aprendizaje didáctico, en el que utilizar estas metodologías actualizadas de educación pueden significar un plus con el que pueden desarrollar gestos, conocimientos y aprender a desenvolverse con la tecnología (Rossiter, 2019).

### ***Métodos de enseñanza Infantil***

Métodos de enseñanza hay muchos y variados y para que la enseñanza sea eficiente debe adaptarse tanto al contenido que se desea transmitir como al niño en particular quien interpretará la información. Es decir, no todos los métodos sirven para



todos los alumnos, ya que depende mucho de cómo el niño aprende o de su estilo cognitivo, de la edad de los alumnos o de si tiene, por ejemplo, dificultades de aprendizaje o no. El método a elegir también dependerá de la asignatura y el contenido que se desee transmitir impartiendo, puesto que no es lo mismo la enseñanza de un idioma extranjero, que la enseñanza de las matemáticas, o de ciencias sociales. Es por esto, que no se puede elegir entre el mejor método para enseñar, sino de metodologías más adecuadas que otras para cada niño y cada asignatura (Sarmiento, 2007).

Lo importante en el método de enseñanza es que este se adapte a las características individuales de cada niño, a sus intereses, a las características del grupo o aula y a las características del tema a impartir (Gómez, 2002). Hay métodos que se centran en el profesor como fuente de todo conocimiento y el alumno se desempeña como receptor pasivo de contenidos, hay otros métodos que centran la participación del alumno como únicos directores del proceso de enseñanza-aprendizaje, dándoles mayor protagonismo y logrando conocimientos a partir de maneras didácticas, como puede ser el aprendizaje por descubrimiento o el aprendizaje cooperativo. Estos métodos buscan la participación activa y la motivación del alumno para que a partir de los propios intereses del alumno se genere el motor de aprendizaje (Sarmiento, 2007).

Actualmente se manejan métodos de enseñanza basados en herramientas digitales como aulas virtuales o plataformas en línea en donde los niños pueden aprender por medios tecnológicos que han sido programados por expertos y permiten a los niños escalar gradualmente sus conocimientos. Estas herramientas tecnológicas de educación son muy versátiles y se adaptan a cualquier tipo de contenido, a cualquier edad y a las múltiples condiciones físicas y mentales de los alumnos. La educación virtual ofrece ventajas ya que a diferencia de escuelas comunes las actividades de aprendizaje se pueden hacer en cualquier lugar y a cualquier hora, además se

caracterizan por ser más didácticas y llaman más la atención de los niños al utilizar medios tecnológicos (Zeballos, 2018). La pandemia generada por el Covid 19 ha obligado a que los medios de enseñanza actuales sean digitales, implementando sistemas de estudios a distancia por clases virtuales y plataformas online para poder seguir con las actividades académicas

### ***Tecnología como herramienta de enseñanza Infantil***

La educación es primordial, una virtud en el desarrollo de la sociedad. Por ello, la constante innovación tecnológica ha enfocado sus avances en la creación de herramientas de gran valor para la enseñanza en escuelas colegios y universidades. Los medios digitales y tecnológicos son fundamentales, ya que en primer lugar son las herramientas con las que más están familiarizados los alumnos actualmente. En segundo lugar, porque presentar la información y enseñar en este tipo de medios es más llamativo para los alumnos y pueden servir como una táctica para estimular el aprendizaje, utilizando formas creativas que involucren mayor interés en los estudiantes de todas las edades. La aparición de estas nuevas metodologías modernas han de ser empleadas para para mejorar el nivel educativo, es preciso aclarar que lo importante en la educación no es netamente la transmisión de conocimiento, sino el impacto formativo en el alumno (Ruiz y Danvila, 2019).

Una gran parte de la tecnología que se ha implementado actualmente está destinada a enriquecer la experiencia del aprendizaje. En una sociedad acostumbrada al entretenimiento digital y a los grandes espectáculos, la innovación educativa ha logrado estimular a las nuevas generaciones a aprender y cultivarse de conocimiento (Cruz, 2019). La innovación tecnológica demanda a que los alumnos no solo sean competentes en las materias académicas tradicionales que se imparten hoy en día, sino que también puedan conseguir optimizar sus tareas gracias a las actuales

competencias digitales, muy necesarias para el buen desenvolvimiento y manejo de los recursos tecnológicos que poseen avances acelerados. Otra actividad innovadora que ayuda mucho a los alumnos a desarrollar grandes habilidades, es la robótica. Esta rama de la ciencia fomenta la creatividad y capacidad analítica de los niños, preparándolos para el día a día y su futura vida profesional. En estas máquinas inteligentes, los alumnos adquieren diversas habilidades: solución de problemas, liderazgo, diseño y manejo de plataformas digitales, además de virtudes como la perseverancia, el orden y compañerismo (Marcelo, 2013).

Según la información brindada por la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) la tecnología educativa emplea un modo sistemático de concebir, aplicar y evaluar procesos de enseñanza, conociendo los recursos técnicos, humanos y la interacción que existen con ellos; se incluye a la robótica como una herramienta tecnológica con fines académicos y de estimulación infantil (Levis, 2008).

### ***Robótica como herramienta de apoyo en la educación Infantil***

La robótica como herramienta de enseñanza en niños permite actividades práctico-lúdicas, en el que se realizan tareas en múltiples áreas que llaman la atención en los estudiantes como: electrónica, programación, lenguaje y creatividad, con el objetivo de fomentar en los niños el interés por la tecnología de una manera divertida, haciéndolos interactuar por lo general con robots humanoides. La robótica para niños también facilita los procesos de aprendizaje, a través de métodos en los que los estudiantes participan con robots prototipos o programas y de este modo despiertan el interés personal por aprender (Galán, 2016).

La robótica para niños es una excelente forma de introducir conceptos y prepararlos para su futuro académico y laboral, que se basa en la capacidad

de estructurar y solucionar problemas, sin dejar de lado la creatividad. Pero este método de enseñanza - aprendizaje tiene que ser divertido, porque la mejor forma de aprender para un niño es jugando. Bien con juegos de construir robots, o bien en talleres y cursos entretenidos que capten su atención. A este tipo de actividades se les denomina STEM, las abreviaturas de ciencia (science), tecnología, ingeniería (engineering) y matemáticas. Es sólo una forma más moderna de nombrar a los juguetes y actividades educativas que abarcan la totalidad de disciplinas científicas (López, 2019).

Actualmente la robótica educativa involucra robots más personalizados, los cuales fomentan colaboración en entornos participativos, focalizando la sinergia de múltiples habilidades. A esto se le conoce como robótica social, una disciplina que permite a los robots tener comportamientos empáticos hacia las personas. Dentro de las capas de programación de estos robots, la inteligencia artificial les permite actuar con una capacidad social para relacionarse con su entorno (robot - humano). Estas relaciones han permitido desarrollar nuevas tecnologías encaminadas al arte robótico interactivo y la robótica de asistencia social (Johnson et al., 2014).

En la actualidad el teatro se ha incluido como una forma robótica educativa. Los teatros robóticos son un campo de investigación relativamente joven con una gran proyección a futuro. Andrés Peña en su modelo de control autónomo y cooperativo para robots (RoboAct), plantea que desarrollar guiones teatrales potencializará nuevas áreas como la robótica móvil, la robótica colaborativa y los robots sociales. Este proyecto plantea un modelo con características sobresalientes y las ontologías que deben estar presentes en las relaciones humano-robot. Todo esto validado por medio de la implementación de un prototipo funcional y la ejecución de escenarios de prueba directamente relacionados con el teatro (Peña, 2014).

### ***Robótica Social***

La robótica social o colaborativa es la rama de estudio de robots y sistemas que son capaces de interactuar y comunicarse entre ellos, con los seres humanos y con el medio ambiente, dentro de las estructuras social y cultural en las cuales se desenvuelven por medio de sensores y programación basada en algoritmos de inteligencia artificial (Causo et al., 2016). La robótica social se ha desarrollado a pasos agigantados con la aplicación de robots en actividades de rehabilitación, asistencia y terapia en niños y adultos, esto permitió que los avances tecnológicos se centren en mejorar este tipo de tareas y funciones de la robótica aportando flexibilidad, destreza y soluciones a problemas.

### ***Robot humanoide Nao***

Los robots sociales con mayor protagonismo e importancia en este campo, son aquellos que integran y simulan algunas características y comportamientos humanos como la capacidad de comunicarse y realizar gestos y movimientos, incluso son muy parecidos en cuanto al aspecto físico de las personas, de este modo se los conoce como robots humanoides.

Nao es un robot humanoide desarrollado por la empresa Softbank Robotics, es programable, autónomo y capaz de interactuar con naturalidad con todo tipo de usuario. Los robots Nao poseen la capacidad de percibir el entorno y desenvolverse a partir de sus múltiples sensores incorporados para captar los estímulos externos. Se comunican verbalmente por medio de sus sintetizadores de voz y poseen una gran capacidad de expresión corporal, lo que les permite tener un alto nivel de interactividad con personas (AliveRobotics, s.f.).

El robot incluye un software gráfico de programación y simulación llamado Coreograph que es compatible con múltiples sistemas operativos como Windows, Linux

y Mac. Permite programarlo con una gran variedad de lenguajes como C++, Python, JAVA, .NET y MATLAB. El robot mide 58 cm. de altura y tiene una masa aproximada de 5 kg., posee conectividad ethernet y wifi y su autonomía es de hasta 90 minutos en estado normal (AliveRobotics, s.f.).

### **Justificación e Importancia**

El avance tecnológico ha marcado el inicio de una era moderna, que con el pasar del tiempo se fortalece y se vuelve más ambiciosa. El ser humano ha encontrado varias vías para desarrollar herramientas tecnológicas que faciliten tareas de nuestro día a día. La robótica se ha convertido en un gran aliado para optimizar la productividad y calidad de espacios educativos, además ha generado beneficios para que los niños desarrollen pensamiento lógico y comportamientos basados en la ética y moral. Incluso se usan robots en la asistencia y terapia, en la enseñanza y muchas otras actividades didácticas en niños.

La robótica aplicada a la educación es una herramienta que se utiliza en escuelas y colegios de países del primer mundo como un modelo de acompañamiento a las actividades pedagógicas. Sus planes de estudio contemplan asignaturas que involucren la interacción con robots en horas planificadas. Los centros educativos promueven cursos extracurriculares de robótica para fomentar el interés por la ciencia, fortalecer conocimientos y ofrecer diversión con medios tecnológicos.

En los planes de estudio de la Básica Inicial, Básica Media y Bachillerato desarrollados por el Ministerio de Educación del Ecuador, únicamente se planifican asignaturas de “Cultura Digital” y Computación, sin abarcar un amplio abanico de herramientas tecnológicas que son necesarias para la formación académica. La robótica educativa puede a enriquecer la experiencia del aprendizaje, creando entornos participativos en los que se fomente la creatividad y despierte en los niños el interés

personal por aprender. Incluso la interacción con robots puede reforzar conocimientos adquiridos en otras asignaturas de una manera divertida, ya que los niños aprenden mejor jugando.

La robótica social no solo es una herramienta educativa, sino también se puede utilizar en la asistencia y terapia de niños con problemas neuropsicológicos como el TEA (Trastorno del Espectro Autista). Según el Ministerio de Salud Pública, en el Ecuador existen múltiples centros, programas y fundaciones para el tratamiento de niños diagnosticados con TEA, en los que se les brinda acompañamiento y terapias psicológicas. En la guía de práctica clínica para el tratamiento de esta discapacidad no se incluyen tecnologías y de manera específica a la robótica social como un método terapéutico para el TEA (Ministerio de Salud Pública, 2017).

Según datos obtenidos por la OMS en el 2018, por cada 100.000 personas 68 sufren de esta discapacidad, aproximadamente el 1% de la población mundial. En el año 2016, el Ministerio de Salud Pública reportó 1258 habitantes con autismo en el país, catalogando al TEA como “una enfermedad rara de baja prevalencia a ser atendida progresivamente” y clasificó a las personas que lo padecen como “discapacitadas en la comunicación/atención”, se pronostica que la cifra de personas que sufren de TEA vaya en aumento. Por ello es de gran importancia contribuir a la sociedad y desarrollar herramientas tecnológicas para combatir el impacto de esta discapacidad y mejorar el estilo de vida de las personas que lo padecen. A nivel mundial ya se han desarrollado proyectos de asistencia social en ambientes totalmente tecnológicos y han demostrado ser muy eficientes. Al realizar este proyecto de robótica social, el Ecuador se posicionará como un país comprometido con la salud de sus habitantes, que realiza esfuerzos para combatir el TEA desde edades tempranas y aplica herramientas tecnológicas para la solución de problemas sociales.

Según la revista Softban Robotics en el mundo existen más de 17 mil robots humanoides asistiendo a niños en escuelas. Con el motivo brindar ayuda social y fomentar el desarrollo de tecnología asistencial en el país, se propone la construcción de este teatro robótico, diseñado para crear un ambiente de entretenimiento e interacción con niños, permitiendo que aprendan, refuercen conocimientos y mejoren habilidades dentro de las estructuras social y cultural.

### **Alcance**

Desde el punto de vista mecatrónico, la robótica logra explotar todos los beneficios y ventajas de la fusión de la mecánica, electrónica y los nuevos modelos de inteligencia artificial y computación. El proyecto de titulación engloba el desarrollo e implementación de un teatro robótico con múltiples funciones automatizadas y la integración de tres robots humanoides Nao v6 como actores, pertenecientes al Laboratorio de Mecatrónica y Sistema Dinámicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

En la escenografía del teatro robótico se incluyen funciones automáticas como la apertura y cierre del telón y un elevador de presentación para los robots. De igual modo, la escenografía incluye un sistema audiovisual y de efectos especiales con luces led, una cámara de humo y un proyector de imagen. Se usarán robots virtuales en el caso de que la escena necesite actores extras o un relator. Se podrá interactuar y controlar el sistema por medio de una HMI. La programación para el proyecto se realizará en lenguaje Python, cuya licencia es de código abierto lo que facilita futuras publicaciones de este trabajo y la simulación se desarrollará en Coreograph, un software propio de los robots Nao.

El sistema de teatro robótico está conformado por 3 subsistemas:



- *Subsistema de Control:* En el cual desarrollaremos una interfaz gráfica (HMI) amigable para el usuario. Esta HMI será necesaria para monitorear el estado y controlar el funcionamiento del teatro y los robots. Permite establecer la conexión con los robots y partes mecánicas del sistema. Además, permite la creación de guiones teatrales y la interpretación de los mismos, a través de la gestión de las acciones de los robots actores y la escenografía automatizada. La interfaz se comunica con todo el sistema físico por medio de un protocolo MQTT ((Message Queue Telemetry Transport), el cual permite la transmisión de datos en paralelo y por su estructura de publicación – suscripción facilita la conexión modular de cada dispositivo integrado al teatro.

- *Subsistema de Escenografía:* Comprende el diseño e implementación física del teatro con toda la instrumentación (sensores y actuadores) necesaria para realizar las funciones automáticas. La apertura y cierre del telón tipo guillotina permite dar comienzo o finalizar cada escena. Se diseñó un mecanismo acoplado a un motor que es capaz de dar movimiento controlado al telón por medio de la HMI. La plataforma de elevación es un sistema muy utilizado en escenarios al inicio de una presentación y se diseñó un mecanismo tipo tijera que mueve la base del escenario en dirección vertical según se requiera en la obra teatral. La escenografía incluye un sistema audiovisual y de efectos especiales conformado por parlantes, un proyector de imagen, luces led y una cámara de humo que complementan la escena del guion que se estará interpretando. El funcionamiento de estos dispositivos se coordina desde de la HMI y están conectados a la red local por medio de una comunicación MQTT.

- *Subsistema de Actuación:* Comprende el desarrollo y programación de rutinas (gestos, sonidos y posturas) para cada uno de los robots actores Nao, en base a acciones básicas programadas en Python y que se pueden elegir desde la interfaz cuando se realice la creación de un guion. En esta selección se incluyen los diálogos de

cada escena, permitiendo escoger el tono de voz, así como el género y volumen en cualquier texto en español o inglés. La interpretación de los robots se desarrolla de forma sincronizada con los dispositivos automáticos de la escenografía y cada tarea se elige desde la HMI.

El teatro robótico será una herramienta de asistencia social que ayude al aprendizaje y entretenimiento de niños y sirva como apoyo terapéutico en el tratamiento del TEA (Trastorno del Espectro Autista). Estos subsistemas a implementar vinculan estímulos visuales (valoración del color), auditivos y de movimiento, lo que facilita atraer la atención del niño y mejorar sus habilidades al aumentar su compromiso por aprender.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Diseñar e implementar un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza de niños.

### ***Objetivos Específicos***

- Desarrollar una interfaz hombre maquina (HMI) para el control del sistema mecatrónico, integrando los robots y el teatro automatizado por medio del protocolo MQTT.
- Desarrollar la programación de los robots actores NAO y los dispositivos que conforman la escenografía del teatro.
- Diseñar y construir la escenografía del teatro robótico y sus mecanismos automatizados.

## **Estructura del Documento**

El documento redactado con la información del proyecto del Teatro Robótico está dividido en seis capítulos. El capítulo 1 plantea las generalidades del proyecto, en

donde se realiza la descripción de los antecedentes que encaminan el desarrollo de este proyecto, de igual manera se describe su justificación e importancia dentro de un contexto social nacional, se plantean los objetivos generales y específicos a cumplir y se detalla el alcance del proyecto, en donde también se realiza una breve descripción de los elementos y sistemas del Teatro robótico.

En el capítulo 2 se realiza una descripción general del estado del arte actual y los fundamentos teóricos del proyecto, entre los que se incluyen temas de asistencia y enseñanza en niños, la robótica de asistencia social, lenguaje de programación Python y el protocolo de comunicación MQTT.

El capítulo 3 contiene la metodología de diseño y construcción del subsistema de escenografía dividido en módulos estructurales, partiendo del dimensionamiento y selección de materiales hasta la fabricación y ensamble final de todos los mecanismos. Se desarrolla el subsistema de control del escenario, que contiene la programación de rutinas y funciones en Python y Arduino. Se dimensionan los actuadores y calibre del cable de los circuitos, además se seleccionan los microcontroladores, drivers y sensores.

El capítulo 4 posee el desarrollo de la HMI de control en QT Creator. Se programa el subsistema de actuación y las rutinas de los robots Nao. Se establece la comunicación por medio del protocolo MQTT.

En el Capítulo 5 se lleva a cabo la validación de los resultados obtenidos con el funcionamiento del teatro robótico. Se utilizan herramientas de evaluación y estadísticas para cuantificar el impacto social del proyecto.

El capítulo 6 contiene las conclusiones y recomendaciones de la realización de este proyecto de robótica de asistencia social. Se plantea el trabajo a futuro para mejorar el funcionamiento del teatro.

### **Conclusión de Capítulo 1**

El teatro robótico es planteado en base a la constante innovación de la tecnología y la robótica social como una herramienta de apoyo a la enseñanza y asistencia en niños. El proyecto de titulación engloba el desarrollo y construcción de un teatro robótico con múltiples funciones automatizadas entre ellas la apertura y cierre del telón y el movimiento de un elevador, junto a la integración de tres robots humanoides Nao v6 como actores. Al teatro se incluyen dispositivos audiovisuales y de efectos especiales para complementar la escenografía. El funcionamiento de todos los dispositivos participantes en el teatro robótico se monitorea y controla desde de la HMI diseñada y están conectados a la red local con un protocolo de comunicación MQTT. La programación se desarrollará en Python. El teatro robótico está conformado por tres subsistemas que permiten la sinergia total del proyecto: Control, Escenografía y Actuación.

## Capítulo 2

En este capítulo se expone información referente al estado del arte actual de la Robótica Social y su capacidad para atender y asistir necesidades humanas.

### Investigación Bibliográfica

La investigación bibliográfica permite comprender temáticas referentes al proyecto planteado y formular un criterio sobre aspectos generales comprendidos en el teatro robótico. Entre ellos la Tecnología aplicada a la Educación, la Robótica, el protocolo de comunicación MQTT y el Teatro.

### Robótica

La robótica es la ciencia destinada al diseño, manufactura, construcción, manejo, disposición estructural, operación y aplicación de robots. La robótica es considerada como una rama de la ingeniería mecatrónica ya que incluye principalmente sistemas mecánicos, eléctricos e informáticos. La robótica pretende encontrar formas eficientes y eficaces para la colaboración y asistencia entre robots y personas.

### *Evolución de la Robótica*

Los robots son máquinas diseñadas para cumplir un trabajo específico. Los humanos han diseñado y construido robots desde hace varios milenios, incluso mucho tiempo antes de conocer la palabra "Robot". Las civilizaciones egipcias construían estatuas o monumentos que emitían sonidos al recibir luz solar en el amanecer, esto fue en el año 1300 a.C., incluso crearon automatismos muy sofisticados como el reloj de agua. En china en el año 500 a.C. King-su Tse inventa un caballo de madera capaz de dar saltos y una urraca voladora con materiales naturales (Sánchez et al, 2007).

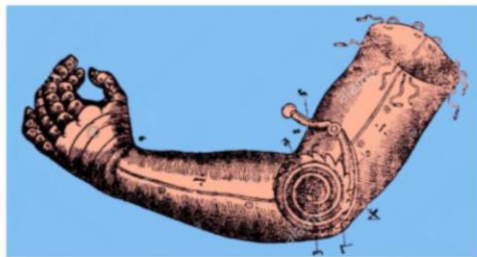
Se tiene constancia de que años más adelante en el 206 a.C. se encontró el tesoro de Chin Shih Hueng Ti, conformado por una orquesta mecánica de muñecos que

se movían de forma independiente. En el año 200 a.C. Filón de Bizancio creó un autómeta acuático y una catapulta automática. En la antigua Grecia Arquitas de Tarento creó el primer cohete autopropulsado de la historia, que usó con fines militares en aquella época (Sánchez et al, 2007).

En el año 62 d.C., el libro “Autómata” escrito por Herón de Alejandría muestra diseños de juguetes que pueden moverse por sí solos de manera repetida y otros mecanismos como la turbina a vapor. Más adelante, en el año 700 d.C. en china se construyen figuras de personas y animales que son capaces de cantar y danzar. En el siglo XII Al-Jazari construyó autómetas musicales impulsados por agua y posteriormente autómetas con aplicaciones en la cocina. El robot más antiguo que se conserva en la actualidad es el Gallo de Estrasburgo, un robot que forma parte de la catedral y mueve las alas y el pico con el pasar de las horas. Leonardo da Vinci construyó un león mecánico para el Rey Luis XII de Francia (Sánchez et al, 2007).

### Figura 1

*Ejemplos de Robots antiguos*



(a)



(b)

Nota: Obtenido de (Sánchez et al, 2007). (a) Prótesis de Extremidad Superior (b) el Papamoscas de la catedral de Burgos.

En el siglo XV ya se habían diseñado los primeros autómetas humanoides. un caballero con armadura, capaz de incorporarse flexionando sus extremidades inferiores, agitar los brazos, mover la cabeza y abrir y cerrar la mandíbula. En el siglo XVI

Ambroise Paré construye diferentes modelos de prótesis de extremidades del ser humano y en España, el Papamoscas de la catedral de Burgos, consiste en un hombre mecánico que se mueve con los cambios horarios y funciona hasta hoy día (Sánchez et al, 2007).

En los siglos posteriores el desarrollo de la inteligencia artificial fue paralelo al de la invención de autómatas. De igual manera los avances en modelos matemáticos permitieron pasar de la robótica clásica a la robótica moderna, la cual tiene a la computación como base de su funcionamiento. Para el siglo XVIII ya se había diseñado robots con fines industriales, como máquinas textiles y máquinas a vapor. Por otro lado, Nicola Tesla diseña un barco teledirigido al que se le considera el primer robot de la historia moderna. En el siglo XIX se construyen robots que son capaces de dibujar y de escribir. Sin embargo, la tecnología de la época no permitía que los robots se percaten de su entorno y únicamente cumplían la función para la que fueron diseñados (Rivera, 2016) (Sánchez et al, 2007).

### **Robótica en el siglo XX**

La palabra “Robot” se utilizó por primera vez en el año 1921 por Karel Čapek en la obra R.U.R. (Robots Universales Rossum), el término se deriva del vocablo checo “Robota” que significa trabajos forzados. En el año 1950 en el libro “I robot” escrito por Isacc Asimov, se nombra por primera vez la palabra “Robótica” y se postulan las tres famosas leyes de la robótica (Rivera, 2016) (Sánchez et al, 2007).

En este siglo con el avance acelerado en ciencias de electrónica y computación se diseñan y construyen robots sofisticados y multidisciplinarios dotados de sistemas inteligentes y fiables para que trabajen como aliados de las personas en diversas áreas. Se evoluciona de robots que cumplían tareas secuenciales en lazo abierto, sin entender

el entorno en el que trabajan a robots que integran sensores y sistemas en lazo cerrado para mayor precisión y aumentar su utilidad.

El primer brazo articulado o manipulador robótico se construye en el año 1938 por la compañía Devliss. Con este robot inicia una nueva era de producción industrial, en donde los robots empiezan a trabajar en espacios donde únicamente operaban obreros. En 1939, Westinghouse construye el primer robot humanoide llamado “Elektro” y junto a “Sparko” el perro mecánico son los robots más sofisticados de la época (Sánchez et al, 2007).

A mediados de los años 40 investigadores del Ballistic Research Laboratory (BRL) construyen la primera computadora digital del mundo llamada ENIAC, con ella la computación moderna se consolida. En 1947 la compañía de automóviles Ford inicia un plan de industrialización para sustituir a los obreros por robots en procesos pesados y riesgosos para las personas, acuñando el término “automatización”. El primer robot autónomo eléctrico fue construido por G. Walter en 1948 (Sánchez et al, 2007).

En 1951 con el invento del transistor se pueden fabricar computadoras y más potentes, veloces y de menor tamaño. En Inglaterra se construye el primer robot móvil autónomo de la historia, llamado ELSIE (ElectroLight-Sensitive Internal-External) en el año 1953. En 1962 se diseñan sensores más exactos, los sistemas de control retroalimentados con un lazo cerrado evolucionan al mundo. En 1970 un vehículo robótico equipado con varios sensores, llamado “Lunokhod” llega a la superficie lunar. En los años siguientes inician las investigaciones en temas relacionados a la inteligencia artificial, con el que las máquinas vayan adquiriendo habilidades de locomoción, habla, reconocimiento facial, comprensión y traducción de lenguajes, destreza manual, equilibrio y orientación espacial sin tener que seguir programas secuenciales. Se empiezan a construir robots más flexibles e inteligentes. Se crean



protocolos de comunicación como el Master-Slave, lenguajes de programación como el ATP (Automatically Programmed Tooling) el WAVE (Sánchez et al, 2007) (Rivera, 2016).

Los manipuladores o brazos robóticos van ganando campo en la industria y en 1978 se construye el robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) de Unimation, en 1981 se construye el robot SCARA en la Japón por Universidad de Yamanashi (Sánchez et al, 2007). En años próximos se investiga sobre controles informáticos y sensores más sofisticados, lo que potencia la construcción de robots inteligentes capaces de adaptarse al ambiente, interactuar y luego tomar decisiones. Para esta época existen robots autónomos con visión artificial, teleoperados, que tienen la capacidad de tomar sus propias decisiones y no operar bajo un programa establecido. Estos robots son aplicados en áreas domésticas, médicas, militares, espaciales, de movilidad y en la industria aérea, automovilística, alimenticia, metalúrgica, textil y farmacéutica.

En 1990 el MIT construye una cabeza robótica, llamada "Kismet", siendo este uno de los primeros robots sociales, ya que gesticula e interactúa con usuarios. En 1997 la compañía japonesa Honda fabrica un robot humanoide de 1,60 m de altura y de 130 kg de masa que es capaz de caminar por sus dos piernas que le brindan equilibrio, mejoran la tecnología de este robot hasta el año 2000, donde lanzan al mercado el robot "ASIMO", un robot de asistencia social para ancianos. Tiger Electronics presenta al robot "Furby", un robot mascota que reacciona ante los cambios del entorno y puede comunicarse con frases. Luego Sony lanza al mercado a "Aibo" un robot mascota canina con más funcionalidades. La robótica social gana espacio al final del siglo XX con robots como SIGMO, QRIO, ASIMO y Hubo que pueden caminar y moverse como las personas, gesticular expresiones y entablar conversación con pocas limitaciones,

además son capaces de realizar algunas tareas domésticas simples (Sánchez et al, 2007) (Pérez et al, 2017).

### **Robótica en la Actualidad**

Los robots se caracterizan por tener sensores más precisos y sofisticados, que envían la información recibida al controlador y las analizan mediante estrategias complejas de control para realizar una acción. Los robots son capaces de “adaptarse” y aprender del entorno basándose en modelos de inteligencia artificial, lógica difusa y redes neuronales. Con estos métodos de control se asegura la obtención de datos y su análisis correcto para optimizar su desempeño en el campo, obteniendo información en tiempo real y generando datos más confiables.

La tecnología se ha desarrollado de manera exponencial en los últimos años, prueba de ello son los robots médicos ocupados en el área quirúrgica que son muy precisos como el Da Vinci, de igual forma robots militares que desarticulan bombas, vuelan, vigilan y protegen de ataques; robots industriales que operan en ciclos de trabajo forzados en actividades de carga, soldadura, clasificación, reparación y mejoran la productividad de las empresas, robots espaciales que están en Marte recorriendo la superficie y tomando muestras, robots que asisten en hospitales a personas que necesitan rehabilitación física y monitorean el estado de salud de pacientes, robots educativos que instruyen a niños y adultos, robots que brindan terapia a personas con problemas neuropsicológicos como niños con autismo; robots recreacionales que permiten horas de diversión, robots que juegan campeonatos de fútbol o compiten en carreras de destrezas.

En la actualidad los robots realizan tareas de asistencia social, pueden caminar, hablar, jugar, cumplir tareas domésticas complejas con exactitud y ayudar a la vida

cotidiana de las personas. Los robots sociales son diseñados para trabajar en armonía con los humanos, no se crean para superar al hombre ni reemplazarlo en sus tareas sino para ayudarlo y asistirlo de una manera flexible, logrando que las personas se superen a sí mismas, aprendan, sean más productivas y obtengan los mejores resultados en tiempos reducidos.

La tendencia a futuro de la robótica apunta hacia robots que incorporen 100% inteligencia artificial, utilicen nuevos modelos y arquitecturas que aún se encuentran en desarrollo e investigación y se vean beneficiados por ciencias como la nanotecnología y los superconductores, reduciendo su tamaño físico y mejorando sus capacidades y autonomía. Pero sin lugar a duda, todas las aplicaciones de la robótica estarán encaminadas al mejoramiento de la calidad de vida de las personas y cuidado ambiental para proteger la fauna y la flora.

### ***Robótica Social***

La robótica social o colaborativa es la rama de estudio de robots y sistemas que son capaces de interactuar y comunicarse entre ellos, con los seres humanos y con el medio ambiente, dentro de las estructuras social y cultural en las cuales se desenvuelven por medio de sensores y programación basada en algoritmos de inteligencia artificial (Causo et al., 2016).

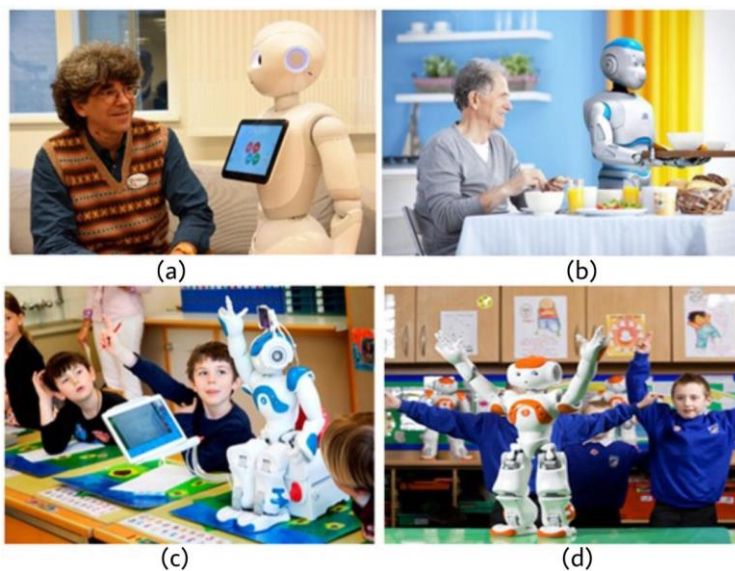
La robótica social actualmente es uno de los campos que está en constante desarrollo y en el que se planea tener impacto con este proyecto. Esta robótica tiene como fin la interacción de humano–robot. Son robots diseñados para acompañar o asistir en tareas a las personas, se caracterizan por tener un aspecto físico agradable que genera confianza y promueven la comunicación en múltiples sentidos, ya sea verbal, corporal o la asignación de comandos programados por medio de un dispositivo.

Generalmente son robots humanoides, cabezas robot o robots mascotas con formas de animales. Son robots autónomos ya que tienen la capacidad de tomar sus propias decisiones de acuerdo al comportamiento del entorno en el que interactúan, estos robots son especializados para encontrar formas eficaces de colaboración entre robots y personas. Tienen patrones de comportamiento empático hacia los humanos y crean entornos participativos para fomentar la interacción y comunicación con ellos.

Hoy en día se puede ver robots asistiendo a personas de la tercera edad a realizar tareas básicas, robots jugando con niños o ayudándolos con tratamientos y terapias psicológicas. En los siguientes puntos se describen los robots sociales más destacados que han sido construidos en la última década.

## Figura 2

*Robots de asistencia social (a) Pepper, (b) Robot Romeo, (c) y (d) Nao*



*Nota.* Obtenido de (a) (b) (Sabelli, Kanda & Hagita, 2016); (c) (d) (Fridin & Belokopytov, 2018).

### **Robot Romeo**

Romeo es un robot humanoide creado para ayudar a adultos mayores. El diseño y construcción completa de este robot no solo incluye a un grupo de ingenieros mecánicos y robóticos, sino también a ergonomistas, psicólogos y sociólogos que ayudaron a desarrollar este robot cumpliendo múltiples expectativas. La empresa francesa Aldebaran construyó este robot para que ayude a personas mayores con sus quehaceres domésticos y hasta puedan llegar a ser amigos compartiendo conversaciones e información que el robot guarda por su inteligencia artificial.

Romeo es capaz de captar las emociones de las personas para comportarse según la situación. Mide 1.46 m y tiene una masa de 40 kg. posee suaves rasgos faciales y puede subir escaleras, buscar objetos, abrir puertas y alcanzar cosas a su propietario. Puede recordar tareas pendientes, llamar a familiares o números de emergencia (Pateromichelakis et al, 2014).

### **Figura 3**

*Robot Romeo*



*Nota.* Obtenido de (Pateromichelakis et al, 2014).

### **Robot Sophia**

Sophia es un robot humanoide con un atractivo rostro femenino. Sus ojos son cámaras dotadas de visión artificial especializadas en el reconocimiento y detección

facial. Su piel está hecha de diferentes tipos de silicona frubbet que tiene un aspecto muy similar a la piel humana, permitiéndole realizar expresiones faciales muy naturales. El robot posee una voz sintética electrónica que le permite hablar con diferentes tonos y ritmos. Sophia es capaz de conversar, debatir sobre un tema y gesticular mientras pronuncia su discurso. La característica más humana de este robot es que Sophia puede aprender de la experiencia que obtiene sin tener la necesidad de programarla.

Sophia cada vez se familiariza más con diferentes culturas, costumbres, sentimientos y emociones de la gente con la que interactúa. Casi todos los usuarios con los que Sophia ha interactuado afirman que han vivido una experiencia emocional única (Retto, 2017).

#### **Figura 4**

*Robot Sophia*



*Nota.* Obtenido de (Retto, 2017).

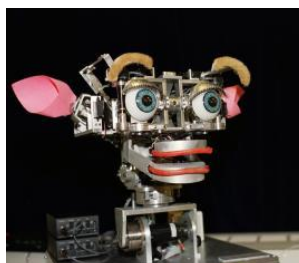
#### **Robot KISMET**

KISMET es una cabeza robótica diseñada para para la interacción con humanos. Este robot imita expresiones faciales, puede vocalizar algunas oraciones y también puede mover sus párpados, orejas, labios, mandíbula y cabeza. KISMET basa su funcionamiento dependiendo del entorno con el que interactúa, de este modo el robot se adapta a diferentes usuarios y contextos de comunicación. Este robot fue utilizado en un

experimento social con niños de hasta 13 años para analizar su comunicación y capacidad para generar amistad (Pérez et al, 2017).

### **Figura 5**

*Robot KISMET*



*Nota.* Obtenido de (Turkle, Breazeal, Dasté, & Scassellati., 2004).

### **Robot Atlas**

Atlas es un robot humanoide bípedo diseñado por Boston Dynamics. Este robot se caracteriza por su altura de 1.80 m y su capacidad para realizar acrobacias y movimientos en los que se necesita una gran destreza. Atlas está diseñado para ayudar a los servicios de emergencia para tareas de búsqueda y rescate.

Este robot es el que mejor imita los movimientos humanos, es capaz de mover absolutamente todo el cuerpo con total normalidad y equilibrio. Atlas es un robot robusto de 80 kg. y resiste a entornos hostiles de trabajo (Boston Dynamics, 2021).

### **Figura 6**

*Robot Atlas*



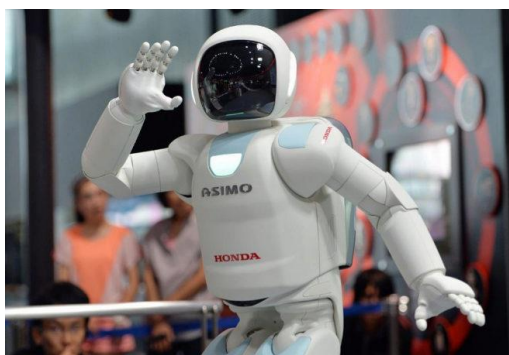
*Nota.* Obtenido de (Boston Dynamics, 2021).

## **Robot ASIMO**

ASIMO es un robot humanoide diseñado por Honda. Es una máquina autónoma con la capacidad de tomar decisiones y hacer cambios en su comportamiento de acuerdo al entorno en el que esté. Este robot es el resultado de más de 20 años de investigación de la empresa japonesa. Tiene grandes capacidades físicas de agilidad y balance, puede correr, correr en reversa y saltar. Tiene gran tecnología para el reconocimiento del entorno, capacidad de comportamiento autónomo (Honda, 2021). Con el diseño y desarrollo de ASIMO se pretende ayudar a las personas que carecen de movilidad completa en sus cuerpos (Pérez et al, 2017).

### **Figura 7**

*Robot ASIMO*



*Nota.* Obtenido de (Honda, 2021).

## **Robot Nao**

Nao es un robot humanoide desarrollado por la empresa Softbank Robotics, es programable, autónomo y capaz de interactuar con naturalidad con todo tipo de usuario. Los robots Nao poseen la capacidad de percibir el entorno y desenvolverse a partir de sus múltiples sensores incorporados para captar los estímulos externos. Se comunican verbalmente por medio de sus sintetizadores de voz y poseen una gran capacidad de expresión corporal, lo que les permite tener un alto nivel de interactividad con personas



(AliveRobotics, s.f.). En la actualidad es el robot más utilizado en proyectos de robótica social y de enseñanza, por su gran capacidad de percepción e interacción con el entorno. Nao es un robot que tiene gran impacto en la asistencia a niños, por ejemplo, como compañero de un niño diabético o autista y también es frecuente utilizarlos y programarlos para el ámbito educativo.

### **Figura 8**

*Robot Nao*



*Nota.* Obtenido de (AliveRobotics, s.f.).

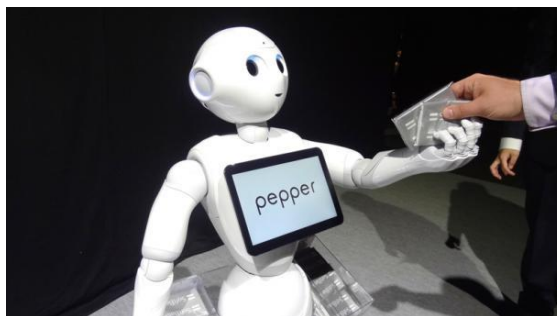
### **Robot Pepper**

El robot Pepper es el primer humanoide diseñado específicamente para convivir y relacionarse con humanos. Puede interpretar el estado de ánimo de las personas con las que interactúa y modificar su comportamiento, siendo siempre amigable e intuitivo (AliveRobotics, s.f.). Posee una pantalla táctil por la que se puede interactuar y modificar aspectos básicos de robot. Pepper ha sido utilizado como un robot recepcionista ya que incrementa la afluencia y atrae clientes. Pepper puede desenvolverse como promotor de productos explicando sus características, precios o recomendando el producto. Incluso este robot se ha utilizado como punto de

información de turistas dando información sobre ubicaciones y servicios disponibles, además puede escanear cupones, tickets, códigos (Pérez et al, 2017).

### **Figura 9**

*Robot Pepper*



*Nota.* Obtenido de (AliveRobotics, s.f.).

### ***Robótica Educativa***

Hoy en día la sociedad considera a los niños como nativos digitales, por lo que sus actividades académicas deben adaptarse a esta condición. La robótica es una herramienta interdisciplinaria que se puede aplicar en la educación. El constante avance de la tecnología y medios digitales ha permitido que los humanos aumenten la interacción con robots físicos o virtuales. Esta era tecnológica ha modificado la situación del conocimiento y ha transformado las formas de comunicación, educación y socialización (López, Martín & Gómez, 2010).

Se calcula que dentro de 10 años los nativos digitales constituirán el 70% de la población mundial. Es por ello que los procesos de aprendizaje deben adaptarse a las características de los individuos (García et al, 2007). Los nuevos métodos de educación asistida con tecnología generan otras posibilidades y escenarios de interacción del niño con su entorno y, por ende, de su proceso de formación académica y social (López, Martín & Gómez, 2010).

Los medios digitales y tecnológicos son fundamentales en la educación, ya que son las herramientas con las que más están familiarizados los alumnos actualmente. De igual manera, presentar la información y enseñar en este tipo de medios es más llamativo para los alumnos y pueden servir como una táctica para estimular el aprendizaje, utilizando formas creativas que involucren mayor interés en los estudiantes de todas las edades. La aparición de estas nuevas metodologías modernas han de ser empleadas para para mejorar el nivel educativo (Ruiz y Danvila, 2019).

Una gran parte de la robótica diseñada actualmente está destinada a enriquecer la experiencia del aprendizaje. En una sociedad acostumbrada al entretenimiento digital y a los grandes espectáculos, la innovación educativa ha logrado estimular a las nuevas generaciones a aprender y cultivarse de conocimiento (Cruz, 2019). Esta innovación tecnológica demanda a que los alumnos no solo sean competentes en las materias académicas tradicionales que se imparten hoy en día, sino que también puedan conseguir optimizar sus tareas gracias a las actuales competencias digitales, muy necesarias para el buen desenvolvimiento y manejo de los recursos tecnológicos que poseen avances acelerados.

La robótica es una ciencia que fomenta la creatividad y capacidad analítica de los niños, preparándolos para el día a día y su futura vida profesional. En estas máquinas inteligentes, los alumnos adquieren diversas habilidades: solución de problemas, liderazgo, diseño y manejo de plataformas digitales, además de virtudes como la perseverancia, el orden y compañerismo (Marcelo, 2013). Según la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) la tecnología educativa emplea un modo sistemático de concebir, aplicar y evaluar procesos de enseñanza, conociendo los recursos técnicos, humanos y la

interacción que existen con ellos; se incluye a la robótica como una herramienta tecnológica con fines académicos y de estimulación infantil (Levis, 2008).

La robótica educativa para niños es una excelente forma de introducir conceptos, mejorar la capacidad de estructurar y solucionar problemas, sin dejar de lado la creatividad (López, 2019). Pero este método de enseñanza - aprendizaje tiene que ser divertido, porque la mejor forma de aprender para un niño es jugando. Bien con juegos de construir robots, o bien en talleres y cursos entretenidos que capten su atención, facilitando los procesos de aprendizaje, a través de métodos en los que los estudiantes participan con robots, prototipos o programas y de este modo despiertan el interés personal por aprender (Galán, 2016).

La robótica como herramienta de enseñanza en niños permite actividades práctico-lúdicas, en el que se realizan tareas en múltiples áreas que llaman la atención como: electrónica, programación, lenguaje y creatividad; con el objetivo de fomentar en los niños el interés por la tecnología de una manera divertida, haciéndolos interactuar por lo general con robots humanoides. Esta interactividad con robots ha provocado en las generaciones actuales una necesidad por aprender nuevas habilidades y competencias cognitivas y digitales, así como el uso de recursos tecnológicos y medios de comunicación (López, Martín & Gómez, 2010).

### **Robótica aplicada en la educación de niños.**

A continuación, se detallan algunos de los proyectos desarrollados en el campo de la robótica educativa en niños, que han tenido grandes resultados y que su aplicación ha generado aportes beneficiosos en este campo de la robótica.

El constante desarrollo de la robótica educativa ha permitido que robots humanoides cumplan roles de compañeros de aprendizaje. En Emiratos Árabes Unidos

(EAU) se realizó un estudio en el que se emplearon robots Nao como asistentes de enseñanza en una escuela primaria. El grupo de investigadores utilizó temas de Matemática y Ciencias Naturales para demostrar que los niños estaban mucho más comprometidos al interactuar con el robot Nao que con un educador humano. Este artículo va más allá de la correcta integración de los robots con los niños, ya que los resultados demuestran que las clases con robots pueden ser multidisciplinarias y son una herramienta eficiente para los profesores (Mubin et al, 2019).

Las interacciones humano-robot pueden ser un factor importante en el desarrollo mental de los niños. Según Reika Omokawa y Shu Matsuura los niños que han nacido después del 2010 son la “generación de la inteligencia artificial” y para demostrar los diferentes servicios de la robótica social se presentó un robot Nao a estudiantes de una escuela primaria y mediante discusiones colaborativas con el robot se trató el tema “¿Qué es la vida para mí?”, junto con charlas de maestros, discusiones grupales y actividades concienciadoras para los niños se demostró que su experiencia con el robot logró generar comportamientos empáticos entre ellos, entusiasmo y bienestar y ayudó a formular pensamientos reflexivos sobre el cuidado ambiental y la unión familiar. Se comprobó que el robot asistente de enseñanza fue más eficaz que un docente humano para generar expresiones corporales y faciales en los niños y recibir respuestas verbales (Omokawa & Matsuura, 2018).

Los robots educativos no solo son eficaces con niños sino con adolescentes, en México un grupo de investigadores desarrollaron metodologías estructuradas con robots Nao para enseñar matemáticas en una escuela secundaria con alumnos de 12 a 16 años. Con los humanoides Nao como herramientas de asistencia a profesores, se demostró que la metodología utilizada mejoró el nivel de atención y motivación de los alumnos (López-Caudana, 2017).

Se han utilizado robots humanoides que siguen guiones programados para representar obras teatrales. Melissa Montalvo en su proyecto técnico con enfoque investigativo utilizó un robot Nao para la enseñanza y preservación de Tradiciones, Leyendas y expresiones orales del Ecuador. En este proyecto se utiliza a la robótica educativa como una herramienta de narración y difusión de contenido tradicional para niños y jóvenes (Montalvo, 2017).

### **Figura 10**

*Robot Nao interactuando con niños*



*Nota.* Obtenido de (Montalvo, 2017).

En la actualidad se han desarrollado varios proyectos de robótica orientados a las funciones teatrales, ya que se ha demostrado que este arte incurre en la educación como un medio de apoyo al aprendizaje (Celis, Cervantes & Escobar, 2020). Un grupo de ingenieros diseñaron “COBOT”, un teatro robótico educativo orientado a las emociones y el realismo. Los robots diseñados poseen capacidades expresivas y pueden transmitir adecuadamente el mensaje deseado a una audiencia para niños entre 7 y 11 años. Es importante señalar que no se utilizaron robots físicos, únicamente virtuales (Celis, Cervantes & Escobar, 2020).

### ***Robótica de Asistencia Social***

La robótica social es la rama de estudio de robots y sistemas que son capaces de interactuar y comunicarse entre ellos, con los seres humanos y con el medio ambiente, dentro de las estructuras social y cultural en las cuales los robots se desenvuelven por medio de sensores y programación basada en algoritmos de inteligencia artificial (Causo et al., 2016). La robótica social se ha desarrollado a pasos agigantados con la aplicación de robots en actividades de rehabilitación, asistencia y terapia en niños y adultos. Esto permitió que los avances tecnológicos se centren en mejorar este tipo de tareas y funciones de la robótica aportando flexibilidad, destreza y optimización en la solución a problemas.

Estos robots se utilizan principalmente en entornos con personas de la tercera edad, que no poseen control de todas sus habilidades o que se les dificulta realizar tareas básicas. Incluso adultos han utilizado robots sociales en actividades domésticas y laborales en los que el uso de robots facilita tareas, agiliza acciones y mejora la productividad. De igual forma, esta robótica asiste a personas que sufren de alguna lesión temporal, discapacidad permanente o alteración en sus capacidades intelectuales (Abad et al, 2017).

La robótica de asistencia social se ha aplicado en niños con TEA (trastorno del espectro autista) en los últimos años, teniendo importantes resultados en sus tratamientos, ya que se ha demostrado en investigaciones que el uso de robots en terapias provoca comportamientos de participación, atención conjunta e imitación de gestos y acciones (Scassellati, Admoni, & Matarić, 2014).

Actualmente la robótica de asistencia social involucra robots más personalizados, los cuales fomentan colaboración en entornos participativos, focalizando la sinergia de múltiples habilidades como la comunicación y expresión

corporal. Estos robots poseen comportamientos empáticos hacia las personas y son diseñados con el objetivo de mejorar la calidad de vida de sus usuarios. Dentro de las capas de programación de estos robots, la inteligencia artificial les permite actuar con gran capacidad social para relacionarse con su entorno robot – humano (Johnson et al., 2014).

### **Trastorno del Espectro Autista**

El trastorno del espectro autista o TEA es una afección a nivel cerebral con el que se nace y afecta a la comunicación y a toda forma de interacción social en la persona que lo padece, se caracteriza por generar graves déficits de desarrollo y aprendizaje que alteran la imaginación y la conducta. Este trastorno incluye patrones de comportamiento restringidos, repetitivos y estereotipados. La incidencia es de 60 casos por cada 10.000 niños (Monteiro, Spinks-Franklin & Treadwell-Deering, 2015).

El TEA puede ser detectado en los primeros años de infancia y al no ser tratado provoca problemas irreversibles en el desenvolvimiento social. Las personas que padecen trastorno del espectro autista repentinamente se vuelven introvertidas, agresivas y pierden capacidad de expresión y de lenguaje. El TEA altera el funcionamiento cerebral y a la configuración del sistema nervioso, por lo que cada niño presenta una combinación única de síntomas. Se utiliza el término “espectro” en el TEA ya que refiere a un amplio abanico de síntomas y niveles de gravedad en cada paciente (Monteiro, Spinks-Franklin & Treadwell-Deering, 2015).

Dependiendo del nivel de gravedad, el TEA genera deficiencias en la interrelación social y la comunicación, crea disminución de interés, menora la expresividad y las emociones y crea patrones anormales en el comportamiento y actividades que influyen en los problemas de razonamiento y retraso de aprendizaje,



creando verdaderos desafíos para los pacientes y las personas que conviven con ellos (Zúñiga, Balmaña, & Salgado, 2017).

En la siguiente tabla se describen los niveles de gravedad del TEA, junto con el comportamiento o patrón emocional, la capacidad de comunicación y el nivel de intervención psicológica necesaria.

**Tabla 1**

*Niveles de gravedad del TEA*

<b>Categoría del TEA en el DSM5</b>	<b>Intervención</b>	<b>Comunicación social</b>	<b>Comportamientos</b>
<b>Dentro de lo normal</b>	-	Aislamiento leve. No tiene interferencia en la comunicación social.	No interfiere
<b>Síntomas Sub Clínicos</b>	-	Presenta pocos síntomas. No hay interferencia significativa.	Excesivo o inusual interés, pero no interfiere.
<b>Grado 1</b>	Necesita ayuda	Presenta alteraciones significativas en el área de la comunicación social.	Presenta indiferencia significativa por lo menos en un contexto.
<b>Grado 2</b>	Necesita ayuda notable.	Muestra un déficit como también una limitada comunicación social, tiene respuestas cortas o atípicas.	Presenta interferencia frecuente y dificultad en el "cambio de foco"
<b>Grado 3</b>	Necesita ayuda muy notable.	Muy poca comunicación social.	Gran interferencia. Inflexibilidad y dificultades de cambio de foco de atención.

*Nota.* Recuperado de (Zúñiga, Balmaña, & Salgado, 2017).

Actualmente no existe una cura para las personas que sufren de trastorno del espectro autista, pero una detección temprana junto con el tratamiento intensivo puede hacer una gran diferencia en la vida de muchos niños. Para la detección de TEA se establecen tres niveles. El primer nivel conforma la vigilancia del desarrollo normal del niño; el segundo nivel detecta específicamente síntomas y comportamientos característicos del TEA y el tercer nivel exige una evaluación diagnóstica para la valoración y tratamiento por parte de un servicio especializado (Zúñiga, Balmaña, & Salgado, 2017).

El tratamiento del TEA a edades tempranas permite mejorar habilidades de comunicación y la conducta dependiendo del nivel de gravedad. Además de las clásicas terapias con profesionales de la salud, existen tratamientos con animales (perros entrenados) con los que se ha evidenciado resultados beneficiosos para el paciente y sus familias, ya que los animales generan la percepción de bienestar y seguridad. Además, la interacción con ellos estimula la comunicación y la concientización de los actos ya que el niño aprenderá a interpretar conductas dependiendo de su relación con el animal (Paredes-Ramos et al, 2012).

De igual manera existen tratamientos del TEA con fisioterapia, debido a que pueden producirse síntomas que afecten las capacidades motrices de los pacientes, haciendo que no tengan una correcta postura corporal. En investigaciones se demostró que especialistas en psicomotricidad y fisioterapia ayudan a niños con TEA a mejorar sus habilidades motrices en piscinas, tratando aspectos emocionales y conductuales (González & Canals, 2014).

La complejidad en el tratamiento del TEA por sus diferentes manifestaciones ha motivado a que la tecnología desarrolle métodos de intervención y terapia. En las últimas décadas se han desarrollado aplicaciones, programas y robots especializados en el tratamiento y enseñanza a niños con TEA. La tecnología de asistencia ha demostrado ser eficiente en el tratamiento de niños con TEA, ya que se pueden llevar a cabo estímulos multisensoriales a los pacientes en entornos controlados, mejorando su capacidad de atención y favoreciendo su aprendizaje (Totosa, 2018).

De igual manera la tecnología de asistencia ayuda a mejorar la comunicación y expresividad por medio de la robótica. Se ha demostrado que los pacientes con TEA tienen gran afinidad y atracción hacia los juguetes. Entre las razones de esta afinidad, está el comportamiento empático del robot, su capacidad comunicativa y motriz. La

previsibilidad del comportamiento repetitivo del robot es un factor reconfortante en los niños con TEA, el cual les brinda seguridad y confianza, ya que ellos no poseen la habilidad de adaptarse a cambios repentinos (Pinel C., 2016).

### **Robótica aplicada en personas con TEA**

Los robots sociales ayudan a los pacientes con TEA por medio de la asistencia física, terapia e interacción verbal y corporal. Los robots de asistencia social (SAR) están diseñados específicamente para ayudar de manera terapéutica a desarrollar habilidades de comportamiento social (Dickstein-Fischer & Fischer, 2014).

A continuación, se detallan varios proyectos desarrollados en el campo de la robótica social en pacientes con TEA. Estos robots son utilizados en terapias y tratamientos con el fin de mejorar la condición de los pacientes.

El proyecto desarrollado por Dickstein-Fischer & Fischer es Pabi, un robot de asistencia con forma de pingüino que posee la capacidad de interactuar con niños autistas mediante comunicación verbal, movimientos corporales y expresiones faciales. Este robot cumple de manera significativa las mismas funciones que un profesional al momento de brindar ayuda terapéutica (Dickstein-Fischer & Fischer, 2014).

### **Figura 11**

*Robot Terapeuta Pabi*



*Nota.* Obtenido de (Dickstein-Fischer & Fischer, 2014).

El robot asistente Bliss fue desarrollado a partir de un modelo de detección de atención basado en el comportamiento del niño durante las sesiones de terapia. Este robot visualiza el estado afectivo del niño autista y responde a estos de una manera personalizada para ayudar en la rehabilitación. De igual forma Bliss ayuda en intervenciones de aprendizaje de niños con TEA por medio de juegos (Santatiwongchai et al, 2016).

### **Figura 12**

*Robot asistente Bliss*



*Nota.* Obtenido de (Santatiwongchai et al, 2016).

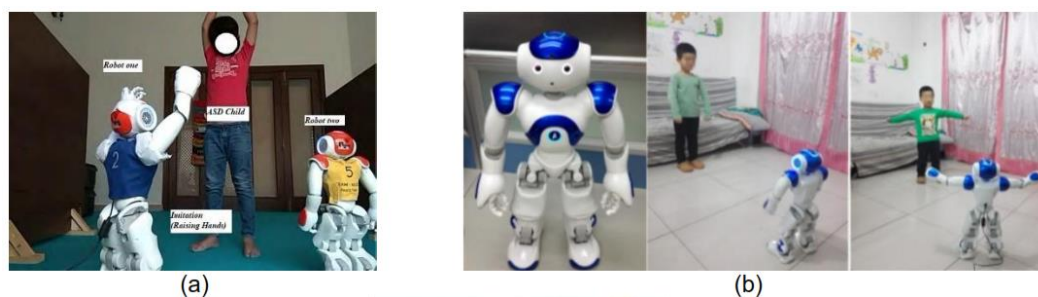
En la actualidad los robots más avanzados para la asistencia y terapia son los humanoides. Con la habilidad de poder comunicarse, ser empáticos con las personas y crear un ambiente de interacción y entretenimiento los robots humanoides Nao son muy utilizados para ayudar a niños con TEA. Proyectos investigativos recientes han demostrado la confiabilidad de terapias robóticas para mejorar las deficiencias de niños con autismo (Figura a). Uno de ellos, es un trabajo realizado por ingenieros y colaboradores de la IEEE en el que se usaron dos robots Nao con el objetivo de intervenir en la atención conjunta de los niños y permitir la interacción por módulos de imitación de movimiento y expresiones (Ali et al, 2019).

El trabajo desarrollado por los investigadores chinos Feng, Jia y Chu posee resultados satisfactorios para el tratamiento del TEA. El experimento se realizó con

niños autistas de categoría leve y mínima con un robot Nao para medir el “compromiso” y nivel de atención de los niños (Figura b). Este humanoide fue programado mediante el uso de una Red Bayesiana y lógica difusa con el fin de mejorar su capacidad autónoma en cada intervención (Feng, Jia & Chu, 2017).

### Figura 13

*Robots Nao en terapias con niños TEA*

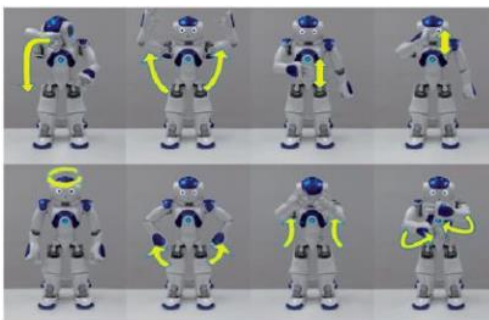


*Nota.* Obtenido de: (a) (Ali et al, 2019), (b) (Feng, Jia & Chu, 2017).

Otros investigadores presentan un trabajo en el que utilizan al robot Nao para enseñar gestos y expresiones corporales a niños con TEA. En este proyecto el robot es capaz de realizar 8 gestos mientras relata una breve historia, con el fin de mejorar las habilidades comunicativas de los niños y de mejorar su capacidad de reconocimiento de gestos básicos (So, Wong, Lam, Lam, & Fok, 2017).

### Figura 14

*Gestos realizados por el robot Nao*



*Nota.* Obtenido de: (So, Wong, Lam, Lam, & Fok, 2017).

Alan Prócel desarrolla un Teatro Robótico con 3 robots Nao de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Su proyecto es importante en el desarrollo de tecnología de asistencia social ya que la interacción humana – robot que permite el teatro es beneficiosa para mejorar las habilidades comunicativas y de expresiones corporales de los niños con TEA. El proyecto utiliza un protocolo de comunicación MQTT y por medio de una HMI amigable para el usuario, se programan los guiones clasificándolos en escenas y tareas, similar a como se realizan las obras de teatro de personajes humanos. El telón automático del teatro permite dividir las escenas de la obra y añade un estímulo visual para los niños (Prócel, 2021).

### Figura 15

*Teatro robótico ART*



*Nota.* Obtenido de: (Prócel, 2020).

### Protocolo MQTT

Es un protocolo diseñado para la comunicación de máquina a máquina (M2M), utilizado potencialmente en aplicaciones del Internet de las cosas (IoT). Sus siglas en inglés MQTT significan “Message Queuing Telemetry Transport”, este protocolo fue diseñado para el transporte de mensajes publicación/suscripción extremadamente

ligeros, orientado a dispositivos restringidos conectados a redes de bajo ancho de banda, alta latencia y poco fiables. Este protocolo MQTT fue creado por el Dr. Andy Stanford-Clark de IBM y Arlen Nipper de Arcom, en 1999 (MQTT Org.).

Este protocolo de comunicación será utilizado para monitorear y controlar todos los dispositivos que integran el sistema mecatrónico del teatro, requiriendo un ancho de banda mínimo y redes inalámbricas con calidad baja.

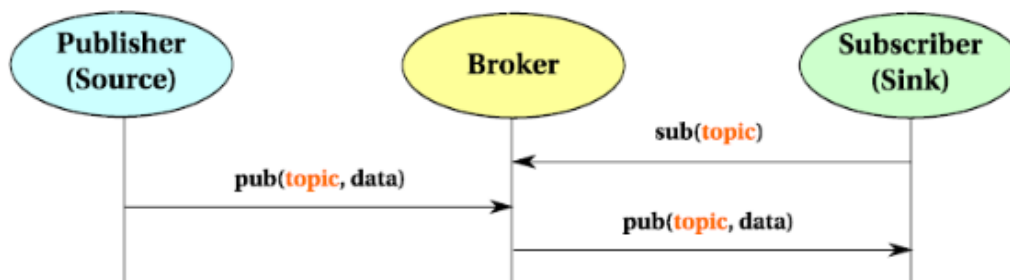
### **Arquitectura del Protocolo MQTT**

El MQTT utiliza un modelo de mensajería (envío y recepción) publicador/suscriptor (pub/sub). En este tipo de arquitecturas los clientes (publicadores o suscriptores) intercambian datos con un servidor central conocido como “broker”. De este modo se necesitan tres elementos para su funcionamiento. El publicador, el suscriptor y el broker (Hunkeler, Truong, & Stanford-Clark, 2008).

Las colas de envío y recepción de datos se organizan por asuntos o topics. Cada cliente puede publicar un determinado topic o recibir información de otros topics a los que está suscripto. Todos los mensajes circulan a través del broker, el cual regula la comunicación entre dispositivos, los topics están organizados jerárquicamente (Yassein et al, 2017).

### **Figura 16**

*Arquitectura del protocolo MQTT*



*Nota.* Obtenido de (Hunkeler et al, 2008).

El MQTT está basado en la pila TCP/IP como base de comunicación. Dispone de un mecanismo de calidad del servicio QoS (Quality of Service) que es una forma de gestionar la robustez del envío de datos al cliente ante fallos que pueden producirse. Usar un nivel u otro depende de las características y necesidad de fiabilidad del sistema, un mayor nivel de QoS requiere mayor tráfico de datos y por ende más carga que ralentiza el sistema de comunicación

El protocolo MQTT posee 3 niveles posibles de QoS, que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 2**

*Nivel de Calidad de servicio QoS*

Nivel de QoS	Significado
Nivel 0	El mensaje se envía una sola vez y se desconoce si llegó al destino.
Nivel 1	Cada mensaje se envía por lo menos una vez hasta que se conoce que el mismo llegó a su destino, pero se pueden generar duplicados.
Nivel 2	Se garantiza que el mensaje enviado llega al destino, y lo hace una sola vez

*Nota.* Obtenido de (Yassein et al, 2017).

### ***Funcionamiento del Protocolo MQTT***

El funcionamiento de este protocolo publicador/suscriptor inicia con la selección del servidor o broker, el cual es el encargado de gestionar todas las comunicaciones entre los clientes. Un broker muy utilizado actualmente por su confiabilidad y gratuidad es el servidor Mosquitto. Este se utilizará para establecer la comunicación entre los dispositivos del teatro robótico y se describen en los siguientes apartados

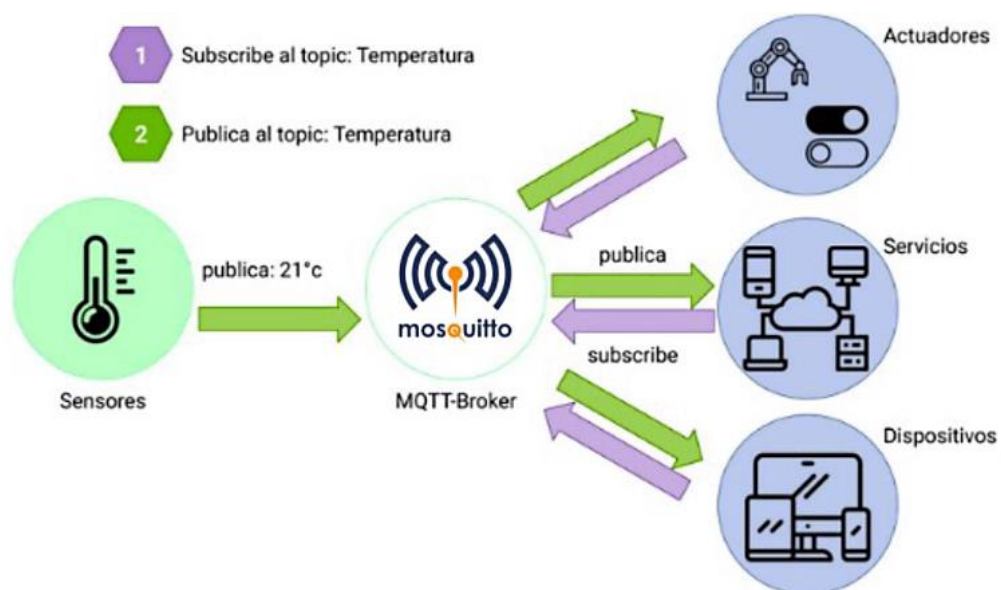
Todos los clientes (Sensores, actuadores, dispositivos electrónicos, ordenadores, robots) del sistema se conectan al servidor para poder realizar las funciones de publicadores, suscriptores o ambas a la vez. El dispositivo “cliente” que se conecta al broker como publicador solo podrá enviar mensajes, el cliente conectado



como suscriptor recibirá mensajes únicamente, mientras que el cliente conectado como publicador/suscriptor podrá enviar y recibir mensajes simultáneamente, los mensajes se envían y reciben por “topics”, todos los mensajes enviados por los publicadores llegarán al servidor (broker) y este se encargará de gestionar la información y distribuirla a todos los clientes suscriptores del topic en el que se publicó el mensaje.

**Figura 17**

*Protocolo de Comunicación MQTT*



*Nota.* Imágenes obtenidas de Internet, edición propia (PicsArt).

El nivel de QoS (Calidad de Servicio) utilizado en la red, interviene al instante en el que el broker reenvía los mensajes a los clientes suscritos a un topic específico. Un nivel de QoS 0, significa que el servidor se limitará a enviar el mensaje una sola vez y en el caso de que exista un error en la comunicación el suscriptor no podrá recibir el mensaje. En el caso de un nivel 1 de QoS, el broker enviará el mensaje la cantidad de veces que sean necesarias hasta confirmar que el cliente suscriptor lo ha recibido, por lo que ante un fallo en la comunicación el suscriptor podría recibir el mensaje más una sola vez provocando un error en la red. En el nivel 2 de QoS, el broker enviará el

mensaje más de una vez si es necesario, pero asegurándose de que el cliente suscriptor reciba el mensaje una sola vez (Prócel, 2020).

El mensaje que envía un cliente publicador, como un sensor de temperatura, por ejemplo, es direccionado a través de un topic como: "temperatura/elevador/motor". El mensaje enviado por este topic, será recibido por el broker, el cual lo reenvía a todos los clientes que se encuentren suscritos al mismo topic en el que se publicó el mensaje. Por lo tanto, un dispositivo (cliente) conectado como suscriptor, al topic "temperatura/elevador/motor" recibirá los mensajes que publique únicamente el sensor de temperatura. Los clientes suscriptores solo pueden recibir mensajes de publicadores conectados al mismo topic (Prócel, 2020).

### ***Mosquitto***

Mosquitto es un servidor MQTT de código abierto y distribuido por la licencia EPL/EDL. Este broker fue desarrollado por la fundación Eclipse y es uno de los más utilizados en la actualidad para aplicaciones de IoT (Internet of Things), ya que permite trabajar con múltiples lenguajes de programación como Java, Python o C++ y puede ser utilizado en los principales sistemas operativos como Android, iOS Windows, Mac OS y Linux. Se adapta para aplicaciones en dispositivos sencillos y de baja potencia hasta servidores completos. Además, permite el uso directo desde la consola, a través de las líneas de comando "mosquitto\_pub" y "mosquitto\_sub" (Mosquitto org, 2020).

Mosquitto fue diseñado para ser utilizado en aplicaciones de mensajería rápida y ligera, particularmente para dispositivos con recursos limitados o restringidos por su baja potencia. Mosquitto será utilizado como Broker MQTT local para la comunicación de todos los dispositivos conectados al Teatro Robótico, sin necesidad de tener acceso a internet.

## **Conclusión del Capítulo 2**

La Robótica Social avanza a pasos agigantados, cada vez existe tecnología más personalizada y optimizada para satisfacer necesidades, agilizar procesos y cumplir actividades cotidianas que mejoren la calidad de vida de las personas. Cada día la interacción con robots se vuelve más común y se ha demostrado su eficiencia y versatilidad para aplicarla en entornos controlados de aprendizaje para niños. Con una amplia investigación del estado del arte actual de la robótica y su uso en actividades de desarrollo y estimulación infantil estamos aptos para igualar y mejorar los proyectos que se han realizado a nivel mundial.

El teatro robótico será una herramienta de asistencia social que ayude al aprendizaje y entretenimiento de niños y sirva como apoyo terapéutico en el tratamiento del TEA (Trastorno del Espectro Autista), teniendo ventajas frente a otros proyectos como el uso de 3 robots humanoides Nao y robots virtuales que serán los personajes y narradores respectivamente, la escenografía mecatrónica que dispone de mecanismos automáticos, sistemas audiovisuales y efectos especiales que enriquecen la experiencia de las obras teatrales. Mediante el protocolo MQTT, los dispositivos conectados a la red local del Teatro Robótico podrán realizar tareas simultáneamente dando flexibilidad a las sesiones con niños y permitiendo más aforo de participantes para interactuar con los robots, superando a los proyectos en los que se utiliza un solo robot para un único usuario.

## Capítulo 3

### Diseño y Construcción de la Escenografía

En el tercer capítulo detallamos el diseño y construcción del subsistema de escenografía, el cual incluye la estructura del teatro, los mecanismos del telón automático y el elevador del escenario y dispositivos audiovisuales y de entretenimiento.

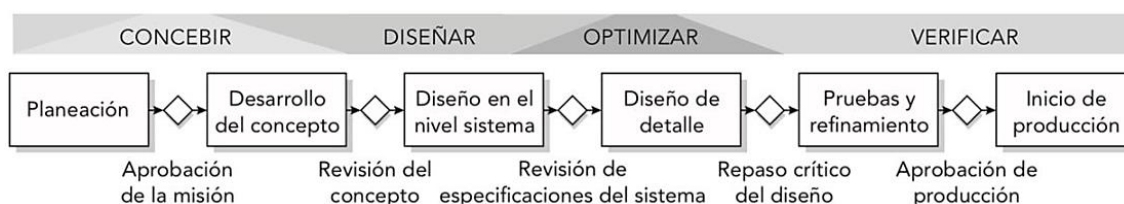
Para desarrollar los mecanismos propuestos se han dividido cada uno en módulos y submódulos, lo que permitirá detallar el proceso de construcción de una manera específica. Desde un enfoque mecatrónico podemos dividir los módulos en subsistemas mecánicos y electrónicos como se muestra en la figura.

#### Metodología de Diseño y Construcción

Para el diseño y la construcción de la estructura del escenario y cada mecanismo y sistema mecatrónico que forma parte de él, nos basamos en la Metodología “Proceso Genérico de Desarrollo de Producto” de los autores Karl Ulrich y Steven Eppinger en su libro “Diseño y Desarrollo de Productos”. Esta Metodología permite un proceso estructurado que consta de 6 fases las cuales cumplen con 4 etapas principales que son: Concebir, Diseñar, Optimizar y Verificar. El proceso genérico de diseño y desarrollo de productos se muestra en la siguiente figura.

#### Figura 18

##### Metodología de Diseño y Desarrollo de Productos

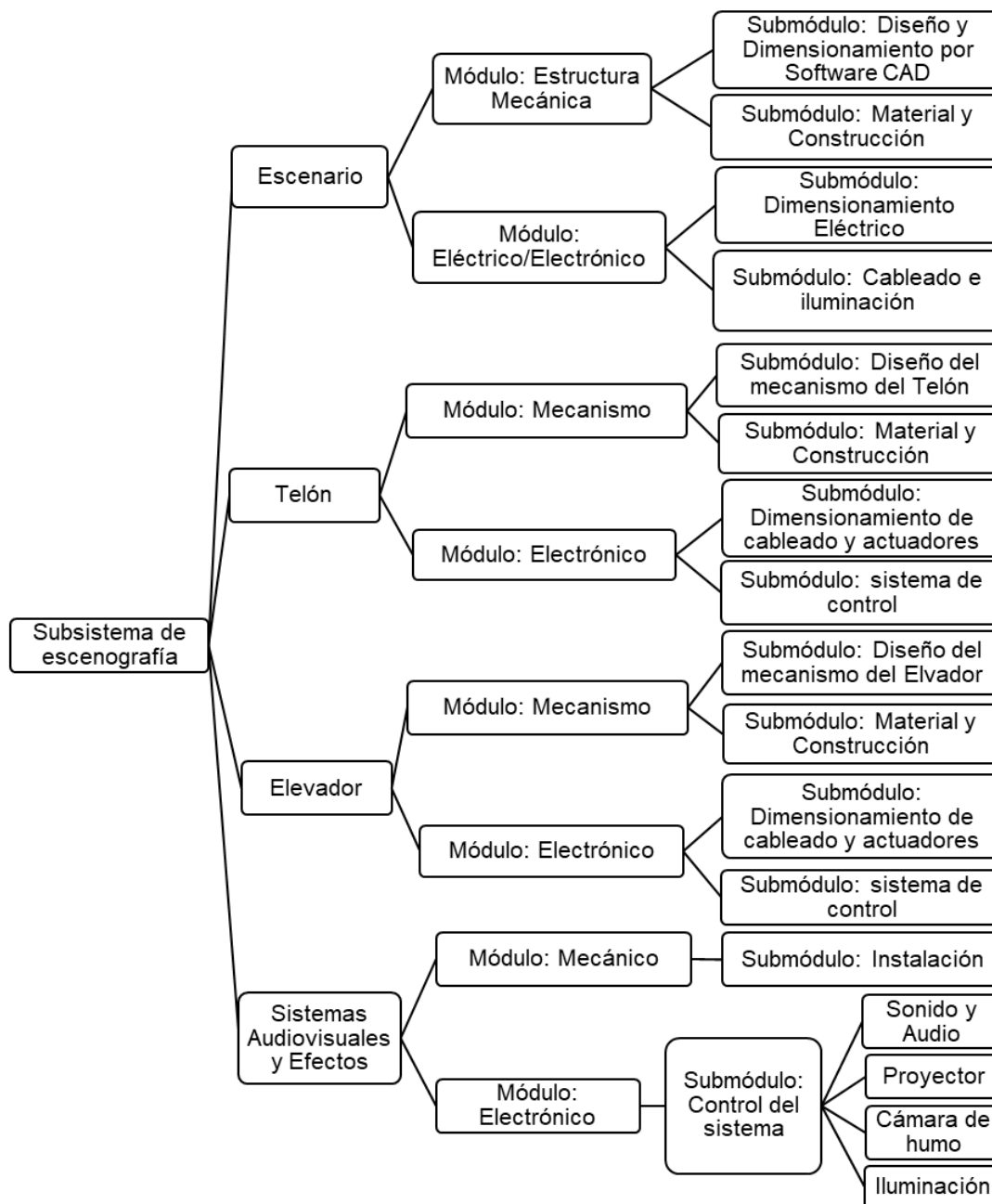


*Nota.* Obtenido de (Ulrich & Eppinger, 2013).

En la siguiente figura se muestran los módulos y submódulos en los que se han dividido el diseño y construcción de cada subsistema que forma parte del teatro robótico, describir el proceso de desarrollo del producto.

**Figura 19**

*Subsistema de escenografía*



*Nota.* Fuente propia.

A continuación, se desarrollará el diseño de cada componente del subsistema de escenografía del teatro robótico, cumpliendo las etapas propuestas por Karl Ulrich y Steven Eppinger para el desarrollo de productos y siguiendo la estructura de Módulos y Submódulos en los mecanismos a construir. La etapa de planeación y desarrollo del concepto permitirá concebir ideas para el diseño y plantear requerimientos y condiciones necesarios en el funcionamiento.

### **Etapa de Planeación**

Esta fase comienza por la identificación de oportunidades estratégicas y la realización de un proceso de recopilación de ideas para plantear una descripción del producto final. Es importante evaluar las nuevas tecnologías disponibles para el desarrollo de cada mecanismo de este subsistema de escenografía. Debemos considerar la arquitectura y requerimientos a cumplir en el producto final que es el teatro robótico conformado por cada mecanismo previamente detallados. En esta etapa se crearán las mediciones funcionales de especificación y desempeño.

### ***Consideraciones y Requerimientos***

Estas condiciones guiarán el diseño de los módulos especificados para el subsistema de escenografía.

### **Investigación de Parámetros educativos, cognitivos y sociales.**

El Teatro Robótico es una herramienta tecnológica que tiene como objetivo asistir a niños en actividades de aprendizaje escolar y terapias para niños con trastorno del espectro autista (TEA). Estos robots poseen comportamientos empáticos hacia las personas y son diseñados con el objetivo de mejorar la calidad de vida de sus usuarios.

El teatro robótico usado como herramienta educativa supone un medio tecnológico versátil que mejora los procesos de enseñanza, ya que los niños se

muestran atraídos a las rutinas que realizan los robots en cada sesión, por lo que se muestran más comprometidos por interactuar y aprender. Por otro lado, los robots son flexibles a cambios y pueden adaptarse al entorno, es decir, al contenido que se desea impartir o a los niños que se dirigen. La interacción con robots enriquece la experiencia de aprendizaje y no solo facilita su proceso de formación académica sino también su desarrollo social, porque la mejor forma de aprender para un niño es jugando.

El teatro robótico también será una herramienta de asistencia social y estará orientado al tratamiento de niños que padecen TEA (Trastorno del Espectro Autista). Con la investigación bibliográfica realizada queda demostrado que el uso de robots en las terapias provoca comportamientos de participación, atención conjunta e imitación de gestos y acciones, focalizando el mejoramiento de múltiples habilidades como la comunicación y expresión corporal.

Las consideraciones y sugerencias a tomar en cuenta en este proyecto de robótica social son:

- Estructura amplia que sea resistente y de fácil transporte o movilidad
- Estructura estable y suficientemente robusta
- Apariencia atractiva y de fácil fabricación
- Funcionamiento ágil y sencillo
- Crear un ambiente teatral asistido con los componentes audiovisuales
- Evitar que partes móviles estén al alcance de los usuarios
- Evitar que cables y otros dispositivos electrónicos estén expuestos a la vista y al contacto de los usuarios

- Evitar movimientos bruscos de los robots, de los componentes mecánicos y sonidos fuertes

### Identificación de Necesidades

Tomando en cuenta las consideraciones del apartado anterior, realizamos el análisis de importancia de las necesidades identificadas para el desarrollo del subsistema de escenografía. Se calificará con una escala del 1 al 5 a las necesidades de mayor interés y significancia para este proyecto, siendo 5 el nivel de importancia más alto y 1 el de menor consideración. A continuación, se muestran las tablas de necesidades del Escenario, Telón, Elevador y efectos Audiovisuales.

**Tabla 3**

*Necesidades y requerimientos en el Escenario*

No.	Necesidades	Importancia (1-5)
1	Fácil Fabricación	3
2	Materiales de fácil maquinabilidad y accesibilidad	3
3	Estructura liviana y de fácil transportación	4
4	Movimiento de mecanismos fluidos y vistosos	4
5	Área de actuación para robots	5
6	Bajo Costo	4
7	Apariencia atractiva del teatro y componentes	5

*Nota.* Fuente propia, ponderación realizada con el grupo de trabajo.

**Tabla 4**

*Necesidades y requerimientos en el telón*

No.	Necesidades	Importancia (1-5)
1	Fácil Fabricación y mantenimientos sencillos	4
2	Materiales de fácil maquinabilidad y accesibilidad	3
3	Estructura liviana y resistente	4
4	Tipo de Movimiento del mecanismo	2
5	Velocidad y suavidad en el movimiento (apertura y cierre)	4
6	Apariencia llamativa del telón	5

*Nota.* Fuente propia, ponderación realizada con el grupo de trabajo.



**Tabla 5***Necesidades y requerimientos en el Elevador*

No.	Necesidades	Importancia (1-5)
1	Fácil Fabricación y mantenimientos sencillos	4
2	Materiales de fácil maquinabilidad y accesibilidad	3
3	Estructura liviana y resistente	3
4	Tipo de Movimiento del mecanismo	4
5	Velocidad y suavidad en el movimiento	4
6	Apariencia llamativa del Elevador	3

*Nota.* Fuente propia, ponderación realizada con el grupo de trabajo.

**Tabla 6***Necesidades y requerimientos en los Efectos Especiales*

No.	Necesidades	Importancia (1-5)
1	Fácil Instalación y mantenimientos sencillos	3
2	Dispositivos de fácil accesibilidad y compatibilidad	4
3	Calidad de Sonido	4
4	Calidad de Imagen del Proyector	4
5	Iluminación y color	3
6	Efectos atractivos y vistosos	4

*Nota.* Fuente propia, ponderación realizada con el grupo de trabajo.

**Métricas**

Basándonos en la metodología de Karl Ulrich y Steven Eppinger para el diseño y desarrollo de productos, los requerimientos y necesidades se pueden traducir a métricas.

Las métricas son valores que traducen el lenguaje común a información técnica, los cuales pueden ser medidos y analizados para el desarrollo del producto final. Las métricas para el subsistema de escenografía se desarrollaron en el grupo de trabajo y se muestran en las tablas 7, 8, 9, y 10.

**Tabla 7***Métricas de la escenografía*

No.	Necesidad	Métricas	Imp (1-5)	Unidades
1	3	Peso	4	kg
2	1,2,3	Tiempo de ensamblaje	4	horas
3	4	Potencia de actuadores y dispositivos	3	Watts
4	3,4	Tiempo de movimiento de mecanismos	3	Segundos
5	5	Superficie de actuación	4	m <sup>2</sup>
6	6,7	Tipo y Calidad de dispositivos	4	Subjetivo
7	2,6,7	Costo	3	Dólares

*Nota.* Fuente propia.

**Tabla 8***Métricas del telón*

No.	Necesidad	Métricas	Imp (1-5)	Unidades
1	3	Peso	4	kg
2	1,2,4	Tiempo de ensamblaje	4	horas
3	4,5	Potencia de actuadores	3	Watts
4	1,3,4	Velocidad de apertura y cierre del telón	3	m/seg.
5	6	Tipo y Calidad de dispositivos	4	Subjetivo
6	1,3,4,5	Diseño del Mecanismo	4	Subjetivo

*Nota.* Fuente propia.

**Tabla 9***Métricas del elevador*

No.	Necesidad	Métricas	Imp (1-5)	Unidades
1	3	Peso	4	kg
2	1,2,4	Tiempo de ensamblaje	4	horas
3	4,5	Potencia de actuadores	3	Watts
4	1,3,4	Velocidad del movimiento	3	m/seg.
5	6	Tipo y Calidad de dispositivos	4	Subjetivo
6	1,3,4,5	Diseño del Mecanismo	4	Subjetivo

*Nota.* Fuente propia.

**Tabla 10***Métricas de efectos especiales*

No.	Necesidad	Métricas	Imp (1-5)	Unidades
1	3,4,5,6	Costo	4	Dólares
2	3,4,5	Potencia de los dispositivos	4	Watts
3	4	Resolución del Proyector	3	Pixeles
4	1,2	Tipo y Calidad de dispositivos	3	Subjetivo
5	4,5	Cantidad de luz	4	Lúmenes
6	2	Tiempo de conexión	3	Segundos

*Nota.* Fuente propia.

**Matrices de necesidades y métricas**

Siguiendo la metodología del Diseño y Desarrollo de productos, se debe configurar matrices de Necesidades y Métricas establecidas para identificar y verificar que al menos existe una métrica satisfaciendo alguna necesidad del subsistema:

**Tabla 11***Matriz de Métricas y necesidades de la escenografía*

No.	Necesidad	Métrica						
		1	2	3	4	5	6	7
		Peso	Tiempo de ensamble	Potencia de actuadores y dispositivos	Tiempo de movimiento de mecanismos	Superficie de actuación	Tipo y Calidad de dispositivos	Costo
1	Fácil Fabricación		X					X
2	Materiales de fácil maquinabilidad y accesibilidad		X					
3	Estructura liviana y de fácil transportación	X	X		X			
4	Movimiento de mecanismos fluidos y vistosos			X	X			
5	Área de actuación para robots					X		
6	Calidad de efectos audiovisuales						X	X
7	Apariencia atractiva del teatro y componentes						X	X

*Nota.* Fuente propia.

**Tabla 12***Matriz de Métricas y necesidades del telón*

No.	Necesidad	Métrica						
		No.	1	2	3	4	5	6
			Peso	Tiempo de ensamble	Potencia de actuadores	Velocidad de apertura y cierre del telón	Tipo y Calidad de dispositivos	Diseño del Mecanismo
1	Fácil Fabricación y mantenimientos sencillos			X		X		X
2	Materiales de fácil maquinabilidad y accesibilidad			X				
3	Estructura liviana y resistente		X			X		X
4	Tipo de Movimiento del mecanismo			X	X	X		X
5	Velocidad y suavidad en el movimiento				X			X
6	Apariencia llamativa del telón						X	

*Nota.* Fuente propia.**Tabla 13***Matriz de Métricas y necesidades del elevador*

No.	Necesidad	Métrica						
		No.	1	2	3	4	5	6
			Peso	Tiempo de ensamble	Potencia de actuadores	Velocidad del movimiento	Tipo y Calidad de dispositivos	Diseño del Mecanismo
1	Fácil Fabricación y mantenimientos sencillos			X		X		X
2	Materiales de fácil maquinabilidad y accesibilidad			X				
3	Estructura liviana y resistente		X			X		X
4	Tipo de Movimiento del mecanismo			X	X	X		X
5	Velocidad y suavidad en el movimiento				X			X
6	Apariencia llamativa del Elevador						X	

*Nota.* Fuente propia.

**Tabla 14**

*Matriz de Métricas y necesidades de los efectos audiovisuales y especiales*

No.	Necesidad	Métrica						
		No.	1	2	3	4	5	6
			Costo	Potencia de los dispositivos	Resolución del Proyector	Tipo y Calidad de dispositivos	Cantidad de luz	Tiempo de conexión
1	Fácil Instalación y mantenimientos sencillos					X		
2	Dispositivos de fácil accesibilidad y compatibilidad					X		X
3	Calidad de Sonido	X	X					
4	Calidad de Imagen del Proyector	X	X	X			X	
5	Iluminación y color	X	X				X	
6	Efectos atractivos y vistosos	X						

*Nota.* Fuente propia.

### **Desarrollo del Concepto**

En esta fase se debe desarrollar conceptos de diseño investigando la factibilidad de los materiales y procesos que darán como resultado el producto final. Se realizan estimaciones de costo y el nivel de precisión requerido en el diseño, dependiendo del grado de importancia y complejidad del producto.

Basándonos en la metodología del Proceso Genérico de Desarrollo de Productos de los autores Karl Ulrich y Steven Eppinger podemos Desarrollar el Concepto del producto previo al Diseño a nivel de sistema y Diseño a nivel de detalle, lo cual facilita los procesos de selección de material, agiliza el dimensionamiento y cálculos de diseño, acelera el proceso de construcción y permite añadir mejorar y corregir errores durante el desarrollo del producto.

### ***Diseño Primario del Subsistema de Escenografía***

Para el diseño de cada elemento que compone el subsistema de escenografía se hará una selección de materiales que cumplan con los requerimientos de resistencia, peso, maquinabilidad y accesibilidad, lo que garantice una estructura liviana y a la vez resistente que sea fácil de transportar, fácil de ensamblar y de mantenimientos mínimos en el caso que se requiera.

Para el resto de módulos se realizará un diseño a nivel básico en el que se determine el modelo del mecanismo a utilizar. Un análisis de todas las características mecánicas servirá como guía para el posterior desarrollo de los subsistemas a un nivel más específico, en el que se consideren parámetros más exactos para el diseño.

#### **Módulo Escenario: Estructura**

La estructura del teatro robótico es el esqueleto que sostiene a todo el sistema, por ello es el módulo de mayor volumen y peso. La estructura debe brindar estabilidad durante el funcionamiento del teatro, por ello en el diseño se garantizará que sea resistente y soporte los esfuerzos o cargas que se produzcan. Además, la estructura se encarga de evitar deformaciones y transferir todo el peso del sistema a los puntos de apoyo sobre el suelo.

Este módulo consta principalmente de vigas (elementos en horizontal) que están sometidas a esfuerzos de flexión y a columnas (elementos en vertical) que trabajan con esfuerzos de compresión. La estructura del escenario posee varios atributos como el de absorber las vibraciones producidas al poner en marcha los motores de los otros elementos de este subsistema como el elevador y el telón, brinda rigidez para no sufrir deformaciones cuando se aplican cargas externas y además debe poseer un buen acabado superficial y ser atractiva a la vista ya que es la fachada principal del teatro

robótico. La estructura base se cubrirá con paneles de mdf delgados para disminuir el impacto visual de los soportes mencionados.

El material seleccionado para conjunto de vigas y columnas de la estructura del escenario es madera, específicamente roble por sus propiedades mecánicas. El roble es una madera de fibra recta y tamaño de grano medio, conocida por su durabilidad, apariencia, resistencia y facilidad para trabajar. Es la opción favorita para fabricantes de muebles, suelos o parquets, chapas decorativas y marcos de ventana, es muy común utilizar roble para la fabricación de barcos y barriles de vino por su impermeabilidad. A continuación, se nombran algunas de sus características físicas:

- Resistencia a la humedad
- Posee variedades de color
- Es una madera densa (desde los 700 a 770 kg/m<sup>3</sup> con una humedad al 12%)
- Es de fácil manipulación y maquinabilidad
- Es duradera y resistente. Soporta grandes esfuerzos sin romperse y posee buena flexibilidad (propiedad de plasticidad)
- Logra tener un buen acabado con barniz y pinturas
- Madera anhidra con capacidad de ser aislante eléctrico

La madera de roble es de las más populares en la construcción por sus características y propiedades mecánicas, resistencia a agentes bióticos (Hongos e insectos) y agentes abióticos (Humedad y Rayos U.V.) siendo un material capaz de resistir a la intemperie. En la siguiente tabla se muestran las propiedades mecánicas (comportamiento de un material ante las fuerzas aplicadas sobre él) de este material:

**Tabla 15***Propiedades mecánicas y físicas del roble*

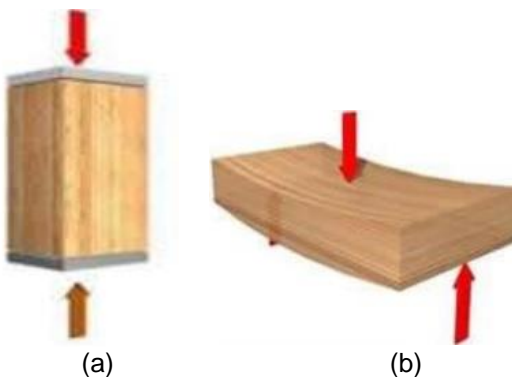
<b>Propiedades Mecánicas y Físicas (en kg/cm<sup>2</sup>)</b>					
<b>Material</b>	<b>Compresión</b>		<b>Tracción</b>		<b>Flexión</b>
	Paralela a las fibras - Carga de Rotura	Normal a las fibras - Carga de Rotura	Paralela a las fibras - Carga de Rotura	Normal a las fibras - Carga de Rotura	Carga de Rotura
Roble	520	163	832	45	1050
<b>Módulo de elasticidad</b>	123000 kg/cm <sup>2</sup>				
<b>Densidad</b>	740 kg/m <sup>3</sup> al 12% de humedad (Madera semipesada)				
<b>Dureza</b>	5.1 en el test de Monnin (Madera Semidura)				
<b>Estabilidad Dimensional</b>	Coeficiente de contracción volumétrico: 0,43% madera medianamente nerviosa				
<b>Resistencia al cizallamiento</b>	Paralelo a las fibras - Desgarramiento	28	Normal a las fibras - Cortadura	90	kg/cm <sup>2</sup>

*Nota.* Tabla obtenida de (Vilches & Correal, 2013).

La estructura estará compuesta por barras cuadradas de roble de 40 mm por lado. El escenario cumple con el requerimiento de ofrecer facilidad en el transporte y ensamble, por lo que el diseño se basará en paredes desmontables. Las propiedades mecánicas de la madera dependen de la dirección de la aplicación de la carga respecto a la dirección de las fibras, esta característica se denomina anisotropía.

**Figura 20**

*Barras de madera sometidas (a) esfuerzo a compresión (b) esfuerzo a flexión*



*Nota.* Obtenido de (Vega, 2016).



La compresión es una fuerza que tiende a aplastar o comprimir el material, resulta de la aplicación de dos cargas de igual dirección, pero en sentido contrario y tienden a acortar la longitud del material. La flexión resulta de la combinación de esfuerzos de compresión y tracción. Las fibras superiores del material sometido a flexión tienden a alargarse, mientras que las inferiores se acortan o viceversa, produciendo una deformación a lo largo del eje longitudinal que dobla al material. El esfuerzo que produce la flexión en una pieza se denominado Momento Flector.

Los elementos dispuestos en posición vertical actuarán como columnas y trabajarán a esfuerzos de compresión con la carga aplicada longitudinalmente a las fibras, soportando cargas de hasta de  $520 \text{ kg/cm}^2$ . Mientras que las barras posicionadas horizontalmente trabajarán a flexión estática, con esfuerzos perpendiculares a las fibras del material y admitiendo cargas de hasta  $1050 \text{ kg/cm}^2$ . Teóricamente los árboles están diseñados por la naturaleza para resistir con eficacia estos esfuerzos a los que se ven sometidos todos los días, la flexión producida por la acción del viento y la compresión producida por el propio peso del árbol y las acciones gravitatorias.

Las dimensiones del teatro robótico serán  $2.15 \text{ m.} \times 2.20 \text{ m.} \times 1.40 \text{ m.}$  (altura x ancho x largo). El piso del escenario estará a 1.10 metros desde el suelo, que es la altura de una persona promedio mientras está sentada. La cabina de actuación tendrá una altura de 1.10 metros, ya que los robots Nao con los brazos elevados tienen un alto aproximado de 80 centímetros y es necesario dejar un espacio libre para la iluminación y el mecanismo del Telón.

Para el ancho del escenario se consideró la separación que debe existir entre cada Robot, ya que al realizar los gestos con los brazos extendidos horizontalmente cada uno medirá 60 centímetros, si tomamos en cuenta una separación de 10 centímetros entre los 3 robots y las paredes los 2.20 metros de ancho en el escenario

son justificados. El largo de 1.40 metros del teatro se debe la capacidad que poseen los robots humanoides para caminar. Los Nao pueden desplazarse 1 metro en 10 segundos, por lo que necesitan una superficie espaciosa para realizar esta tarea sin que se vuelquen fuera del escenario o choquen con algún elemento como el telón.

### **Módulo Telón: Mecanismo**

El telón es un elemento que cubre el escenario de un teatro antes y después de un espectáculo. Además de las funciones decorativas del telón, este se utiliza para cubrir la escenografía y así dar inicio y fin a los guiones teatrales que componen una obra.

El diseño del Telón del escenario requiere que este sea liviano, tenga una apariencia llamativa, ocupe un espacio reducido y tenga fluidez en el movimiento. Existen varios tipos de configuraciones de movimiento como la de estructura plegable, telescópica y enrollable. A continuación, se realiza una descripción de cada configuración de movimiento:

#### *a) Configuración Plegable*

Este movimiento consiste en la división de espacio por secciones las cuales se expanden o contraen en manera de acordeón por medio de un desplazamiento lateral que permite abrir o cerrar el telón. En el mundo artístico del teatro a esta configuración se la conoce como telón "Traveller" o griego.

#### *b) Configuración Telescópica*

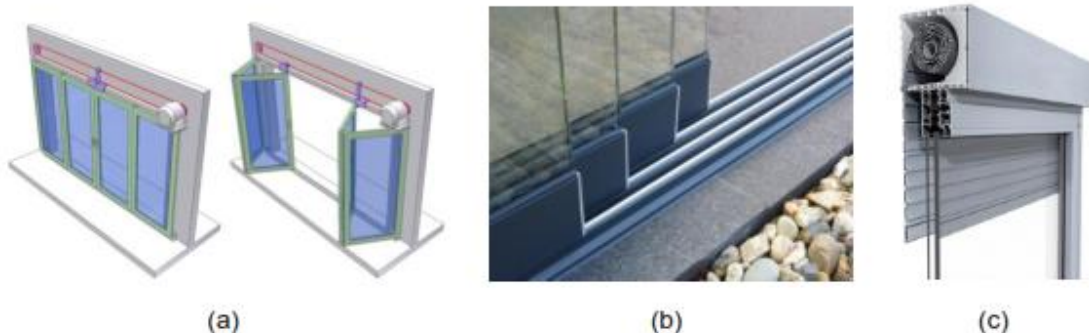
Al igual que el anterior movimiento este posee un desplazamiento lateral de derecha a izquierda y viceversa para abrir y cerrar el telón, pero las secciones no modificarán su tamaño sino se trasladan moviéndose una atrás de la otra.

c) *Configuración Enrollable*

Este movimiento a diferencia de los anteriores tiene un desplazamiento vertical de arriba hacia abajo y viceversa para abrir y cerrar el telón. Las secciones pueden almacenarse en forma de rollo reduciendo el espacio que ocupan significativamente. En el teatro a esta configuración de movimiento se la conoce como telón en vertical, telón alemán o telón “Guillotina”.

**Figura 21**

*Mecanismos de apertura del telón (a) Plegable (b) Acordeón (c) Guillotina*



*Nota.* Obtenido de (a) (b) (DISMETAL, s.f.) y (c) (EDIMCA, s.f.).

En la tabla 16 se muestra una ponderación del 0 al 1 según los criterios de las configuraciones, para seleccionar la mejor opción en base a la puntuación.

**Tabla 16**

*Comparación ponderada de los mecanismos de apertura del telón*

<b>Configuración de Movimiento</b>	<b>Requerimientos del Telón</b>				<b>Puntaje Total</b>
	Mecanismo Liviano	Apariencia Llamativa	Espacio Reducido	Fluidez de movimiento	
Plegable	0.75	1	0.75	0.75	<b>3.25</b>
Telescópica	0.5	1	0.5	0.75	<b>2.75</b>
Enrollable	1	1	1	1	<b>4</b>

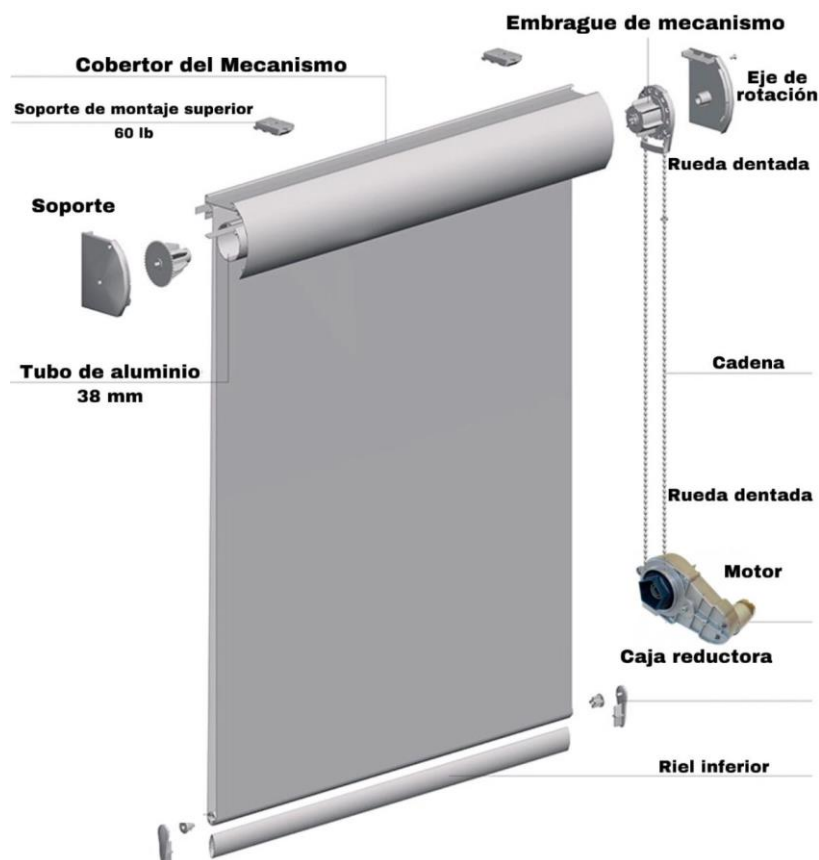
*Nota.* Puntuación desarrollada con el equipo de trabajo en la escala del 0 (mínimo) al 1 (máximo).

De acuerdo al puntaje total obtenido por cada configuración en la tabla anterior se seleccionará al mecanismo enrollable para el diseño del Telón. Esta configuración presenta ventajas frente al resto ya que el material enrollable es liviano en comparación a paneles de madera o de chapa metálica. Ocupan un menor espacio dentro de la estructura, permite fluidez en el movimiento y se puede añadir un sublimado en el material enrollable que mejore la apreciación visual del telón.

Con el fin de optimizar el funcionamiento del telón, así como el peso y el espacio requerido para su funcionamiento, se realizará una adaptación del mecanismo de las persianas convencionales.

## Figura 22

### *Mecanismo del Telón*



*Nota.* Imagen obtenida en internet (Amazon). Edición Propia desarrollada en PicsArt.

Este elemento mecánico cuenta con un conjunto de partes móviles que permiten la acción enrollable de la persiana y que son aptas para automatizar. Se utilizará un motor acoplado a una caja reductora para que genere el movimiento con el torque necesario y así subir y bajar el telón. El conjunto de piezas comerciales de una persiana y las adaptaciones que se realizarán en el mecanismo del telón para automatizarlo se muestran en la figura 22.

Las adaptaciones que se implementarán al mecanismo de persiana convencional permitirán obtener un sistema similar al de transmisión por cadena, en el que existe una rueda dentada conductora (piñón acoplado a motor) que transmite el movimiento circular a una rueda dentada conducida (embrague de persiana) la cual se encarga de accionar el telón y de este modo abrirlo o cerrarlo de acuerdo al sentido de giro del motor.

Las transmisiones por cadena se caracterizan por tener gran capacidad de impulso y una relación de movimiento constante, puesto que no involucran deslizamiento o arrastre ya que la geometría de la cadena encaja precisamente con el paso del piñón que acciona al sistema.

### **Figura 23**

*Embrague de Persiana, piñón y cadena de nylon*



*Nota.* Imagen obtenida de internet (Aliexpress).

Esta característica permite que el mecanismo de transmisión por cadena tenga una larga vida de utilidad y sea capaz de transmitir grandes pares de fuerza donde los ejes de transmisión se mueven en rangos de velocidad de giro entre medias y bajas.

La principal diferencia entre una transmisión de cadena convencional con el mecanismo propuesto para accionar el telón es el material de los elementos del sistema. En vez de utilizar una cadena metálica con rodillos y eslabones de acero se utilizará un cordón tejido con nueve hileras de nylon de 0.2 mm y esferas de 4.5 mm de POM (Polioximetileno o Poliacetal). Del mismo modo, el piñón o catalina metálico se reemplaza por un piñón de POM.

El hilo nylon es conocido por su gran resistencia mecánica (durabilidad, flexibilidad y resistencia a la tracción), además por su capacidad de resistir a productos químicos, a la abrasión y a la luz solar. Por otro lado, el POM (Poliacetal), es un plástico muy resistente al impacto, utilizado en automoción y otras aplicaciones industriales donde se requieren piezas de alta rigidez y gran precisión, este material posee un índice de fricción casi nulo y una excelente estabilidad dimensional.

En la siguiente tabla se muestran las características mecánicas de los elementos que forman parte del Telón.

**Tabla 17**

*Propiedades mecánicas del nylon y POM*

<b>Propiedades mecánicas de los componentes del Telón</b>				
<b>Material</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>
POM - Poliacetal (Piñón y esferas de cordón)	Resistencia a la tracción	70	MPa	ASTM D 4181-83
	Resistencia a la ruptura por flexión	110	MPa	
	Resistencia a la ruptura por compresión	110	MPa	
	Módulo de elasticidad por tracción	3100	MPa	
	Módulo de elasticidad por flexión	2900	MPa	
	Coefficiente de Poisson	0.35	-	

Propiedades mecánicas de los componentes del Telón				
Nylon	Alargamiento a la Ruptura	25	%	
	Resistencia al desgaste	0.8	u/km	
	Densidad	1.5	kg/m	
	Resistencia a la tracción	85.5	MPa	D638
	Resistencia a la flexión	117.2	MPa	D790
	Alargamiento a la Ruptura	90	%	D638
	Módulo de Flexión	2826	MPa	D790
	Coefficiente de Poisson	0.39	-	D793

Nota. Datos obtenidos de (Tecnología de los Plásticos, 2017).

La ANSI estandarizó los mecanismos de transmisión por cadena de acuerdo a su material y tamaño. El paso es la distancia lineal entre los centros de las esferas. El diámetro de paso del piñón es la distancia entre los centros de los dientes, el ángulo que se forma desde la línea de acción perpendicular y tangente al piñón hasta la cadena, se representa por  $\gamma$  y se conoce como ángulo de paso. El grosor del cordón de nylon (2 mm). En la siguiente tabla se muestra la nomenclatura mencionada del mecanismo de transmisión por cadena, junto con el símbolo que lo representa y el valor.

**Tabla 18**

*Características del mecanismo de transmisión por cadena*

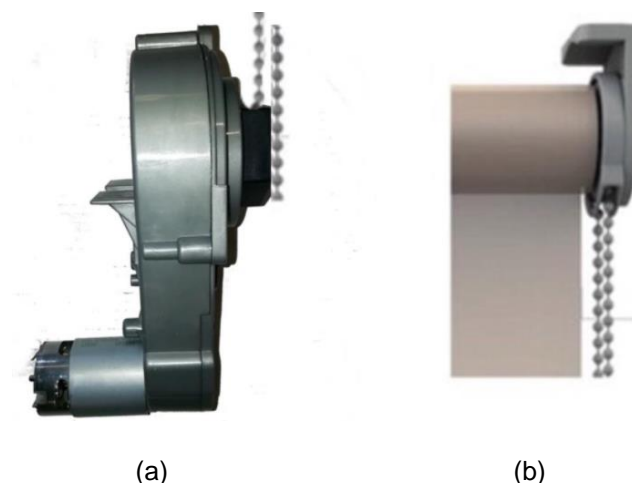
Mecanismo de Transmisión Por Cadena			
Símbolo	Detalle	Valor (u)	Gráfico
<b>D</b>	Diámetro de Paso	44 mm	
<b>p</b>	paso de la cadena	7 mm	
<b><math>\gamma</math></b>	ángulo de paso	20°	
<b>d</b>	diámetro de esfera	4.5 mm	
<b>e</b>	Espacio entre cuentas	2.5 mm	

Nota. Imagen Obtenida de (Richard, Budynas & Keith Nisbett, 2012).

Los dos piñones que se utilizarán en los extremos poseen 22 dientes y tienen el mismo diámetro, por lo que las velocidades angulares del piñón conductor y el conducido son las mismas. Los dientes de los piñones poseen una geometría que encaja con la cadena ofreciendo un gran impulso con un rozamiento mínimo debido al material de composición de los dos elementos y la forma en cómo se acoplan. De este modo el piñón conductor incorporado al motor de 12V con caja reductora y el piñón conducido que acciona el embrague de la persiana se verán de la siguiente forma.

### Figura 24

*Elementos del mecanismo de movimiento del telón*



*Nota.* Imágenes Obtenidas de Internet (Peg-Pérego). Edición Propia en PicsArt.

El Telón tendrá 1.10 metros de alto por 1.90 metros de ancho, el material sublimado tiene aproximadamente 3 libras de masa, por lo que el tubo de aluminio de 38 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor soportará esta carga a flexión sin problemas. El telón tendrá una imagen representativa de los tres robots Naos con piezas de rompecabezas que simbolizan el aprendizaje en los niños. El diseño se desarrolló en Illustrator y se muestra en la siguiente imagen.



## Figura 25

*Diseño del telón*



*Nota.* Fuente Propia (Illustrator).

### **Módulo Elevador: Mecanismo**

El elevador es un mecanismo diseñado con fines de entretenimiento en el teatro robótico. Es común ver en shows y conciertos que la salida del artista genera gran expectativa en la audiencia y en algunos casos se utilizan elevadores que llevan al artista al escenario, del mismo modo se planea utilizar este mecanismo en el teatro robótico, ya que al observar que los robots ascienden desde la base de la estructura supone un atractivo visual durante la experiencia.

Se diseñará un mecanismo de tijeras que cumpla la función de elevar a los robots desde a base. El movimiento del elevador será totalmente automatizado y se podrá controlar desde una HMI donde el usuario programa los movimientos. El mecanismo de tijeras tiene la posibilidad de plegarse mediante el impulso de un actuador que inclina las partes móviles y se obtiene una acción vertical.

**Figura 26***Mecanismo elevador del Teatro Robótico*

*Nota.* Fuente propia (Diseño CAD en SOLIDWORKS 2020).

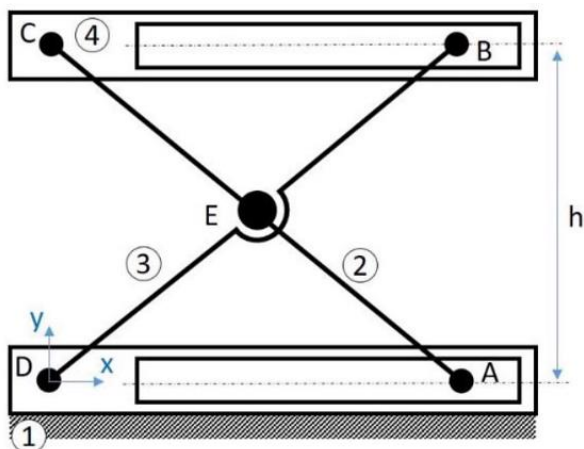
Una tijera mecánica es un mecanismo utilizado para elevar una plataforma usando uno o más pares de hojas articuladas por medio de pares rotatorios y pares prismáticos que permiten deslizar la plataforma (eslabón superior) sobre el bastidor (eslabón inferior o base). Estos dos eslabones poseen unas ranuras en ambos lados por donde recorren unos patines deslizantes o rodamientos y además hay ejes fijos de rotación que unen a la plataforma y el bastidor por medio de las tijeras.

Para describir la cinemática del mecanismo de tijeras se debe simplificar el sistema a un diseño 2D, en el que se observa que el elevador es principalmente un mecanismo de 4 barras que incluye 3 pares cinemáticos rotativos y 2 pares prismáticos.

En la siguiente figura se enumeran los eslabones del mecanismo de tijeras y se marcan cada uno de los pares cinemáticos prismáticos (A, B) y los pares cinemáticos rotativos (C, D, E).

**Figura 27**

*Eslabones y pares de movimiento del mecanismo de tijeras*



*Nota.* Fuente propia (PicsArt).

Con los datos descritos anteriormente es posible calcular los grados de libertad que tiene el mecanismo mediante el criterio de Grübler – Kutzbach, el cual se aplica en sistemas planos cuyo movimiento existe únicamente en dos dimensiones.

$$GDL = 3(N - 1) - 2(J_1) - J_2 \quad (1)$$

$$GDL = 3(4 - 1) - 2(3) - 2 = 1 \text{ Grado de Libertad} \quad (2)$$

Dónde:

$N= 4$  (Número de Barras del mecanismo)

$J_1= 3$  (Número de pares Rotativos)

$J_2= 2$  (Número de pares Prismáticos)

Con el cálculo realizado se determinó que el mecanismo plano posee un grado de libertad, lo que se traduce en que el movimiento deseado en el sistema se puede lograr con un solo actuador que activará el movimiento en todos los eslabones.

Visualmente se puede apreciar que el movimiento de las barras 2 y 3 poseen la misma componente angular, pero en sentido contrario, tanto en la velocidad como en la

aceleración. De este modo se puede afirmar que en los dos extremos superiores de la plataforma la velocidad y aceleración será la misma y no se presentarán rotaciones en ninguno de los ejes, logrando una superficie plana sin inclinaciones en el eslabón 4. Un atributo imprescindible en el elevador es que este mantenga un nivel horizontal y paralelo al suelo en todo momento para que los robots no pierdan equilibrio y se vuelquen. En el siguiente apartado se muestra la justificación teórica de la cinemática de cuerpo plano del mecanismo: en el punto E (figura) hay un par rotativo entre los eslabones 2 y 3 por lo que la velocidad se podría expresar como:

$$\vec{V}_E = \vec{V}_D + \vec{\omega}_3 \times \vec{r}_{DE} \quad (3)$$

$$\vec{V}_E = \vec{V}_A + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{AE} \quad (4)$$

Si  $V_D$  es igual a cero por tratarse de una articulación con barra fija y  $V_A$  tendrá una magnitud que dependa del actuador, al igualar las ecuaciones se tiene:

$$\vec{\omega}_3 \times \vec{r}_{DE} = \vec{V}_A + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{AE} \quad (5)$$

Proyección en x:

$$-\omega_3 \times r_{DE}^y = V_A^x - \omega_2 \times r_{AE}^y \quad (6)$$

Proyección en y:

$$\omega_3 \times r_{DE}^x = 0 + \omega_2 \times r_{AE}^x \quad (7)$$

Como:

$$r_{DE}^x = -r_{AE}^x \quad (8)$$

De la ecuación se obtiene:

$$\omega_3 = -\omega_2 \quad (9)$$

Por lo tanto, las velocidades angulares en las barras 2 y 3 son iguales, pero de sentido contrario.

Sustituyendo en la ecuación de la proyección en x:

$$\omega_2 (r_{DE}^y + r_{AE}^y) = V_A^x \quad (10)$$

Siendo  $h$  la altura entre la base y la plataforma se tiene:

$$r_{DE}^y + r_{AE}^y = h \quad (11)$$

La velocidad con la que asciende la plataforma es igual a la velocidad vertical en el punto C:

$$\vec{V}_C = \vec{V}_A + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{AC} \quad (12)$$

De este modo:

$$\vec{V}_C = \vec{V}_A + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{AC} = h \times \omega_2 \vec{i} - h \times h \times \omega_2 \vec{i} + V_C \vec{j} = V_C \vec{j} \quad (13)$$

Con este análisis cinemático en 2D se demuestra que la plataforma superior solo tendrá velocidad en dirección vertical, ya que las componentes horizontales de la velocidad en las barras 2 y 3 se han contrarrestado por causa de las velocidades angulares con sentido contrario y la similitud en la geometría y dimensión de las barras.

Para la construcción de la plataforma de elevación se usará tubos cuadrados y rectangulares de acero estructural ASTM A36 con un espesor de 1.5 milímetros. Este acero con un porcentaje menor al 0.3% de carbono posee un comportamiento muy favorable bajo fuerzas aplicadas. Una ventaja importante es que tiene un comportamiento lineal y elástico hasta la fluencia, lo que le da la facultad de ser predecible ante fallas, además de su bajo costo y disponibilidad en el mercado en forma de tubos. A continuación, se especifican las propiedades mecánicas por las que se eligió este material:

- Resistencia: Es un material que admite cargas elevadas a tracción, compresión, cizalle, torsión y flexión.
- Elasticidad: El acero A36 es dúctil y vuelve a su forma inicial después de quitarle la fuerza que lo deformó, sin exceder el límite elástico del material.

- **Plasticidad:** Este material tiene una deformación visible antes de que se rompa, lo que permite predecir fallas y corregirlas antes de que ocurran.
- **Tenacidad:** Resistencia a la rotura por esfuerzos que intentan deformar el material
- **Resiliencia:** Este acero tiene la capacidad de absorber energía (por unidad de volumen) cuando se encuentra en una zona elástica.
- **Dureza:** Este material posee buena resistencia ante esfuerzos que tratan de deformar su superficie
- **Soldabilidad:** El acero ASTM A36 permite uniones sólidas con otros metales, formando conjuntos rígidos sin presentar imperfecciones ni defectos

**Tabla 19**

*Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A36*

<b>Propiedades Mecánicas Acero ASTM A36</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	7850	kg/m <sup>3</sup>
Límite de Fluencia (Lím. Elástico)	250 - 280	MPa
Resistencia a la tracción	400 - 500	MPa
Módulo de Elasticidad	200	GPa
% de elongación	20	%
Coefficiente de Poisson	0.28	-

*Nota.* Fuente: Ciencia de Materiales, Selección y Diseño (Mangonon, 2006)

### **Módulo de Sistemas Audiovisuales**

Los sistemas audiovisuales son un conjunto de técnicas y dispositivos que se utilizan con el fin de crear ambientes, realidades o personajes que no pueden ser parte de una escena. En el teatro robótico se incluirán efectos visuales como los elementos de iluminación y el proyector de imagen; efectos de sonido como la música, audios pregrabados, la voz de los robots Nao y el robot narrador y efectos mecánicos que son

los movimientos de los robots humanoides y otros mecanismos como la cámara de humo, el telón automatizado y la superficie del escenario montada sobre el elevador. Todos los sistemas de entretenimiento audiovisual serán controlados desde la HMI del Teatro Robótico.

Para crear los efectos visuales se utilizará un sistema principal de iluminación que consta de dos focos led de luz blanca de 6 Watts de potencia y un sistema secundario de luz led 5050 RGB (Red Green Blue) con animaciones de diferentes colores a 12 VDC. Otros dispositivos como la cámara de humo poseen efectos con luces de colores que complementan al sistema secundario, este dispositivo tiene una potencia de 600 Watts y se alimenta con 110V.

Se utilizará un proyector de imagen de 2800 lúmenes con resolución 800x600 SVGA permitiendo tener un tamaño de pantalla de hasta 300" o 7260 mm. Tiene una potencia de 261 Watts e intervalos de imagen de hasta 100 kHz soportando formatos de video de hasta 1080p.

Los efectos de sonido son un complemento de la imagen proyectada en los efectos visuales. Las voces, tonos, música y sensaciones sonoras sirven de fondo para completar la escenografía deseada y darle realidad a la obra teatral. Se utilizarán altavoces de 30 de Watts de potencia.

Los efectos especiales mecánicos se caracterizan por crear cambios físicos durante la obra y se realizan por técnicas de "animatrónica", donde el movimiento es el componente principal. El movimiento de los robots, así como de los subsistemas o mecanismos adicionales se detallan en los otros puntos de análisis del capítulo 3. Todos los efectos mecánicos serán programados en Python y se podrán controlar desde una HMI amigable para el usuario.

Todo el sistema audiovisual del Teatro Robótico se conectará a una red wifi y mediante el protocolo de comunicación MQTT recibirán las instrucciones programadas en tiempo real. Los dispositivos que requieran se energizarán con fuentes de 5V y 12V para mantener la tensión constante y el resto con la red eléctrica estándar de 110V. Todos estarán conectados a un tablero centralizado dispuesto en el exterior del escenario para no contaminar el aspecto visual con el cableado.

### **Diseño a Nivel Sistema**

La fase de diseño a nivel de sistema incluye una especificación más exacta de la arquitectura de la estructura y los mecanismos. En esta etapa se desarrolla el diseño geométrico junto a sus características funcionales, basándose en la ingeniería preliminar de componentes y analizando los módulos desde criterios mecánicos, eléctricos y electrónicos para el dimensionamiento de todos los elementos.

En el diseño a nivel de sistema se definirá el esquema final de ensamble del teatro robótico, es decir la integración de todos los módulos y componentes del subsistema de escenografía.

### ***Diseño Mecánico del Subsistema de Escenografía***

El diseño mecánico es el proceso ingenieril de dar forma y dimensiones a los componentes y se encarga de la asignación de materiales verificando la resistencia de todos los sólidos deformables mediante modelos simplificados. Además, propone la tecnología de fabricación y operación de un elemento para que cumpla con un determinado requerimiento o función. A continuación, se desarrolla el diseño a nivel de sistema por módulos de la escenografía.



### Módulo Escenario: Estructura

En la etapa de desarrollo del concepto se mencionó que la estructura del teatro robótico es el esqueleto que sostiene a todo el sistema. Para que este sea de fácil movilidad estará conformado por paredes desmontables, cada pared tendrá un armazón de madera de roble para que sean rígidas y no se pandeen, de este modo se asegura la estabilidad en la estructura. Dependiendo de la distribución de cada pared en el escenario, en su configuración interna los elementos dispuestos horizontalmente soportarán esfuerzos de flexión y los elementos en vertical trabajarán a esfuerzos de compresión.

El armazón de las paredes está compuesto por barras cuadradas de roble de 40 mm por lado y poseen un recubrimiento de mdf de 5 mm para ocultar el esqueleto. El suelo del escenario, el techo y el frente poseen planchas de 9 mm de tabla tríplice, ya que esta madera posee mayor resistencia y se pueden realizar procesos de manufactura para instalar el telón y la iluminación del teatro.

En la madera debido a su característica de anisotropía, el módulo de elasticidad con esfuerzos en dirección paralela a la fibra posee un valor mayor a comparación de esfuerzos perpendiculares a la fibra en compresión y tracción (Universidad Centroamericana “José Simón Cañas”, 2015). De este modo se calculará la carga a compresión que pueden soportar las barras cuadradas de roble en la estructura considerando el esfuerzo y la relación de esbeltez. Primero se debe clasificar la columna de acuerdo a su longitud con la expresión:

$$C_k = 0.7025 \times \sqrt{\frac{E}{f_c}} \quad (14)$$

Dónde:

$C_k$  = Relación de esbeltez

$E$  = Módulo de elasticidad.

$f_c$  = Esfuerzo admisible a compresión paralela

$$C_k = 0.7025 \times \sqrt{\frac{123000 \frac{kg}{cm^2}}{520 \frac{kg}{cm^2}}} = 10.80 \quad (15)$$

Al obtener una relación de esbeltez que está entre 10 y 50 en una columna de sección cuadrada, se concluye que esta es de longitud intermedia. Este tipo de vigas fallan por una combinación de aplastamiento e inestabilidad lateral (Pandeo). Según la Guía práctica para el diseño de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015 se deben aplicar las siguientes fórmulas para su diseño:

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A} \quad (16)$$

$$P_u = \frac{\pi^2 \times E \times I_{mín}}{L^2} \quad (17)$$

Dónde:

$\sigma_u$  = Esfuerzo crítico (rotura) a compresión con dirección paralela a las fibras [kg/cm<sup>2</sup>].

$P_u$  = Carga de rotura o carga crítica [kg]

$A$  = Área de la sección [cm<sup>2</sup>]

$E$  = Módulo de Elasticidad [kg/cm<sup>2</sup>]

$I_{mín}$  = Momento de inercia mínimo

$L$  = Longitud de la columna

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times E \times I_{\min}}{L^2 \times A} \quad (18)$$

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times E \times I_{\min}}{L^2 \times A} \quad (19)$$

Reemplazando la expresión  $I_{\min}$

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times E \times A \times r^2}{L^2 A} \quad (20)$$

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times E \times r^2}{L^2} \quad (21)$$

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \quad (22)$$

El denominador se conoce como relación de esbeltez ( $r$ =radio de giro).

$$r = \frac{H}{\sqrt{12}} \quad (23)$$

Dónde H es la longitud por lado de la sección transversal de la columna cuadrada. Reemplazando:

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times E}{\left(\frac{\sqrt{12}L}{H}\right)^2} \quad (24)$$

Para las columnas de 210 cm de longitud:

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times 123000 \frac{kg}{cm^2}}{\left(\frac{\sqrt{12} \times 210cm}{4cm}\right)^2} = 36.70 \frac{kg}{cm^2} \quad (25)$$

Para las columnas de 115 cm de longitud:

$$\sigma_u = \frac{\pi^2 \times 123000 \frac{kg}{cm^2}}{\left(\frac{\sqrt{12} \times 115cm}{4cm}\right)^2} = 122.4 \frac{kg}{cm^2} \quad (26)$$

De este modo encontramos el esfuerzo crítico o de rotura a compresión con una carga aplicada en dirección paralela a las fibras. Ahora se procede a calcular la carga máxima que puede soportar cada columna. Tomando en cuenta los valores de la tabla 15 se tiene para las columnas de 210 cm de longitud:

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A} \quad (27)$$

$$36.70 \frac{kg}{cm^2} = \frac{P_u}{16 cm^2} \quad (28)$$

$$P_u = 36.70 \frac{kg}{cm^2} \times 16 cm^2 = 587.2 kg \text{ (Carga de Rotura)} \quad (29)$$

Para las columnas de 115 cm de longitud:

$$122.4 \frac{kg}{cm^2} = \frac{P_u}{16 cm^2} \quad (30)$$

$$P_u = 122.4 \frac{kg}{cm^2} \times 16 cm^2 = 1958.4 kg \text{ (Carga de Rotura)} \quad (31)$$

Este valor de carga de rotura varía dependiendo de la densidad de la madera y la densidad depende del porcentaje de humedad, por lo que el esfuerzo en el límite proporcional puede considerarse desde el 60% al 75% del esfuerzo de rotura (Universidad Centroamericana “José Simón Cañas”, 2015). De este modo el esfuerzo que pueden resistir las barras de madera utilizadas en el escenario dentro de la deformación elástica (límite proporcional) es:

Para las columnas de 210 cm de longitud.

$$P = 587.2 kg \times \frac{60}{100} \quad (32)$$

$$P = 352.32 kg \text{ (Carga máxima en el límite elástico)} \quad (33)$$

Para las columnas de 115 cm de longitud.

$$P = 1958.4 kg \times \frac{60}{100} \quad (34)$$

$$P = 1175.04 \text{ kg (Carga máxima en el límite elástico)} \quad (35)$$

Se realizó el análisis tomando en cuenta la relación de esbeltez, ya que en piezas alargadas en relación a su sección transversal ocurre un fenómeno en el que el material se “arquea”, a esta deformación se conoce como pandeo. Conociendo la carga a compresión que pueden resistir las columnas del teatro robótico, se puede asegurar que no existirá aplastamiento ni pandeo en estos elementos, debido a que el peso del teatro no excederá estos valores bajo ninguna circunstancia.

Ahora es conveniente analizar otro tipo de esfuerzos que se producen en la estructura. La flexión es una combinación de cargas a tracción y compresión que tienden a doblar el material. A este tipo de esfuerzo se ven sometidas las vigas y planchas de la estructura, el propio peso de estos elementos podría generar esfuerzos a flexión. Para las vigas se usarán barras cuadradas de 4 cm por lado con una longitud de 220 cm. A continuación, se realizan los cálculos para determinar la resistencia de estas piezas de la estructura.

Primero se debe analizar la relación de esbeltez de las vigas conocida como esbeltez flexional con la siguiente expresión:

$$\lambda = \alpha \times L \times \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (36)$$

Dónde:

$L$  = longitud de la barra.

$A$  = área de sección Transversal.

$I$  = Segundo momento de inercia o momento de inercia mínimo.

$\alpha$  = es un valor adimensional que depende de las condiciones de enlace en los extremos ( $\alpha = 0.50$  biempotrada).

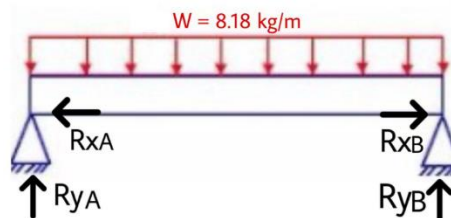
$$\lambda = 0.5 \times 220cm \times \sqrt{\frac{16 cm^2}{\frac{(4 cm)^4}{12}}} = 95.26 \quad (37)$$

Se utiliza un valor de  $\alpha=0.5$  por tratarse de una viga con empotramiento en los dos extremos (biempotrada). Si la relación de esbeltez flexional posee un valor menor a 100 se trata de una viga intermedia y se concluye que es esbelta, es decir que a pesar de su geometría alargada la barra es proporcional a su sección transversal, por lo que al haber obtenido un valor 95.26 nos sugiere analizar las fallas por pandeo y cortante en vigas.

Suponiendo que el peso de las planchas de mdf o trípex que recubren los armazones de las paredes generen un esfuerzo de flexión y añadiéndole el peso de otros componentes como la cámara de humo, la iluminación y el resto de dispositivos se tendrá una carga distribuida a lo largo de toda la superficie. Por lo que según la densidad de la madera y el volumen que ocupa podremos saber su masa. Teóricamente este conjunto de masas tendrá un total de 15 kg, aplicando un factor de seguridad de 1.2 se tienen 18 kg. Con este valor de carga total y la distancia de 2.20 metros de ancho del escenario la carga distribuida será de 8.18 kg/m.

### Figura 28

*Análisis de cargas en el elevador*



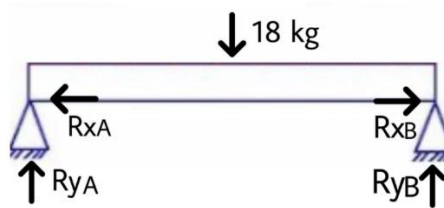
*Nota.* Fuente Propia.

Convirtiendo la carga distribuida en una carga puntual.

$$F = 8.18 \frac{kg}{m} \times 2.20m = 18 kg \quad (38)$$

**Figura 29**

*Carga puntual en el elevador*



*Nota.* Fuente Propia.

Realizando el análisis de sumatoria de Fuerzas y Momentos.

$$\sum F_y = 0 \quad (39)$$

$$R_A = W - R_B \quad (40)$$

$$R_A = 18 - R_B \quad (41)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (42)$$

$$LR_B - \frac{L}{2}W = 0 \quad (43)$$

$$R_B = \frac{L \times W}{2 \times L} \quad (44)$$

$$R_B = \frac{W}{2} \quad (45)$$

$$R_B = 9 [kg] \quad (46)$$

$$R_A = 9 [kg]$$

El esfuerzo a flexión  $\sigma_m$  no deberá exceder el esfuerzo admisible del material  $f_m$ .

$$\sigma_m = \frac{|M_f|}{Z} < f_m = 205 \frac{kg}{cm^2} \quad (47)$$

En una sección cuadrada el momento de inercia es:

$$I = \frac{a^4}{12} \quad (48)$$

El máximo esfuerzo normal en la flexión se produce en la fibra más alejada del plano neutro, para vigas cargadas en la dirección de uno de los ejes principales de la sección.

$$c = \frac{a}{2} \quad (49)$$

Z es el momento resistente para secciones cuadradas

$$Z = \frac{I}{c} = \frac{\frac{a^4}{12}}{\frac{a}{2}} = \frac{a^3}{6} \quad (50)$$

Reemplazando se tiene

$$\sigma_m = \frac{6|M_f|}{a^3} \quad (51)$$

Dónde:

$M_f$  = Momento flector aplicado

$I$  = Momento de inercia de la sección transversal con relación al eje del cual se produce la flexión.

$c$  = Distancia del plano neutro a la fibra más alejada.

$Z$  = Correspondiente al módulo de la sección.

$f_m$  = Esfuerzo admisible de la madera.

$a$  = lado de la sección transversal cuadrada

$$\sigma_m = \frac{6 \times |18kg \times 110 cm|}{(4 cm)^3} = 185.62 \frac{kg}{cm^2} \quad (52)$$

$$\sigma_m = 185.62 \frac{kg}{cm^2} < 205 \frac{kg}{cm^2} = f_m \quad (53)$$

Por cálculo la resistencia a la flexión de las vigas se cumple. En este análisis se tomó en cuenta a las dimensiones de las vigas con mayor longitud, las cuales tienen mayor tendencia a doblarse por su relación de esbeltez mecánica, el resto de vigas de



menor longitud cumplirán este criterio de diseño (Universidad Centroamericana “José Simón Cañas”, 2015).

Según la Guía práctica para el diseño de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015 las vigas también deben ser diseñadas a corte. El esfuerzo de corte en una sección transversal de un elemento sometido a flexión y a una cierta distancia del plano neutro puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{3 \times V}{2a^2} < f_v \quad (54)$$

Dónde:

$V$  = Esfuerzo de la madera a corte [kg].

$\tau$  = Esfuerzo de la madera a corte [MPa]

$a$  = Longitud de la sección [cm]

$F$  = esfuerzo máximo admisible para corte paralelo a las fibras

$$\tau = \frac{3 \times 18 \text{ kg}}{2 \times 4^2 \text{ cm}} < f_v = 12.24 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (55)$$

$$\tau = 1.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} < f_v = 12.24 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (56)$$

Al obtener un valor inferior a  $12.24 \text{ kg/cm}^2$ , se comprueba por cálculo que las vigas del teatro robótico cumplen con la resistencia a cortante.

Cada pared será construida por un conjunto de vigas y columnas que formarán un armazón similar a un mallado, no con el fin de aportar mayor resistencia a esfuerzos y sobredimensionar el diseño propuesto, sino con el objetivo de dar mayor estabilidad y rigidez a las paredes y así poder mantener ángulos precisos en las esquinas y uniones firmes cuando se ensamble toda la estructura del teatro robótico.

En la tabla 20 se muestra el listado de los paneles que forman parte de la estructura del teatro robótico con una breve descripción de cada uno.

**Tabla 20**

*Partes de la estructura del escenario*

<b>Cant.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Color</b>	<b>Característica</b>	<b>Dimensiones</b>
1	Techo de escenario	Blanco	Contiene las luces principales (Led Blanca) y secundarias (Led RGB)	2.20x1.26 m
2	Paredes Laterales	Café	Lugar de instalación del tablero eléctrico con circuitos de control y potencia	1.26x2.18 m
1	Pared Posterior	Blanco	Superficie en la que se proyecta la imagen de fondo	2.20x1.20 m
1	Fachada frontal	Café	Pared frontal del escenario en la que se montará el telón del teatro	2.24x1.20 m
1	Pared Frontal Inferior	Café	Pared delgada que cubre el mecanismo del elevador y el motor del telón	2.24x1.18 m
1	Superficie Escenario	Café	Área de actuación de los robots Nao, posee la cavidad que se nivela con el elevador	2.20x1.40 m

*Nota.* Fuente propia.

### **Módulo Telón: Mecanismo**

Se utilizará el mecanismo convencional de las persianas ya que su funcionamiento es similar al del telón tipo guillotina que se desea implementar. Las adaptaciones que se realizarán únicamente intervienen en la forma de accionar la cortina por medio de la cadena de nylon.

Según datos del fabricante el cordón de 2 mm de grosor puede soportar una tensión de 30 kgf, por lo que la fuerza que accione esta cadena no debe superar ese valor. Un método para conocer la tensión necesaria en el mecanismo es utilizar un dinamómetro y obtener el valor de la fuerza en Newtons.

De igual modo se puede añadir progresivamente una masa conocida hasta lograr que el embrague del mecanismo gire, de esta forma se conocerá la fuerza necesaria para subir y bajar el telón. Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 21***Tensión en la cadena de transmisión del Telón*

<b>Tensión en la Cadena del Mecanismo</b>	<b>Carga [kgf]</b>	<b>Carga [N]</b>	<b>Observación</b>
Tensión de elevación	8	78.5	Mínima requerida para subir el Telón
Tensión de descenso	5	49	Mínima requerida para bajar el Telón

*Nota.* Fuente Propia (Resultados experimentales).

Los valores obtenidos experimentalmente permiten conocer la tensión necesaria para accionar la cadena del telón. La fuerza requerida no supera la carga máxima admisible por el cordón nylon por lo que no hay riesgo de que el material falle, La tensión de 8 kgf apenas representa el 26.67% de la tensión máxima admisible, por lo que añadiéndole un factor de seguridad de 2 debido a la incertidumbre de esfuerzos el material de la cadena aún resistiría.

El esfuerzo máximo en la cadena está en la primera articulación del eslabón que engrana en la rueda dentada, a medida que el eslabón sigue girando por la rueda el esfuerzo va decreciendo hasta alcanzar la salida donde se produce un arco que deja de tensar la cadena.

El esfuerzo que soporta la cadena en las siguientes articulaciones se calcula con la siguiente expresión:

$$F_n = F_0 \times \left( \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi + \alpha)} \right)^n \quad (57)$$

Dónde  $F_0$  es el esfuerzo máximo que soporta la cadena en la primera articulación que entra en contacto con la rueda, los ángulos corresponden a la diferencia que existe en la cadena por el primer eslabón de contacto y la línea de centros de los engranes,  $n$  es el número de articulación de la rueda dentada. De este

modo para el segundo eslabón de la cadena que está en contacto con la rueda dentada se tiene un esfuerzo de:

$$F_{n2} = 30 \times \left( \frac{\sin(10)}{\sin(20)} \right)^2 = 7.73 \text{ kgf} \quad (58)$$

Para el tercer eslabón:

$$F_{n3} = 30 \times \left( \frac{\sin(10)}{\sin(20)} \right)^3 = 3.93 \text{ kgf} \quad (59)$$

De este modo el esfuerzo se va reduciendo progresivamente hasta el último eslabón de la cadena que está en contacto con la rueda dentada. Este esfuerzo genera una reacción en el diente de la rueda dentada que engrana el eslabón. Se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$G_n = F_0 \times \left( \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi + \alpha)} \right)^{n-1} \quad (60)$$

En la siguiente tabla se muestra el esfuerzo de los eslabones y la reacción en el diente de la rueda según su posición de contacto.

**Tabla 22**

*Esfuerzos en el eslabón y reacciones en la rueda dentada*

Posición	Esfuerzo en el Eslabón $F_n$ [kgf]	Reacción en la Rueda $G_n$ [kgf]
1	15.231	12.231
2	7.733	5.733
3	3.926	2.926
4	1.993	1.093
5	1.012	0.995
6	0.514	0.413
7	0.261	0.254
8	0.132	0.123
9	0.067	0.059
10	0.034	0.025
11	0.017	0.013
12	0.009	0.005

Posición	Esfuerzo en el Eslabón $F_n$ [kgf]	Reacción en la Rueda $G_n$ [kgf]
13	0.004	0.001

Nota. Fuente Propia.

La potencia de transmisión de la cadena se determina por el esfuerzo útil ( $F_u$ ) y la velocidad lineal.

$$F = F_u \times V \quad (61)$$

Siendo  $F_u$  el esfuerzo útil asociado al par de fuerza transmitido y  $V$  la velocidad lineal de la cadena. El piñón y la rueda conducida poseen la misma cantidad de dientes y el mismo diámetro, por lo que la velocidad angular será la misma. La velocidad lineal se calcula con la siguiente expresión:

$$V = \frac{D_p \times \omega}{2} \quad (62)$$

Dónde:

$\omega$ : es la velocidad angular de giro

$D_p$ : es el diámetro primitivo de las ruedas

El telón tiene una altura de 100 centímetros y se requiere que la apertura sea en 8 segundos. El diámetro primitivo de la rueda dentada es de 44 mm. Por lo que la velocidad angular necesaria es:

$$\omega = \frac{V \times 2}{D_p} \quad (63)$$

$$\omega = \frac{\frac{105cm}{8 seg} \times 2}{4.42 cm} \quad (64)$$

$$\omega = 180.2 \frac{rev}{min} \quad (65)$$

Tomando en cuenta el esfuerzo en el primer eslabón de la cadena la potencia de transmisión quedaría expresada de la siguiente forma:

$$P = 15.231 \text{ kgf} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1.05\text{m} \times 8 \text{ s}^{-1} \quad (66)$$

$$P = 19.61 \text{ Watts} \quad (67)$$

### **Módulo Elevador: Mecanismo**

En el desarrollo del concepto de este mecanismo se realizó un análisis cinemático en 2D para demostrar que la plataforma solo tendrá velocidad en dirección vertical y debido a la geometría de los eslabones la superficie se mantendrá paralela al suelo. Mediante el criterio de Grübler – Kutzbach se determinó que el mecanismo posee un grado de libertad y que se puede conseguir el movimiento deseado utilizando un solo actuador.

En el diseño a nivel de sistema del elevador se realizarán los cálculos correspondientes para definir todos los elementos que conforman este mecanismo. Se tomarán en cuenta los siguientes criterios de diseño de elementos estructurales para el elevador:

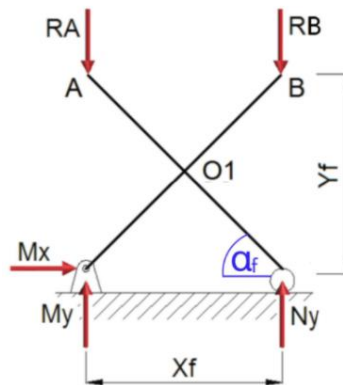
- *Criterio de Resistencia*, se debe asegurar que los esfuerzos máximos no superen los esfuerzos admisibles del material que se utiliza en la construcción. El material seleccionado para este mecanismo es el ASTM A36 que ofrece gran resistencia mecánica y al ser un acero comercial es de fácil disponibilidad y bajo costo.
- *Criterio de Rigidez*, considerando que el mecanismo a diseñar es rígido, por lo que no debe sufrir deformaciones al estar sometido a cargas. Las posibles deformaciones o desplazamientos máximos que se den no deben superar los límites admisibles por el material.
- *Criterio de Estabilidad*, se debe verificar que desviaciones de las fuerzas o cargas previstas no ocasionen pérdida de equilibrio.

- *Criterio de Funcionalidad*, son un conjunto de condiciones auxiliares relacionadas al servicio y el tiempo de vida útil del mecanismo. Consiste en aplicar factores de seguridad y satisfacer necesidades del sistema para que no se desgaste y cumpla con el objetivo por el que se diseñó.

El primer paso en el diseño es calcular la geometría y dimensiones de los elementos del elevador. Analizar el sistema en la posición final permite encontrar las primeras dimensiones y reacciones del mecanismo. Para el cálculo se considera que existe un solo par de hojas (tijeras de un nivel) y la altura del elevador debe alcanzar 80 cm, además el ángulo máximo formado entre las tijeras a esta altura debe tener  $45^\circ$  para darle estabilidad al sistema (Casilla & Estacio, 2012).

### Figura 30

*Análisis del mecanismo de tijeras en posición final*



*Nota.* Fuente Propia.

$$h_f = 800\text{mm} \text{ Altura del elevador}$$

$$\alpha_f = 45^\circ \text{ Ángulo máximo en posición final}$$

$$n = 1 \text{ Niveles del elevador}$$

Con dichas condiciones se determina lo siguiente:

$X_f =$  Distancia entre los puntos inferiores de los brazos del elevador

$a =$  Dimensión del brazo del elevador dividido para 2

$$Y_f = \frac{h_f}{n} \quad (68)$$

$$Y_f = \frac{800mm}{1} = 800mm \quad (69)$$

$$X_f = \frac{800mm}{\tan \alpha} = \frac{800mm}{\tan 45^\circ} = 800mm \quad (70)$$

$$2a = \frac{Y_f}{\sin \alpha} \quad (71)$$

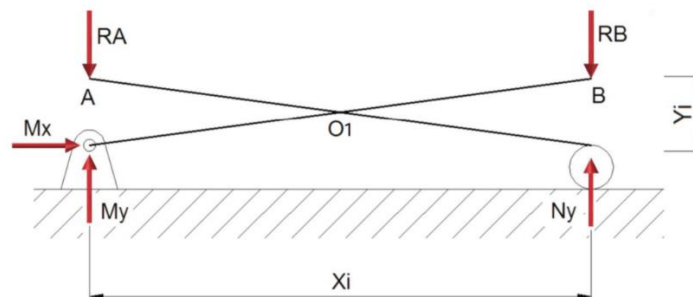
$$2a = \frac{800mm}{\sin 45^\circ} \quad (72)$$

$$2a = \text{Longitud del brazo} = 1131.4 \text{ mm} \quad (73)$$

Calculada la dimensión necesaria en las tijeras para satisfacer la altura y el ángulo entre ellas se procede a calcular los otros parámetros, pero analizando la geometría en posición inicial.

### Figura 31

*Análisis del mecanismo de tijeras en posición inicial*



Nota. Fuente Propia.

$h_i = 250mm$  Altura mínima del elevador

$$Y_i = \frac{h_i}{n} = \frac{250mm}{1} = 250mm \quad (74)$$



$$\sin(\alpha_i) = \frac{Y_i}{L} \quad (75)$$

$$\alpha_i = \sin^{-1}\left(\frac{250mm}{1131.4}\right) = 12.8^\circ \quad (76)$$

$$X_i = \frac{Y_i}{\tan(\alpha_i)} \quad (77)$$

$$X_i = \frac{250mm}{\tan(\alpha_i)} = 1100.4mm \quad (78)$$

Dónde:

$X_i =$  Distancia entre los puntos inferiores de los brazos del elevador

$\alpha_i =$  ángulo mínimo en posición inicial

Se realizará un análisis de cargas en los miembros estructurales del elevador. Se considera a los eslabones sometidos a cargas de flexión, tracción y compresión. El mecanismo estará sometido a una carga que abarca el peso de los robots NAO y el material de la base del escenario. Cada robot Nao tiene una masa de 4.8 kg y la base del escenario según sus dimensiones y la densidad del material tendrá una masa de 10 kg aproximadamente.

Masa de robots Nao = 4.8 kg

Masa de la base = 10 kg

Masa total:

$$W = 4.8 \times 3 + 10 = 24.4 \text{ kg} \quad (79)$$

Aplicando un factor de seguridad de 1.2:

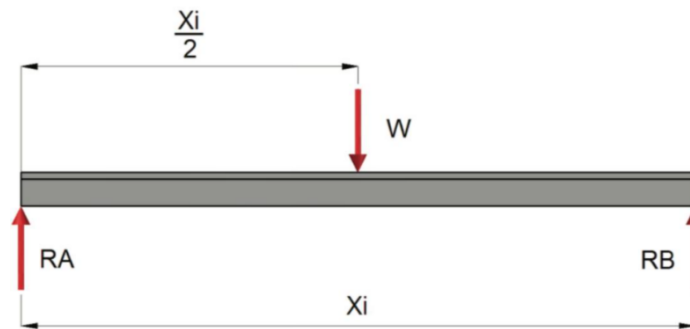
$$W = 24.4 \text{ kg} \times 1.2 = 29.2 \text{ kg} \approx 30 \text{ kg} \quad (80)$$

La masa tendrá un total de 30 kg tomando en cuenta un coeficiente de seguridad de 1.2. El análisis de reacciones debe realizarse en la posición inicial y final del mecanismo debido a que los pares prismáticos se deslizan sobre la superficie de la

plataforma y la base, de este modo los puntos de apoyo varían durante el funcionamiento. A continuación, se calculan las reacciones en la posición inicial.

### Figura 32

*Reacciones en los apoyos del elevador en posición inicial*



Nota. Fuente: (Casilla & Estacio, 2012).

$$\sum F_y = 0 \quad (81)$$

$$R_A = W - R_B \quad (82)$$

$$R_A = 30 - R_B \quad (83)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (84)$$

$$X_i R_B - \frac{X_i}{2} W = 0 \quad (85)$$

$$R_B = \frac{X_i \times W}{2 \times X_i} \quad (86)$$

$$R_B = \frac{W}{2} \quad (87)$$

$$R_B = 15 \text{ [kg]} \quad (88)$$

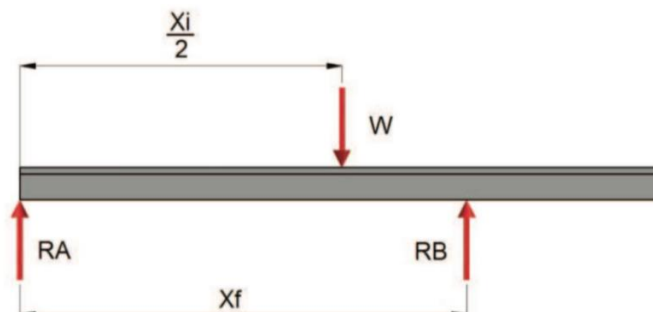
$$R_A = 15 \text{ [kg]}$$

En la posición inicial del elevador cada punto de apoyo soportará una carga de 15 kg debido a la geometría simétrica. Estos valores cambiarán a medida que el

mecanismo se eleve y el par prismático en  $R_B$  se deslice hacia la izquierda, calcular las reacciones en la posición final permitirá conocer la carga máxima en los eslabones.

### Figura 33

*Reacciones en los apoyos del elevador en posición final*



*Nota.* Fuente: (Casilla & Estacio, 2012).

$$\sum F_y = 0 \quad (89)$$

$$R_B = W - R_A \quad (90)$$

$$R_B = 25 - R_A \quad (91)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (92)$$

$$X_f R_B - \frac{X_i}{2} W = 0 \quad (93)$$

$$R_B = \frac{X_i \times W}{2 \times X_f} \quad (94)$$

$$R_B = \frac{1100.4 \times 30}{2 \times 800} \quad (95)$$

$$R_B = 20.63 \text{ [kg]} \quad (96)$$

$$R_A = 9.67 \text{ [kg]}$$

De este modo el eslabón que se desliza hacia el centro de la plataforma soportará la mayoría de la carga, sin embargo, debido a la magnitud tan reducida de la carga no existen complicaciones en el funcionamiento ni riesgos de falla en el material. En el diseño de un elevador la selección de la posición y características del actuador

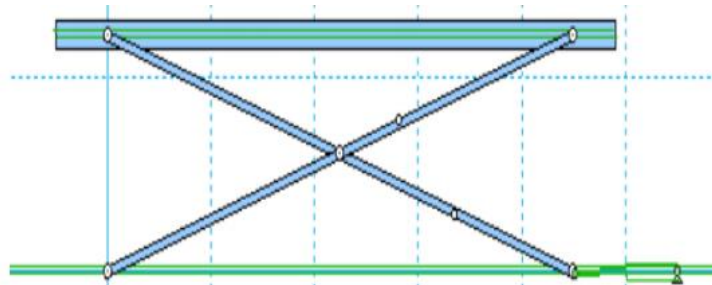
influyen directamente en el movimiento de la plataforma (Saval, 2018). Por ello esta selección se debe realizar tomando en cuenta los siguientes criterios en el mecanismo:

- Aceleración aproximadamente Nula
- Velocidad aproximadamente constante
- Longitud de desplazamiento de partes mínima
- Fuerza del actuador lo más reducida posible

En el trabajo “Diseño, Análisis Cinemático y Resistente de un sistema Elevador de Vehículos para Parking en espacios reducidos” el autor elige la orientación y la posición del actuador tomando en cuenta los 4 criterios antes mencionados, Demostró que colocar un actuador que accione directamente al eslabón deslizante del mecanismo presenta ventajas.

### Figura 34

*Posición y orientación del actuador en el elevador*



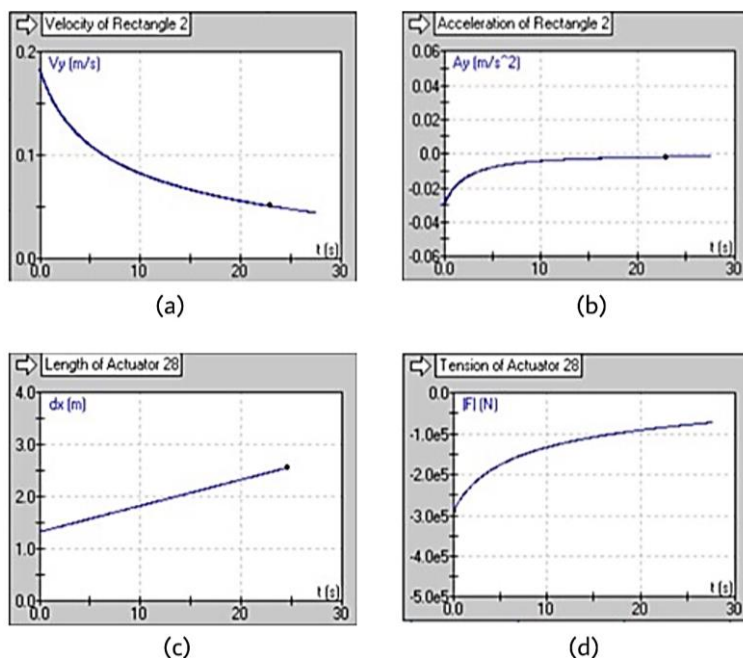
*Nota.* Obtenido de (Saval,2015).

El actuador se sitúa en orientación vertical, generando una fuerza de empuje en el par prismático de la base. Por la geometría del mecanismo de tijeras el desplazamiento en horizontal de este eslabón acciona a su contraparte y de este modo produce que el movimiento de la plataforma tenga una trayectoria vertical en el ascenso

y descenso. En la siguiente imagen se muestran los resultados del análisis con esta configuración del actuador.

**Figura 35**

*Análisis cinemático de la configuración seleccionada*



*Nota.* Obtenido de (Saval,2015).

Saval demuestra que esta configuración en el actuador es eficiente en un mecanismo elevador de tijeras de un solo nivel. Comparando con otras configuraciones los criterios de velocidad, aceleración, fuerza y distancia, concluye que esta es la mejor y la califica como aceptable según las gráficas obtenidas. Bajo este fundamento se aplicará la misma configuración para accionar el elevador del teatro robótico.

Con la información de la posición y orientación en la que se instalará el actuador se procede a dimensionarlo. Se utilizará un motor eléctrico de 12V y una caja reductora con relación 100:1, para accionar un tornillo de Potencia y mover el mecanismo. En este tipo de sistemas en el que se necesita precisión y gran fuerza para mover una carga o constancia en la velocidad y aceleración en el movimiento se utilizan pistones

hidráulicos o neumáticos. Pero el uso de estos elementos requiere la adquisición de otros componentes y la instalación de equipos como un compresor de aire o de líquido, instalaciones de 220 V o transformadores, entre otras. A continuación, se muestra una tabla comparativa de los 3 tipos de actuadores mencionados.

**Tabla 23**

*Comparación entre actuadores neumáticos, eléctricos e hidráulicos*

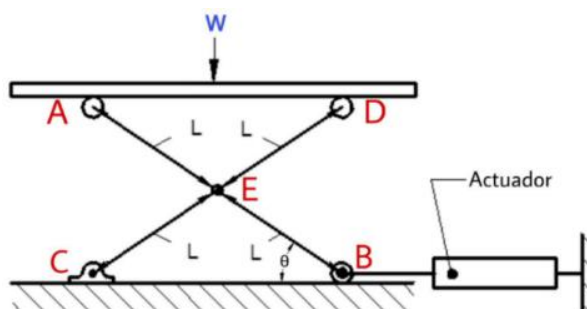
	Actuador Neumático	Actuador Eléctrico	Actuador Hidráulico
<b>Fuerza generadora de movimiento</b>	Presión de aire (5 - 10 bar)	Energía Eléctrica	Presión Hidráulica (50 - 100 bar)
<b>Elemento Motriz</b>	Cilindros, Émbolo, Pistón, Motor de paletas	Motor DC, Motor a Pasos, Servomotor	Cilindros, Émbolo, Pistón, Motor de paletas
<b>Transmisión de fuerza o Torque</b>	Eje o Cremallera	Caja Reductora	Eje
<b>Ventajas</b>	Robustos, rápidos, Bajo Costo, Sencillos	Precisos y fiables, Bajo costo, Fácil control e instalación, Silencioso	Alta capacidad de carga, Rápidos, Estabilidad en funcionamiento
<b>Desventajas</b>	Dificultad de control, Ruidoso, Requiere instalaciones extra	Potencia limitada	Requiere instalaciones especiales, Difícil Mantenimiento, Alto Costo

*Nota Fuente (Cembranos, 2008).*

En base a la información recopilada utilizar un actuador eléctrico presenta ventajas frente a los otros tipos de actuadores.

**Figura 36**

*Diagrama del mecanismo de tijeras en 2D*

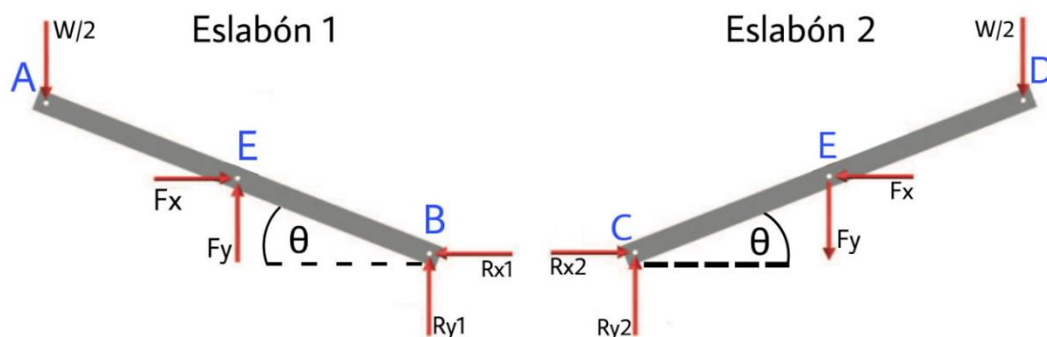


*Nota. Fuente Propia.*

Para seleccionar el motor adecuado se debe realizar un análisis de cargas en los miembros estructurales para determinar las reacciones, especialmente en el eslabón donde se acoplará el tornillo de potencia. Se procede a realizar el diagrama de cuerpo libre del mecanismo.

**Figura 37**

*Diagrama de Cuerpo libre de las tijeras*



*Nota.* Fuente Propia.

Ecuaciones Estáticas del eslabón 1

$$\sum M_B \curvearrowright = 0 = \frac{\omega}{2} \times 2L \times \cos(\theta) - F_y \times L \times \cos \theta - F_x \times L \times \sin \theta \quad (97)$$

$$\sum F_{x \rightarrow} = 0 = F_x - R_{x1} \quad (98)$$

$$\sum F_{y \uparrow} = 0 = -\frac{\omega}{2} + F_y + R_{y1} \quad (99)$$

Ecuaciones Estáticas del eslabón 2

$$\sum M_A \curvearrowright = 0 = -\frac{\omega}{2} \times 2L \times \cos(\theta) - F_y \times L \times \cos \theta + F_x \times L \times \sin \theta \quad (100)$$

$$\sum F_{x \rightarrow} = 0 = -F_x + R_{x2} \quad (101)$$

$$\sum F_{y \uparrow} = 0 = -\frac{\omega}{2} - F_y + R_{y2} \quad (102)$$

En total se tienen 6 ecuaciones con 6 variables. Despejando  $F_y$  en la ecuación 97 se obtiene:

$$0 = \frac{\omega}{2} \times 2L \times \cos(\theta) - F_y \times L \times \cos \theta - F_x \times L \times \sin \theta \quad (103)$$

$$F_y = \frac{-\frac{\omega}{2} \times 2L \times \cos(\theta) - F_x \times L \times \sin \theta}{L \times \cos \theta} \quad (104)$$

$$F_y = -\omega + F_x + \tan \theta \quad (105)$$

Despejando  $F_x$  en la ecuación 100 se obtiene:

$$0 = -\frac{\omega}{2} \times 2L \times \cos(\theta) - F_y \times L \times \cos \theta + F_x \times L \times \sin \theta \quad (106)$$

$$F_x = \frac{\frac{\omega}{2} \times 2L \times \cos(\theta) - F_y \times L \times \cos \theta}{L \times \sin \theta} \quad (107)$$

$$F_x = \frac{\omega}{\tan \theta} - \frac{F_y}{\tan \theta} \quad (108)$$

Sustituyendo la ecuación 105 en la ecuación 108 se tiene:

$$F_x = \frac{\omega}{\tan \theta} - \left( \frac{-\omega}{\tan \theta} - \frac{F_x \times \tan \theta}{\tan \theta} \right) \quad (109)$$

$$F_x = \frac{2\omega}{\tan \theta} + F_x \quad (110)$$

$$F_x = \frac{2\omega}{\tan \theta} + F_x \quad (111)$$

$$F_x = \frac{\omega}{\tan \theta} \quad (112)$$

En las ecuaciones 98 y 101 del eslabón 1 y 2 se tiene:

$$-R_{x_1} + F_y = 0 \quad (113)$$

$$R_{x_1} = F_x \quad (114)$$

$$-R_{x_2} - F_x = 0 \quad (115)$$

$$R_{y_2} = F_y \quad (116)$$

Por lo tanto:

$$F_x = R_{x_1} = R_{x_2} = \frac{\omega}{\tan \theta} \quad (117)$$

Reemplazando la ecuación 117 en la ecuación 105 para encontrar  $F_y$  se obtiene:



$$-\omega + F_x \times \tan \theta = F_y \quad (118)$$

$$\frac{\omega}{\tan \theta} - \frac{F_y}{\tan \theta} = F_x \quad (119)$$

$$F_y = -\omega + \left( \frac{\omega}{\tan \theta} - \frac{F_y}{\tan \theta} \right) \times \tan \theta \quad (120)$$

$$F_y = -F_y = 0 \quad (121)$$

Si la fuerza en y es cero, las ecuaciones 99 y 102 se pueden expresar como:

$$0 = -\frac{\omega}{2} - F_y + R_{y_2} \quad (122)$$

$$\frac{\omega}{2} = R_{y_2} \quad (123)$$

$$0 = -\frac{\omega}{2} + F_y + R_{y_1} \quad (124)$$

$$\frac{\omega}{2} = R_{y_1} \quad (125)$$

Finalmente, del análisis de Fuerzas Dinámicas se obtiene:

$$R_{x_1} = R_{x_2} = \frac{\omega}{\tan \theta} \quad (126)$$

$$R_{y_1} = R_{y_2} = \frac{\omega}{2} \quad (127)$$

$$F_x = \frac{\omega}{\tan \theta} \quad (128)$$

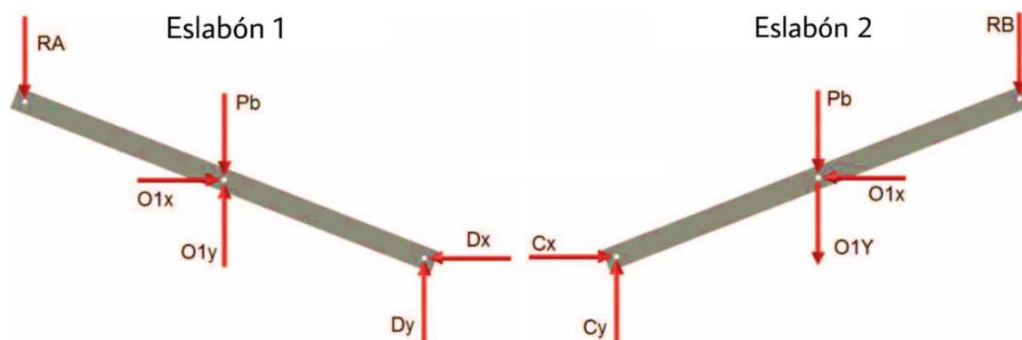
$$F_y = 0 \quad (129)$$

El tornillo de potencia ubicado en posición horizontal en la esquina inferior del eslabón trabajará únicamente en el eje x, generando reacciones en el eslabón 1 y 2 de igual magnitud. Mientras se produce una reacción en y que es igual a la mitad del peso. De este modo la fuerza que ejercerá el actuador del mecanismo será igual las reacciones  $R_{x_1}$  y  $R_{x_2}$ .

Conociendo la fuerza que debe ejercer el actuador, se realiza el análisis de reacciones en los miembros del elevador en un plano 2D incluyendo la que se genera en el pasador en las tijeras y la fuerza del actuador (Figura 38).

**Figura 38**

Análisis de reacciones en los eslabones



Nota. Fuente Propia.

Reacciones en Eslabón 1:

$$\sum M_D = 0 \quad (130)$$

$$XR_A + \frac{X}{2}P_b - \frac{Y}{2}O1_x - \frac{X}{2}O1_y = 0 \quad (131)$$

Reacciones en Eslabón 2.

$$\sum M_C = 0 \quad (132)$$

$$\frac{Y}{2}O1_x - \frac{X}{2}O1_y - \frac{X}{2}P_b - XR_B = 0 \quad (133)$$

Sumando las ecuaciones anteriores.

$$XR_A - \frac{X}{2}O1_y - \frac{X}{2}O1_y - XR_B = 0 \quad (134)$$

$$X(R_A - R_B) - X(O1_y) \quad (135)$$

$$O1_y = R_A - R_B \quad (136)$$

Despejando  $O1_x$  (reacción en x en el pasador del eslabón 1).

$$\frac{Y}{2}O1_x = XR_A + \frac{X}{2}P_b - \frac{X}{2}O1_y \quad (137)$$

$$YO1_x = 2XR_A + XP_b - XR_A + XR_B \quad (138)$$

$$01_x = \frac{X}{Y} (R_A + R_B + Pb) = D_x = C_x \quad (139)$$

Sumatoria de fuerzas Barra 1.

$$\sum F_y = 0 \quad (140)$$

$$D_y + 01_y - R_A - Pb = 0 \quad (141)$$

$$D_y + R_A - R_B - R_A - Pb = 0 \quad (142)$$

$$D_y = R_B + Pb \quad (143)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (144)$$

$$01_x = D_x \quad (145)$$

Sumatoria de fuerzas Barra 2.

$$\sum F_x = 0 \quad (146)$$

$$C_x = 01_x \quad (147)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (148)$$

$$C_y - 01_y - R_B - Pb = 0 \quad (149)$$

$$C_y = R_A + Pb \quad (150)$$

Una vez deducidas las reacciones y esfuerzos a los que estará sometido el mecanismo se comprobará la resistencia del material mediante la Teoría de falla de Von Mises en el diseño a nivel de detalle.

Conociendo las reacciones que se producirán en los miembros de los eslabones del elevador se diseñará el mecanismo del actuador, para este mecanismo se utilizará un "Tornillo de Potencia". Los tornillos no sirven únicamente para la unión o sujeción de piezas, sino también para transmitir potencia y movimiento. Un tornillo de potencia se utiliza para convertir un movimiento angular en un movimiento lineal o de traslación permitiendo desarrollar grandes fuerzas de empuje a lo largo de su eje.

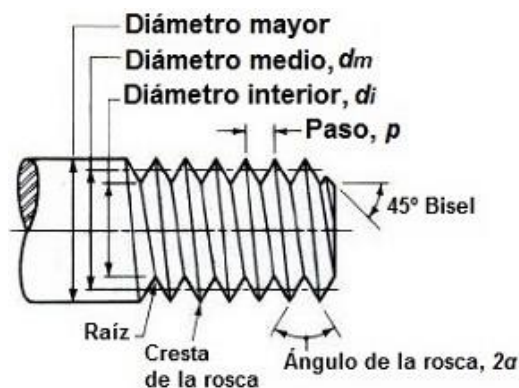
El tornillo de potencia está compuesto por un cuerpo cilíndrico (eje o vástago) sobre el que se enrolla un plano inclinado en forma de filete generando la rosca del tornillo. Cada vez que el eje del tornillo gire  $360^\circ$  el objeto enroscado recorrerá una longitud de circunferencia  $\pi \cdot d_m$ , donde  $d_m$  es el diámetro medio de la rosca. Este recorrido angular genera un desplazamiento en dirección axial o longitudinal al eje del tornillo. Esta distancia longitudinal recorrida en una sola revolución del eje se conoce como el paso ( $p$ ) o avance del tornillo.

El ángulo de paso representado por  $\alpha$  define el tipo de rosca y se lo calcula con la siguiente expresión.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{p}{\pi \times d_m} \right) \quad (151)$$

### Figura 39

*Nomenclatura y partes eje roscado*



*Nota.* Fuente (Rodríguez, 2013).

El tornillo de potencia es popular por su sencillez de diseño, bajo costo de fabricación y su gran exactitud en el movimiento requerido. La desventaja de este método de transmisión de potencia es que las superficies se desgastan por estar expuestas a rozamiento y calentamiento excesivo de sus piezas. Por ello la fricción, así como las características de resistencia mecánica son fundamentales en el diseño. De cualquier modo, este desgaste puede reducirse al utilizar rodamientos de bolas o

lubricantes para disminuir el coeficiente de rozamiento e incrementar la eficiencia del mecanismo.

En este apartado se calculará el par torsional necesario para girar el tornillo de potencia para la elevación y descenso de la carga del elevador. Para el cálculo de esfuerzos se inicia con el reconocimiento de parámetros que definen las características del tornillo y el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio del mecanismo.

El momento o par torsional necesario para deslizar el eslabón en el eje axial debe vencer la fuerza de rozamiento entre la rosca del tornillo y la tuerca acoplada a las tijeras. El par torsional es igual al esfuerzo por el radio primitivo.

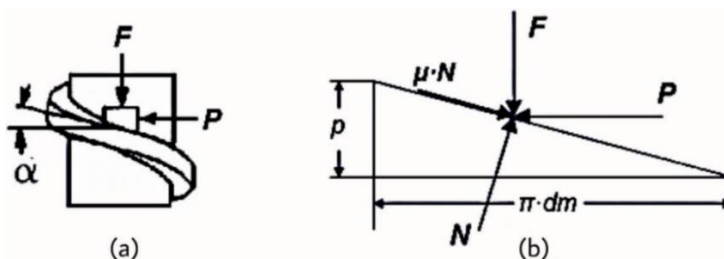
$$T = P \times r_m \quad (152)$$

$$r_m = \frac{d_m}{2} \quad (153)$$

En la figura 40 (a) se representa las fuerzas  $F$  y  $P$  que actúan en el eje del tornillo, mientras que en la figura (b) se grafica en forma de triángulo el desarrollo de la hélice o filete de la rosca mientras el tornillo gira.

### Figura 40

*Análisis de fuerzas en el tornillo de potencia*



*Nota.* Fuente (Rodríguez, 2013).

Dónde:

$\alpha$ : ángulo de hélice

$\lambda$ : ángulo de avance

$p$ : paso o avance del tornillo

$d_m$ : diámetro medio del tornillo (también denominado diámetro primitivo)

$F$ : Carga a elevar y suma de todas las fuerzas axiales que actúan sobre el tornillo (representa la carga a elevar o descender y el peso de los elementos del mecanismo).

$P$ : fuerza necesaria en el tornillo para vencer la fuerza de rozamiento y hacer ascender/descender la carga por el plano inclinado de la rosca del tornillo.

$N$ : fuerza normal al plano del filete o hélice del tornillo.

$\mu \cdot N$ : fuerza de rozamiento (Rodríguez, 2013).

$$\sum F_x = 0 \quad (154)$$

$$P - N \times \sin(\alpha) - \mu \times N \times \cos(\alpha) = 0 \quad (155)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (156)$$

$$F + \mu \times N \times \sin(\alpha) - N \times \cos(\alpha) = 0 \quad (157)$$

Donde la fuerza que actúa en dirección normal al plano del filete del tornillo es:

$$N = \frac{F}{\cos(\alpha) - \mu \times \sin(\alpha)} \quad (158)$$

El esfuerzo  $P$  se determina a partir de la siguiente expresión:

$$P = \frac{F \times [\sin(\alpha) + \mu \times \cos(\alpha)]}{\cos(\alpha) - \mu \times \sin(\alpha)} \quad (159)$$

La relación entre el ángulo del filete  $\alpha$  y el diámetro medio se encuentra mediante la expresión:

$$\tan(\alpha) = \frac{p}{\pi \times d_m} \quad (160)$$

Sustituyendo el valor de  $P$  en la ecuación del par torsional se obtiene:

$$T = \frac{F \times d_m}{2} \times \frac{p + \pi \times \mu \times d_m \times \sec(\theta)}{\pi \times d_m - \mu \times p \times \sec(\theta)} \quad (161)$$

La anterior expresión sirve para calcular el par o momento torsional para subir una carga de valor ( $F$ ) usando un tornillo de potencia de rosca americana. De la misma forma se puede calcular el par torsional necesario para bajar una carga ( $F$ ).

$$T_{descenso} = \frac{F \times d_m}{2} \times \frac{\pi \times \mu \times d_m \times \sec(\theta) - p}{\pi \times d_m + \mu \times p \times \sec(\theta)} \quad (162)$$

Para el tornillo de potencia se usará un eje de rosca Métrica de 20 mm. de diámetro con las siguientes características.

**Tabla 24**

*Características de la Rosca Métrica*

Rosca Métrica UNE 17704			
Detalle	Símbolo	Valor (Unidades)	Gráfico
Diámetro Nominal	D	20 mm	
Paso	$p$	2.5 mm	
Diámetro Medio	$d_m$	18.372 mm	
Diámetro Inferior	$d_i$	17.294 mm	

*Nota.* Obtenido (Norma UNE 17704, 2002).

La carga a elevar son los 3 robots Nao y el material de la base, incluyendo los elementos del mecanismo aproximadamente son 50 kg considerando un factor de seguridad de 1.2.

Masa de robots Nao = 4.8 kg

Masa de la base = 10 kg

$$W_1 = 4.8 \times 3 + 10 = 24.4 \text{ kg} \quad (163)$$

$$W_1 = 24.4 \text{ kg} \quad (164)$$

La masa del tubo cuadrado de acero estructural A36 de 1.5 mm de espesor es de 1.82 kg/m según el fabricante (Catálogo de productos Dipac). Con las dimensiones del elevador se tiene:

$$W_2 = 1.15 \text{ m} \times 1.82 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 8.37 \text{ kg (4 tijeras)} \quad (165)$$

$$W_3 = 5.34 \text{ m} \times 1.82 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 9.72 \text{ kg (lados de la plataforma)} \quad (166)$$

La masa total del mecanismo es:

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3 \quad (167)$$

$$W_T = 42.5 \text{ kg} \quad (168)$$

Aplicando un coeficiente de seguridad de 1.2 se tiene una masa total de:

$$W_T = 42.5 \text{ kg} \times 1.2 \approx 50 \text{ kg} \quad (169)$$

$$F = 50 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 490.5 \text{ N} \quad (170)$$

El coeficiente de rozamiento ( $\mu$ ) en tornillos de potencia de rosca métrica oscila en un rango de 0.2 a 0.3. El menor valor se escoge cuando las superficies están lubricadas por alguna sustancia que ayude a disminuir la fricción. Reemplazando en la ecuación 161 para calcular el par torsional de ascenso del mecanismo se tiene:

$$T = \frac{490.5 \text{ N} \times 18.372 \text{ mm}}{2} \times \frac{2.5 \text{ mm} + \pi \times 0.2 \times 18.372 \times \sec(30^\circ)}{\pi \times 18.372 \text{ mm} - 0.2 \times 2.5 \text{ mm} \times \sec(30^\circ)} \quad (171)$$

$$T = 1248.20 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (172)$$

$$T = 1.248 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$\Theta$ : 30° (inclinación respecto al eje longitudinal del tornillo).

Se necesita un par o momento torsional ( $T$ ) de al menos 1.248 Nm para hacer girar el tornillo de potencia y elevar la carga. Reemplazando en la ecuación 162, el par necesario para el descenso es:



$$T_{descenso} = \frac{490.5N \times 18.372mm}{2} \times \frac{\pi \times 0.2 \times 18.372mm \times \sec(30^\circ) - 2.5mm}{\pi \times 18.372mm + 0.2 \times 2.5mm \times \sec(30^\circ)} \quad (173)$$

$$T_{descenso} = 837.02 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (174)$$

$$T = 0.837 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Conociendo el par mínimo (1.25 Nm) necesario para girar el tornillo de potencia y elevar la plataforma del mecanismo, se calcularán los parámetros para la selección del motor que acoplado a una caja reductora accionarán al tornillo.

### ***Diseño Eléctrico y Electrónico***

El teatro robótico posee dispositivos eléctricos de potencia y dispositivos electrónicos de mando y control que necesitan estar energizados con diferentes rangos de voltaje y corriente de acuerdo a la potencia que consumen. El diseño eléctrico del proyecto permite dimensionar el calibre del cable conductor y el voltaje y corriente necesaria en los dispositivos para el control y funcionamiento de actuadores, luces y efectos audiovisuales del escenario.

#### **Módulo Eléctrico: Escenario**

Se instalará un tablero de control y potencia de todo el sistema eléctrico del teatro robótico. Existen dispositivos que necesitan ser alimentados con una tensión AC de 110V como las luces principales y la cámara de humo. Los motores reductores del elevador y el telón trabajan a 12 VDC como se muestra en el dimensionamiento de los apartados anteriores.

En el diseño del sistema de control del escenario se mencionan los dispositivos a ser utilizados, los cuales trabajan a 5 VDC, por lo que este tablero debe tener varias fuentes de diferente tensión para alimentar a todos los dispositivos del teatro robótico.

Para conocer las características eléctricas de las fuentes primero se debe dimensionar el consumo de las cargas. A continuación, se muestra una tabla con los

calibres de cable AWG disponibles para la instalación de los dispositivos. La capacidad del cable aumenta cuando se trabaja a temperaturas menores de 30 °C.

**Tabla 25**

*Calibre AWG*

Calibre AWG	Amperaje Soportado	Temperatura	Tipo de Aislante
20	2 A.	60 °C	TW
18	10 A.	60 °C	TW
16	13 A.	60 °C	TW
14	18 A.	60 °C	TW
12	25 A.	60 °C	TW

*Nota.* Obtenido del catálogo de productos de “SAB Brockskes Cables”.

### **Módulo Electrónico: Telón**

En el punto 3.4.1.2. se calculó las revoluciones por minuto (RPM) necesarias y la potencia teórica ( $N_a$ ) que necesita en el motor para abrir y cerrar el telón en el tiempo seleccionado (8 segundos). Es necesario calcular la potencia real de entrada del motor ( $N_e$ ) la cual tiene un valor mayor a la potencia teórica ( $N_a$ ) debido al rendimiento del motor (información dada por el fabricante). La mayoría de motores comerciales tienen un rendimiento ( $r$ ) del 98%.

$$N_e = \frac{N_a}{r} \quad (175)$$

$$N_e = \frac{19.61}{0.98} = 20 \text{ Watts} \quad (176)$$

Con la potencia real y las revoluciones por minuto necesarias se puede calcular el torque que requiere el motor para su funcionamiento.

$$T_{motor} = \frac{20 \text{ Watts}}{180 \text{ rpm}} = 0.11 \text{ N} \times \text{m} \quad (177)$$

El requerimiento en el motor es que trabaje a 20 Watts de potencia con una tensión de 12VDC y tenga un torque mayor a 0.11 Nm. Se necesita una velocidad de salida de 180 revoluciones por minuto para abrir y cerrar el telón en 8 segundos. Para

alcanzar la velocidad angular deseada con el torque requerido se debe utilizar una caja reductora que disminuya la velocidad y aumente el torque de salida del motor. Para el mecanismo del telón se utilizará el siguiente motor.

**Tabla 26**

*Especificaciones Técnicas del motor utilizado en el Telón*

<b>Especificaciones Motor HC785LP-012</b>	
Dimensiones	∅ 42.3 X 67.0 mm
Diámetro del eje	∅ 5.005 mm
Voltaje de entrada	18.0 V DC
Velocidad sin carga	20950 RPM
Corriente sin carga	2.90 A
Par máximo de salida	1175.03 mNm
Corriente máxima	138.64 A
Potencia máxima de salida	644.74 W
Máxima eficiencia	88%
Velocidad con máxima eficiencia	18300 rpm
Tiempo de vida en uso	18 hr
Temperatura de funcionamiento	-10 hasta 60 °C



*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del motor HC785LP-012.

La velocidad de salida del motor incluida la caja reductora no alcanza las 180 revoluciones necesarias por lo que a nivel de control se puede modificar el PWM (Modulación por ancho de pulso o en inglés "Pulse Width Modulation") para disminuir la velocidad y regularla a la necesaria por medio de un driver (microcontrolador de motores). Este método para controlar la velocidad de giro también permitirá evitar corrientes pico en el arranque del motor.

Se utilizará un cable calibre AWG 12 que soporta hasta 25 Amperios en el circuito de potencia del motor del telón.

### Módulo Electrónico: Elevador

Con los datos obtenidos en el apartado 3.4.1.3. se calculó que el par mínimo de giro en el tornillo de potencia es 1.25 Nm para elevar la plataforma del mecanismo, ahora se calcularán el resto de parámetros necesarios para la selección del motor que acoplado a una caja reductora accionarán al tornillo.

Primero se debe obtener la potencia de cálculo ( $N_a$ ) o potencia teórica necesaria para el accionamiento del elevador tomando en cuenta las cargas.

$$N_a = \frac{W}{t} \quad (178)$$

$$N_a = \frac{F \times d}{t} \quad (179)$$

Dónde:

$W$ : trabajo que debe realizar el motor.

$t$ : tiempo de trabajo, en este caso el tiempo de elevación.

$F$ : Fuerza que ejerce la carga.

$d$ : distancia a recorres, en este caso la altura de elevación.

$$N_a = \frac{50kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.8m}{30 s} = 13.08 \text{ Watts} \quad (180)$$

La Potencia de Entrada ( $N_e$ ) o potencia real necesaria es la misma potencia teórica ( $N_a$ ), pero afectada por el rendimiento del motor que es un dato del fabricante ( $r$ ). La mayoría de catálogos tienen motores con un rendimiento del 90%.

$$N_e = \frac{N_a}{r} \quad (181)$$

$$N_e = \frac{13.08}{\frac{90}{100}} = 14.53 \text{ Watts} \quad (182)$$

La velocidad necesaria en salida de la caja reductora ( $n_s$ ) se calcula a partir de:

$$\omega = \frac{v_t}{r} = \frac{\frac{0.8 \text{ m}}{30 \text{ s}}}{\frac{20}{2} \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}} = 2.67 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} \quad (183)$$

$$\omega = 2.67 \frac{\text{rev}}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ rev}} = 160 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \quad (184)$$

$$n_s = 160 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \quad (185)$$

Dónde:

$n_s$ : es la velocidad de salida de la caja reductora

$\omega$ : Velocidad angular de la caja reductora

$V_t$ : Velocidad en el punto tangente al radio del tambor

$r$ : Radio del tambor.

La relación de transmisión ( $i$ ) de la caja reductora es 100:1, por lo que se debe calcular la velocidad de salida del motor ( $n_e$ ) necesaria. En el caso de que la velocidad del motor sea mayor a la velocidad necesaria en la salida de la caja reductora (160 RPM), se pueden controlar las revoluciones por minuto mediante PWM.

$$i = \frac{n_e}{n_s} \quad (186)$$

Dónde:

$n_s$ : es la velocidad de salida de la caja reductora

$n_e$ : es la velocidad de salida del motor

$$n_e = i \times n_s = 100 \times 160 = 16000 \text{ RPM} \quad (187)$$

En este punto del dimensionamiento del motor DC, ya se puede seleccionar uno que cumpla con la potencia, velocidad y torque requerido, pero con fines de confiabilidad y seguridad en el dimensionamiento se calculará la potencia de mando.

La Potencia de mando ( $Nm$ ) es la potencia de entrada del motor, pero afectada por el factor de servicio. El factor de servicio depende de la calidad del motor, las horas de funcionamiento, el tipo de accionamiento y la cantidad de arranques por hora; para el elevador el factor de servicio es 1.65 según datos del fabricante. La Potencia de mando se calcula con la expresión:

$$N_m = N_e \times fs \quad (188)$$

$$N_m = 14.53 \text{ Watts} \times 1.65 = 24 \text{ Watts} \quad (189)$$

Si el motor se alimenta con una fuente de 12 VDC a 20 A podrá trabajar con una potencia máxima de 240 Watts, cumpliendo con los 22 Watts requeridos por la potencia nominal del motor.

$$P = V \times I = 12V \times 20A = 240 \text{ Watts} \quad (190)$$

El torque que se obtiene con esta potencia es:

$$T_{motor} = \frac{240 \text{ Watts}}{160 \text{ rpm}} = 1.5 \text{ N} \times m \quad (191)$$

Las corrientes de arranque en un motor DC pueden ser de 4 a 8 veces la corriente nominal, siendo un problema para los elementos de protección y el cableado del sistema. Para controlar esta corriente de arranque que es instantánea, pero de gran magnitud se utilizará un driver que permita realizar un arranque progresivo mediante control PWM y evitar que estas corrientes pico afecten al motor, al cableado o a la fuente de alimentación. De este modo la corriente máxima para este circuito será de 20 A, por lo que se usará un cable calibre AWG 12 que soporta corrientes de hasta 25 A.

El requerimiento en el motor es que trabaje a 240 Watts de potencia con una tensión de 12 VDC y tenga un torque mayor a 1.25 Nm. Se necesita una velocidad de salida de 160 revoluciones por minuto para subir y bajar el elevador en el tiempo estimado. Para llegar a la velocidad angular deseada con el torque necesario, se debe

utilizar una caja reductora que disminuya la velocidad y aumente el torque de salida del motor. Para el elevador se utilizará el siguiente motor.

**Tabla 27**

*Especificaciones del Motor utilizado en el Elevador*

<b>Especificaciones Motor HC785LP-012</b>	
Dimensiones	∅ 42.3 X 67.0 mm
Diámetro del eje	∅ 5.005 mm
Voltaje de entrada	18.0 V DC
Velocidad sin carga	20950 RPM
Corriente sin carga	2.90 A
Par máximo de salida	1175.03 mNm
Corriente máxima	138.64 A
Potencia máxima de salida	644.74 W
Máxima eficiencia	88%
Velocidad con máxima eficiencia	18300 rpm
Tiempo de vida en uso	18 hr
Temperatura de funcionamiento	-10 hasta 60 °C



*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del motor HC785LP-012.

La relación de transmisión de la caja reductora es de 100:1, pero la velocidad de salida del motor no permite alcanzar las 160 revoluciones por minuto necesarias, por lo que se puede regular la velocidad por medio del PWM.

El par o torque de salida que tendrá el motor acoplado a la caja reductora se calcula con la siguiente expresión:

$$T_{motor} = \frac{N_t}{n_s} \quad (192)$$

Dónde:

$N_t$ : Es la potencia del motor DC (Watts)

$n_s$ : la velocidad de salida de la caja reductora (rpm)

$$T_{motor} = \frac{644.74 \text{ Watts}}{160 \text{ rpm}} = 4.03 \text{ N} \times \text{m} \quad (193)$$

El par mínimo necesario para mover el tornillo de potencia es 1.25 Nm, el motorreductor tiene un par de salida 4 Nm al máximo de potencia, por lo que cumple con los requerimientos al trabajar con una potencia media.

**Tabla 28**

*Características de Rendimiento del motor del elevador y telón.*

	Sin carga	Con carga	Máxima eficiencia	Máxima potencia
Corriente (A)	2.90	138.64	19.99	70.76
Eficiencia (%)	-	-	78	50
Potencia de salida (W)	-	-	-	644.74
Velocidad (rpm)	20950	-	18310	10475
Torque (mNm)	-	1175.03	148.10	587.51

*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del motor HC785LP-012.


Se utilizará un cable calibre AWG 12 que soporta hasta 25 Amperios en el circuito de potencia del motor del elevador dado que la corriente máxima será 20 A.

### **Módulo Eléctrico: Sistemas Audiovisuales**

Los sistemas audiovisuales y de efectos especiales del teatro robótico complementarán la escenografía para mejorar la experiencia y aumentar el nivel de entretenimiento en el público.

**Tabla 29**

*Características de la Luz Principal del escenario*

<b>Luz Primaria LED</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
Tensión de entrada: 110VAC, 60 Hz	
Potencia: 6 Watts	
Protección IP65	
Tipo de luz: Led Blanca	

*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del producto.



Las luces principales estarán conectadas con un cable AWG 16 en el circuito de potencia, el cual soporta una corriente de 13 A.

**Tabla 30**

*Características de la Luz secundaria RGB del escenario*


<b>Luz Secundaria LED RGB</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
Tensión de entrada: 110VAC, 60 Hz	
Voltaje de funcionamiento: 12VDC	
Tipo de LED 5050	
Protección: IP65	

*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del producto.

Las luces led RGB se conectarán al circuito de potencia con cable AWG 16, el cual puede soportar hasta 10 A.

**Tabla 31**

*Características de la cámara de humo*

<b>Cámara de Humo</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
3 leds RGB (rojo-verde-azul)	
Capacidad del tanque: 300 ml	
Salida: 4500 ft por minuto	
Potencia: 600 Watts a 5A.	
Tensión de entrada: 110 VAC, 60 Hz	

*Nota.* Obtenido de la ficha técnica del producto.

La cámara de humo se conectará con un cable AWG 14 al circuito de potencia, el cual trabaja hasta 18 A.

Para las señales de control de estos dispositivos se utilizará un cable de calibre AWG 20 dado que se utilizan tensiones de 5VDC, 3VDC y corrientes bajas en el orden de miliamperios (mA).

### ***Diseño de subsistema de Control***

El algoritmo de funcionamiento del teatro robótico se desarrollará en Python, un lenguaje de programación orientado a objetos, dinámico y multiplataforma. Posee una licencia de código abierto por lo que no existe restricción en su uso, convirtiéndolo en un lenguaje muy popular y de fácil alcance. Los programas se guardan en un archivo .py para su ejecución.

El teatro robótico se controlará desde una HMI diseñada en QT Creator. Este es un IDE de desarrollo de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) con Widgets, que utiliza bibliotecas Qt. Esta aplicación es compatible con varios sistemas operativos y es de software libre, el objetivo es lograr una HMI amigable para el usuario que sin tener conocimientos de ingeniería pueda desarrollar guiones teatrales con los robots Nao como actores. La HMI creada se guarda en archivos .ui que posteriormente deben ser convertidos a archivos .py para enlazarlos con los programas desarrollados en Python.

La comunicación de la HMI con el teatro robótico será inalámbrica y se utilizará el protocolo MQTT, permitiendo recibir y enviar datos en paralelo para un funcionamiento fluido del sistema. Se levantará un servidor mediante “Mosquitto” en la red local del Laboratorio de Instrumentación y Sistemas Dinámicos para gestionar la comunicación entre publicadores y suscriptores por medio de “topics” como se mencionó en el apartado 2.2. del estado del arte. El servidor se puede configurar fácilmente en otras redes en el caso de que se traslade el escenario a una ubicación diferente.

Para establecer la comunicación de todos los dispositivos con protocolo MQTT se usará un módulo ESP8266. Este es un circuito integrado que posee todas las funciones Wi-Fi (TCP/IP) y un microcontrolador con los recursos necesarios para el control del escenario. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas de este dispositivo.

**Tabla 32***Características Técnicas del Módulo ESP8266*

<b>MCU ESP8266</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
CPU Risc de 32 bits frecuencia de 80 MHz	
RAM de instrucciones: 64 kB	
RAM de datos: 96 kB	
Estándar IEEE 802.11 b/n/g Wi-Fi	
16 pines GPIO (Entradas/Salidas generales)	
Tensión de Alimentación 5VDC	
Tensión de salida en los pines 3.3VDC	

*Nota.* Información obtenida de la hoja técnica del MCU ESP8266.

El MCU 8266 es uno de los dispositivos más utilizados en aplicaciones de IoT, posee la cantidad de entradas y salidas exactas para recibir y enviar instrucciones a los otros elementos eléctricos del teatro robótico. Se puede utilizar más de un módulo ESP8266 en la red dado que se utiliza el protocolo MQTT para la comunicación y el servidor podrá gestionar la transmisión de datos con varios dispositivos simultáneamente.

En los apartados anteriores se dimensionaron los actuadores para el movimiento del telón y elevador, con esas características se seleccionará el controlador de los motores. En los circuitos de potencia de los motores existirán corrientes altas, incluso superarán los 20 A. por lo que se debe elegir un driver que tenga la capacidad de resistir esa corriente. Los motores trabajan a 12 VDC y la señal de control lógico tiene una tensión de 5 VDC. Además, el driver debe permitir el control de giro de los motores por PWM.

Por los requerimientos mencionados se utilizará un driver “Monster Moto Vnh2sp30” para los actuadores del Telón y del Elevador, dado que tiene salidas y

entradas duales con control PWM. Este driver posee las siguientes características eléctricas.

**Tabla 33**

*Características Técnicas del Driver Vnh2sp30*

<b>Monster Moto Vnh2sp30</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
Tensión Máxima: 16 VDC	
Corriente Máxima: 30 A.	
Frecuencia de PWM máxima: 20 kHz	
Tipo: Driver motor - Puente H para 2 motores	
Protección Térmica	
Protección para sobre voltaje	
Compatible con MCU ESP8266	

*Nota.* Información obtenida de la hoja técnica del driver Vnh2sp30.

En la apertura y cierre del telón se puede programar con temporizadores y mediante pruebas establecer el tiempo necesario para que se cumplan las tareas, del mismo modo el elevador puede programarse en tiempos fijos en los que se demore en recorrer la trayectoria vertical para subir o bajar.


Sin embargo, esta programación no permite un óptimo funcionamiento, ya que es sensible a errores y expuesta a fallos que pueden dañar los componentes eléctricos o provocar choques y deformaciones en las estructuras mecánicas. Para evitar estos inconvenientes se utilizarán sensores que envíen información al driver del motor cuando se hayan completado los movimientos.

El mecanismo del elevador es robusto y tiene elementos rígidos que pueden accionar sensores “fines de carrera” para establecer la posición inicial y final del desplazamiento vertical. Un fin de carrera es un sensor de contacto que posee interruptores normalmente abiertos (Na), normalmente cerrados (Nc) o conmutadores. La conexión de este dispositivo dependiendo de la operación que se necesite realizar, el

accionamiento de uno de estos interruptores provocará un cambio en el estado del circuito enviando una señal o interrumpiendo el paso de corriente. Para el elevador se utilizarán fines de carrera con las características que se muestran en la tabla 34.

**Tabla 34**

*Características de los fines de carrera del elevador*

<b>Fin de Carrera</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
Corriente Máxima: 20 A.	
Tipo: de Rodillo	
Tensión máxima: 30 VDC	
3 interruptores (común/Na/Nc)	
Tiempo de uso: 1 millón de contactos	

*Nota.* Información obtenida de la hoja técnica del final de carrera.


Se colocará un fin de carrera en la parte inferior y superior del recorrido del elevador para limitar el movimiento. El mecanismo accionará la palanca metálica que tiene un rodamiento en la punta para deslizarse por la superficie que lo activará al llegar al fin del recorrido.

El telón tendrá un funcionamiento similar, pero un final de carrera no podrá ser activado ya que el telón no es rígido y tiene una masa mínima que no es capaz de pulsar el contacto por que se usarán reed switch como fines de carrera. Este es un interruptor eléctrico que se activa por un campo magnético. Sus contactos ferromagnéticos están encerrados al vacío en un tubo de vidrio, si están normalmente abiertos (Na), se cierran por un campo magnético e igual forma si están cerrados (Nc) se abren con un estímulo magnético.

Un imán permanente generará el campo magnético necesario para controlar el recorrido. En la tabla 35 se detallan las características de este sensor.

**Tabla 35**

*Características eléctricas de los reed switch del Telón*

<b>Módulo Reed Switch</b>	
<b>Características</b>	<b>Gráfico</b>
Tensión de funcionamiento: 3.3 V a 5 V.	
Tipo de Salida: Digital (0-1)	
Corriente Máxima: 1.5 A.	
Tiempo de uso: 1 millón de activaciones	

*Nota.* Información obtenida de la hoja técnica del fabricante.

### **Diseño de Detalle**

En esta etapa del “Proceso genérico de desarrollo de productos” se debe definir la geometría y dimensiones finales del teatro robótico. Es necesario analizar la resistencia de los materiales utilizado alguna teoría de falla y asegurarse que los elementos trabajen con un amplio margen de seguridad. En el diseño de detalle se deben especificar todas las características a implementar en los subsistemas de escenografía y control.

#### ***Diseño de Detalle del Subsistema de Escenografía***

Se analizarán los puntos más críticos de la estructura y los mecanismos del telón y del elevador, aunque en los dimensionamientos realizados se demostró que todos los elementos estructurales trabajan con amplios márgenes de seguridad.

Un punto crítico es una zona o un elemento estructural que cumple un papel importante en el funcionamiento y que se encuentra comprometido por algún esfuerzo durante su funcionamiento.

#### **Diseño de Detalle del Módulo Escenario: Estructura**



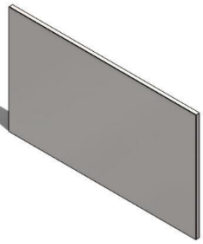
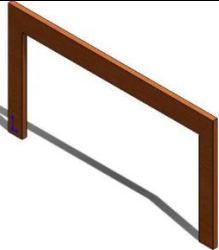
La estructura de madera compuesta por columnas y vigas cuadradas de roble de 40 mm por lado es muy resistentes a compresión y flexión. Estos armazones serán

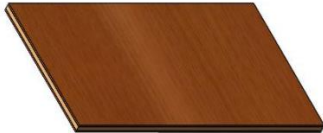
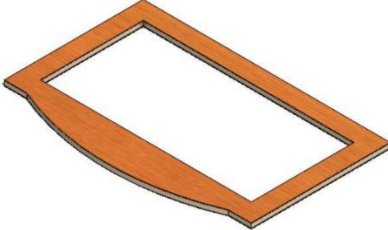
cubiertos con paneles delgados de mdf o triplex dependiendo de su uso. Las paredes laterales son más robustas que la pared posterior porque poseen las columnas que soportan la mayoría de la carga.

La fachada frontal del escenario debe ser lo suficientemente resistente y estable para soportar los esfuerzos y vibraciones producidas por el funcionamiento del telón. De manera similar la superficie del escenario es el área de actuación de los robots Nao y debe sujetarse firmemente a las paredes laterales para no vibrar con los movimientos. En la siguiente tabla se detallan características de las paredes del escenario.

**Tabla 36**

*Elementos estructurales del escenario*

Descripción	Dimensiones	Masa Aprox.	Gráfico
Techo de escenario	2.20x1.26 m	12 kg	
Paredes Laterales	1.26x2.18 m	20 kg c/u	
Pared Posterior	2.20x1.20 m	12 kg	
Fachada frontal	2.24x1.20 m	7.5 kg	

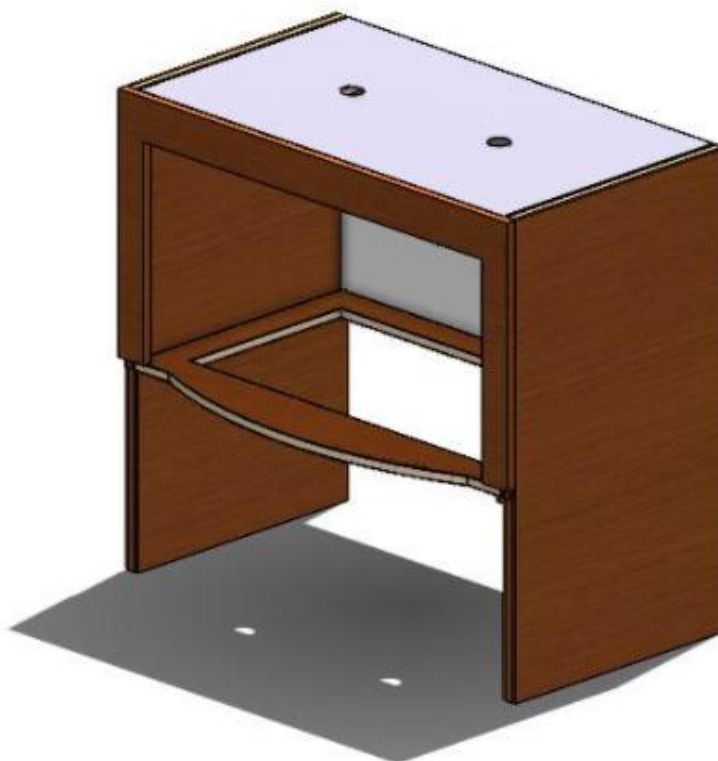
Descripción	Dimensiones	Masa Aprox.	Gráfico
Pared Frontal Inferior	2.24x1.18 m	8 kg	
Superficie Escenario	2.20x1.40 m	7 kg	

*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).

En la siguiente figura se muestra un ensamble del escenario. En la parte inferior ingresa el mecanismo del elevador

#### **Figura 41**

*Ensamble de la estructura del teatro robótico*



*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).



Las paredes del escenario serán sujetas con uniones empernadas. Este tipo de juntas presentan las siguientes ventajas.

- Fácil montaje y desmontaje
- Resiste altas tensiones
- No requieren de gran equipamiento para realizar la unión
- Permiten portabilidad de los elementos
- Se pueden realizar uniones de cualquier material con amplios espesores

Se usarán pernos de hierro negro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada para ensamblar la estructura.

Un total de 18 pernos distribuidos por toda la estructura permitirán la unión fija del escenario. Estos elementos de sujeción están sometidos a esfuerzos de cortante directo producidos por la masa propia de las paredes, por lo que es conveniente analizar su resistencia. La tensión de cortante directo se calcula con la siguiente fórmula.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (194)$$

Dónde:

$\tau$ : Es la tensión de cortadura.

$A$ : es el área de la sección transversal del perno.

$F$ : Es la carga, en este caso el peso de la pared.

Se analizará el cortante en los pernos que sujetan al techo con las columnas de las paredes laterales ya que esta es la pared más pesada.

$$\tau = \frac{12 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\pi \times (0.003)^2} = 4.16 \text{ MPa} \quad (195)$$

Se usarán 3 pernos de hierro negro por lado para sostener cada pared, por lo que el cortante se distribuye en las 6 uniones empernadas, entonces cada perno soportará:

$$\tau = \frac{4.16 \text{ MPa}}{6} = 0.7 \text{ MPa} \quad (196)$$

$$\tau = 0.7 \text{ MPa} < 120 \text{ MPa} \text{ (Límite de fluencia del hierro negro)} \quad (197)$$

No existe riesgo de falla en los miembros estructurales de madera como se demostró en el diseño a nivel de sistema.

### **Diseño de Detalle del Módulo Telón: Mecanismo**

El Telón debe sujetarse a la pared frontal de la estructura con soportes convencionales del mecanismo de las persianas. Hay diferentes tipos de soportes los cuales son capaces de sostener un amplio rango de cargas y en este punto se determinará la cantidad de soportes necesarios según su resistencia. La masa del mecanismo es de 5 kilos aproximadamente, pero el motor ejerce una tensión de 15.2 kgf, aumentando considerablemente el peso del mecanismo.

Con una carga total de 20 Kg aproximadamente se utilizarán dos soportes con resorte de sujeción de acero galvanizado. Cada uno soporta una masa de 60 lb (27.2 kg aproximadamente) y son de fácil instalación, evitando hacer perforaciones en el mecanismo del telón para la sujeción.

### **Figura 42**

*Soportes del Telón*



*Nota.* Imagen obtenida del catálogo online de Cortimax.

El margen de seguridad con el que trabajarán los soportes es de 2.7.

$$F_s = \frac{2 \times (27.2)}{20.2} = 2.7 \quad (198)$$

Se usarán 2 tornillos para sostener cada soporte, estos tornillos estarán sometidos a esfuerzo cortante que se calcula a continuación:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (199)$$

Los tornillos son de acero A36 de 3 mm de espesor.

$$\tau = \frac{20 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\pi \times (0.0015)^2} = 27.75 \text{ MPa} \quad (200)$$

Son un total de 4 tornillos por lo que el esfuerzo se distribuye en ellos.

$$6.94 \text{ MPa} < 250 \text{ MPa} \text{ (El elemento resiste)} \quad (201)$$

En el apartado de diseño a nivel de sistema se analizó la resistencia del cordón de nylon y se determinó que soportará las cargas sin dificultad con un amplio margen de seguridad.

### Diseño de detalle del Módulo: Elevador

En el diseño a nivel de detalle se estimarán los niveles de tensiones en los elementos más críticos del mecanismo. Las tensiones que se alcanzan en los filetes de la rosca del tornillo de potencia en consecuencia a los esfuerzos transmitidos al engranar con la tuerca.

#### Figura 43

*Perfil de rosca del tornillo de potencia*



*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).

El perfil de la rosca trabaja como si se tratara de una viga en voladizo donde se aplica una carga distribuida uniformemente en la superficie de la hélice del tornillo. Esta carga ( $F$ ) es la carga a elevar y resulta de la suma de todas las fuerzas axiales del sistema, es decir, aquellas que son paralelas al eje longitudinal del tornillo de potencia.

La zona de contacto entre las hélices del tornillo y la rosca no se sitúan en el extremo de la hélice sino están a una distancia aproximada al radio medio ( $r_m$ ). La rosca métrica es de una sola entrada y la altura del hilo o filete es de  $0,65p$  (paso) (Rodríguez, 2013). La carga ( $F$ ) creará un esfuerzo a flexión en el perfil de la rosca que originará un estado de tensiones normales ( $\sigma$ ) que será máximo en su base. Este estado de tensión normal que se origina en la base de la rosca se determina con la fórmula:

$$\sigma = \frac{M_f}{W} \quad (202)$$

Siendo:

$M_f$ : el valor del momento flector en la base de la rosca.

$$M_f = \frac{F \times h}{2} \quad (203)$$

$W$ : es el valor del módulo resistente de la sección del perfil de la rosca en la base.

$$M_f = \frac{I}{y_{m\acute{a}x}} \quad (204)$$

$$I = \frac{1}{12} \times 2 \times \pi \times r_m \times b^3 \quad (205)$$

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{b}{2} \quad (206)$$

$I$ : es el momento de inercia del perfil de la rosca.

$r_m$ : es el radio medio del tornillo.

$b$ : ancho de la base del filete de la rosca el tornillo.

$y_{\text{máx}}$ : es la distancia del eje neutro de la sección transversal de la hélice de la rosca a la fibra más alejada (Rodríguez, 2013).

$$\sigma = \frac{F \times \frac{h}{2} \times \frac{b}{2}}{\frac{1}{12} \times 2 \times \pi \times r_m \times b^3} \quad (207)$$

$$\sigma = \frac{490.5 \text{ N} \times \frac{1.625 \text{ mm}}{2} \times \frac{0.83 \text{ mm}}{2}}{\frac{1}{12} \times 2 \times \pi \times 9.186 \text{ mm} \times 1.25^3 \text{ mm}^3} = 17.61 \text{ MPa} \quad (208)$$

$$17.61 \text{ MPa} < 250 \text{ MPa} \text{ (Límite elástico)} \quad (209)$$

Los esfuerzos producidos en las hélices del eje roscado no superan el límite de fluencia del material (acero ASTM A36) por lo que el tornillo de potencia resistirá los esfuerzos que se generen durante el funcionamiento del elevador.

Por otro lado, la carga analizada ( $F$ ) también produce un esfuerzo cortante transversal a la sección del filete de la rosca. Este esfuerzo transversal va a generar una tensión de cortadura o tensión tangencial ( $\tau$ ) en la sección del perfil de la rosca, la cual se determina de la siguiente manera (Rodríguez, 2013).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (210)$$

Dónde:

$\tau$ : Es la tensión de cortadura.

$A$ : es el área de la sección transversal del filete de la rosca.

$$A = 2\pi \times r_m \times b \quad (211)$$

$$\tau = \frac{F}{2\pi \times r_m \times b} \quad (212)$$

$$\tau = \frac{490.5 \text{ N}}{2\pi \times 9.186 \text{ mm} \times 1.25 \text{ mm}} = 6.8 \text{ MPa} \quad (213)$$

$$6.8 \text{ MPa} < 250 \text{ MPa} \text{ (Límite elástico)} \quad (214)$$

De esta forma se demuestra que el material del tornillo de potencia resistirá los esfuerzos cortantes que se generan durante el funcionamiento. Una vez encontrados los valores de las tensiones normales ( $\sigma$ ) y tangenciales ( $\tau$ ) se puede calcular la tensión de Von Mises también conocida como criterio de la energía máxima de distorsión, este es un criterio de resistencia aplicado a materiales dúctiles. La teoría de falla de Von Mises se usa en aplicaciones de ingeniería estructural como un indicador de un buen diseño. Se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \times \tau^2} \quad (215)$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{17.61^2 + 3 \times 6.8^2} = 21.2 \text{ MPa} \quad (216)$$

La seguridad en el diseño del tornillo de potencia se obtiene comparando la tensión de Von Mises con el límite de fluencia o límite elástico del material.

$$\sigma_{VM} = 21.2 \text{ MPa} < S_y = 250 \text{ MPa (Límite elástico)} \quad (217)$$

En el diseño mecánico de estructuras y mecanismos es necesario trabajar con márgenes de seguridad para validar los cálculos realizados. Teóricamente un tornillo de potencia tendrá un diseño aceptable cuando su Factor de Seguridad ( $F_s$ ) sea mayor a 3.

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{VM}} > 3 \quad (218)$$

$$F_s = \frac{250}{21.2} > 3 \quad (219)$$

$$F_s = 11.8 > 3 \text{ (Cumple el } F_s) \quad (220)$$

Una vez analizadas las tensiones en los filetes del tornillo de potencia se debe calcular el estado de tensiones en el núcleo del eje. En el tornillo de potencia se crean niveles de tensiones elevados debido al momento torsor que se aplica para elevar la carga. En la ecuación 172 se determinó el momento torsor necesario para mover el mecanismo, pues este origina un estado tensional de torsión en el núcleo del torillo. Se

realizarán los cálculos con el momento torsor en ascenso debido a que tiene mayor magnitud.

$$\sigma_t = \frac{T}{W_t} \quad (221)$$

$$W_t = \frac{I_0}{R_{m\acute{a}x}} \quad (222)$$

Dónde:

$\sigma_t$ : es el estado de tensiones de torsión.

$T$ : Es el momento torsor aplicado.

$W_t$ : es el módulo resistente a torsión del eje del tornillo.

$R_{m\acute{a}x}$ : es la distancia del centro de gravedad de la sección del eje a su fibra más lejana (Rodríguez, 2013).

$$I_0 = I_{xx} + I_{yy} = \frac{2\pi \times d_i^4}{64} \quad (223)$$

$$R_{m\acute{a}x} = \frac{d_i}{2} \quad (224)$$

Siendo:

$I_0$ : el momento polar de la sección circular del eje.

$d_i$ : es el diámetro de raíz del eje.

$$W_t = \frac{\pi \times d_i^3}{16} \quad (225)$$

Reemplazando las ecuaciones se tiene que el estado de torsiones en el eje del tornillo es igual a:

$$\sigma_t = \frac{16T}{\pi \times d_i^3} \quad (226)$$

$$\sigma_t = \frac{16 \times 1248.2 \text{ N} \cdot \text{mm}}{\pi \times 20 \text{ mm}^3} = 0.8 \text{ MPa} \quad (227)$$

La carga a elevar ( $F$ ) origina un esfuerzo a compresión ya que actúa paralela al eje longitudinal al eje del tornillo de potencia. Por lo tanto, se produce una tensión normal de compresión ( $\sigma$ ). Se la calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (228)$$

$$A = \frac{\pi \times d_i^2}{4} \quad (229)$$

Siendo ( $A$ ) la sección del núcleo del eje.

$$\sigma = \frac{490.5 \text{ N}}{\frac{\pi \times 20\text{mm}^2}{4}} = 1.56 \text{ MPa} \quad (230)$$

Con los valores encontrados de la tensión tangencial de torsión ( $\sigma_t$ ) y la tensión normal de compresión ( $\sigma$ ) se calculará la tensión final de trabajo, conocida como tensión combinada ( $\sigma_{co}$ ).

$$\sigma_{co} = \frac{3}{8}\sigma + \frac{5}{8} \times \sqrt{\sigma^2 + 4\sigma_t^2} \quad (231)$$

$$\sigma_{co} = \frac{3}{8} \times 1.56 + \frac{5}{8} \times \sqrt{1.56^2 + 4 \times 0.8^2} = 1.98 \text{ MPa} \quad (232)$$

Para conocer el factor de seguridad ( $F_s$ ) del eje se usa el mismo criterio que en el de las hélices del tornillo de potencia, un factor de seguridad mayor a 3 determina un diseño aceptable.

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{oc}} > 3 \quad (233)$$

$$F_s = \frac{250}{1.98} > 3 \quad (234)$$

$$F_s = 126.3 > 3 \text{ (Cumple el } F_s) \quad (235)$$

Al existir una carga a compresión en el tornillo de potencia hay la posibilidad de que el material no falle por falta de resistencia mecánica sino por pandeo. Esto se produce



cuando el tornillo de potencia es largo y no tiene esbeltez mecánica por lo que debe ser calculada.

$$\lambda = \frac{Le}{i} \quad (236)$$

$$i = \sqrt[2]{\frac{I}{A}} \quad (237)$$

Siendo:

$Le$ : la longitud efectiva o longitud de pandeo. En este caso la longitud efectiva será igual a la longitud del tornillo ya que el coeficiente de esbeltez es 1 por ser una columna doble articulada (fija en los extremos).

$i$ : es el radio de giro de la sección del tornillo. Para este caso se debe utilizar la dirección en la que resulte mínimo ( $i=i_{min}$ ).

$I$ : es el momento de inercia de la sección transversal, se debe tomar el valor menor más pequeño según la dirección.

$A$ : área de sección transversal del tornillo (Rodríguez, 2013).

$$\lambda = \frac{Le}{\sqrt[2]{\frac{I}{A}}} = \frac{L}{\sqrt[2]{\frac{\pi \times d^2 \times L \times \rho}{48 \times g} \cdot \frac{\pi \times d^2}{4}}} \quad (238)$$

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt[2]{\frac{L^3 \times \rho}{12 \times g}}} \quad (239)$$

$$\lambda = \frac{0.4m}{\sqrt[2]{\frac{0.4m^3 \times 7850 \text{ kg}/m^3}{12 \times 9.81 \text{ m}/s^2}}} = 0.2 \quad (240)$$

Si la esbeltez mecánica del tornillo de potencia es menor a 89 ( $\lambda < 89$ ) se considera que es de columna corta (Rodríguez, 2013). Para calcular la carga crítica de pandeo de una columna comprimida axialmente y con los extremos articulados, Leonhard Euler estableció la siguiente fórmula:

$$F_{crit} = \pi^2 \times \frac{E \times A}{\left(\frac{L}{i}\right)^2} \quad (241)$$

La carga crítica ( $F_{crit}$ ) depende del área de la sección transversal del núcleo del tornillo ( $A$ ), de su longitud ( $L$ ), del radio de giro ( $i$ ) mínimo de la sección transversal del tornillo y del módulo de elasticidad ( $E$ ) del material de fabricación del tornillo.

$$I = i^2 \times A \quad (242)$$

$$F_{crit} = \pi^2 \times \frac{E \times I}{L} \quad (243)$$

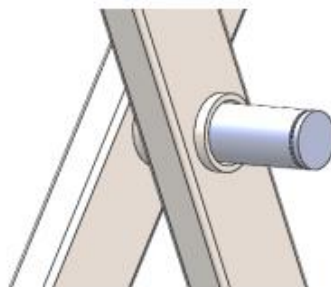
$$I = \frac{\pi \times d^2 \times L^3 \times \rho}{48 \times g} = \frac{\pi \times 0.02m^2 \times 0.4m^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3}{48 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \quad (244)$$

$$F_{crit} = \pi^2 \times \frac{200 \text{ GPa} \times 1.341 \times 10^{-3}}{0.4m^2} = 16.54 \text{ kN} \quad (245)$$

El valor de la carga crítica calculada para producir pandeo en el tornillo de potencia no será superado bajo ninguna condición durante el funcionamiento del mecanismo elevador.

#### Figura 44

*Pasador de las tijeras del mecanismo elevador*



Nota. Fuente Propia (SolidWorks).

Otro elemento sometido a esfuerzos es el pasador de las tijeras en el punto E del mecanismo (Figura 44). Estos elementos están sometidos a cortante directo, producido por el movimiento del mecanismo al subir y bajar.

La tensión de cortante directo en el pasador es:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (246)$$

El pasador es un tubo redondo de acero ASTM A36, con un diámetro de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y 3 mm. de espesor. La carga de trabajo es de 490.5 N.

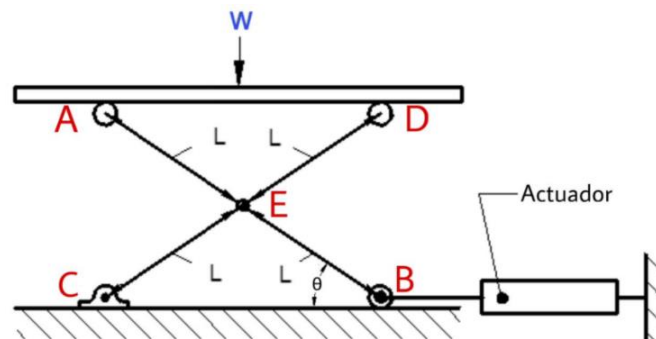
$$\tau = \frac{490.5 \text{ N}}{\pi \times 3 \text{ mm}^2} = 17.35 \text{ MPa} \quad (247)$$

$$F_s = \frac{250}{17.34} = 14.41 \quad (248)$$

El pasador resistirá el esfuerzo cortante con un amplio margen de seguridad. Los pasadores en A y C ubicados en los pares rotacionales de movimiento también están sometidos a cortante directo y son los encargados de unir las tijeras con la plataforma y la base.

### Figura 45

Diagrama 2D del mecanismo elevador



Nota. Fuente Propia.

Se utilizarán pernos de acero ASTM A36 de  $\frac{3}{4}$  de pulgada por lo que trabajarán un factor de seguridad más amplio que el pasador de las tijeras.

**Figura 46**

*Perno utilizado como pasador en el mecanismo*



*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks).

$$\tau = \frac{490.5 \text{ N}}{\pi \times 9.525 \text{ mm}^2} = 1.72 \text{ MPa} \quad (249)$$



$$Fs = \frac{250}{1.72} = 145.3 \quad (250)$$

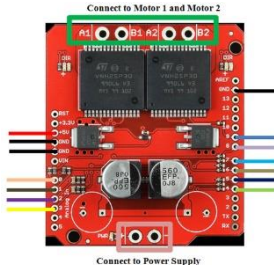



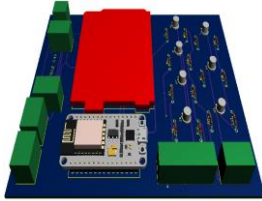

### ***Diseño de Detalle de Módulos Eléctricos y Electrónicos***


En el sistema del teatro robótico se deben realizar conexiones eléctricas de control y potencia, en los anteriores apartados se mencionaron los dispositivos a utilizar y el calibre del cable AWG, ahora se detallará cada subsistema en tablas.

**Tabla 37**

*Dispositivos del Circuito de control*

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tensión Nominal</b>	<b>Amperaje Nominal</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Gráfico</b>
Fuente	Fuente de alimentación encargada de energizar los componentes	5 [V]	5 [A]	1	
ESP8266	Se encarga de la comunicación entre los diferentes componentes de control	5 - 10 [VDC]	70 - 200 [mA]	2	




Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Driver Motor Vnh2sp30	Se encarga de controlar el giro del motor y el PWM	12 [VDC]	30 [A]	1	 A red PCB with two black motor drivers, labeled 'Connect to Motor 1 and Motor 2' at the top and 'Connect to Power Supply' at the bottom. It has various pins and connectors.
Modulo Relé	Se encargan de conmutar el GND entre el ESP8266 y las señales de Salida	5 [VDC]	10 [A]	1 canal	 A blue relay module on a red PCB with a blue terminal block and a microcontroller.
Resistencias	Resistencias de 1K	-	-	14	 A cylindrical resistor with a tan body and a red, yellow, and black color band.
Transistor 2N2222A	Utilizado para la amplificación de tensión en las señales	-	-	7	 A small black transistor with three silver leads.
PCB	Placa Electrónica Diseñada para la interacción de todos los componentes	-	-	1	 A blue PCB with various components, including a red component and a microcontroller.
Luz Piloto	Visualiza el encendido del Sistema	110 [VAC]	20 [mA]	1	 A green LED indicator with a black cylindrical body and a green lens.






Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Terminales KF301	Permite la conexión externa a los elementos	-	-	8	


*Nota.* El diseño de la placa PCB para el circuito se realizó en Proteus. Imágenes obtenidas de Internet.

**Tabla 38**

*Dispositivos eléctricos del circuito del elevador*

Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Fuente	Fuente de alimentación encargada de energizar los componentes	12 [V]	20 [A]	1	
Motor DC	Se encarga de dar momento al eje de la plataforma	18 [VDC]	20 [A]	1	
Finales de Carrera	Se encargan de interrumpir el paso de corriente al momento de llegar a su posición final la plataforma	125 - 250 [VAC]	15 [A]	2	



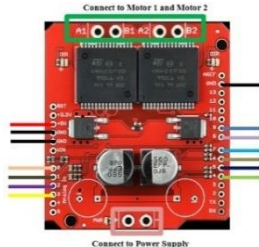

Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Relay o Relevador	Se encargan de la conmutación de los finales de carrera	12 [VDC]	30 - 40 [A]	5	
Módulos Relé	Se encargan del encendido y apagado del sistema y del control de la plataforma	5 [VDC]	30 [A]	2	
Cable AWG 12	Usado para la conexión de los motores y la fuente	600 [V]	25 [A]	4 [m]	
Cable Flexible AWG 14	Usado para la conexión entre el motor y los finales de carrera	600 [V]	18 [A]	4 [m]	
Borneras	Utilizados para derivar los nodos correspondientes	800 [V]	-	9	
Luz Piloto	Visualiza el encendido y apagado de la plataforma	110 [VAC]	20 [mA]	2	

Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Módulos Relé	Se encargan del encendido y apagado de las luces piloto	5 [VDC]	10 [A]	1 canal	




*Nota.* Imágenes obtenidas de Internet.

**Tabla 39**

*Dispositivos eléctricos del circuito del telón*

Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Fuente	Fuente de alimentación encargada de energizar los componentes	12 [V]	20 [A]	1	
Motor DC	Se encarga de dar momento al eje de la plataforma	18 [VDC]	20 [A]	1	
Driver Motor Vnh2sp30	Se encarga de controlar el giro del motor y el PWM	12 [VDC]	30 [A]	1	
Luz Piloto	Visualiza cuando el telón se encuentra en funcionamiento	110 [VAC]	20 [mA]	2	







Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Módulos Relé	Se encargan del encendido y apagado de las luces piloto	5 [VDC]	10 [A]	1 canal	
Cable AWG 14	Usado para la conexión entre el motor, la alimentación y el Driver de Motor	600 [V]	25 [A]	3 [m]	
Módulo Reed Switch	Sensor magnético utilizado como fin de carrera para la apertura y cierre	5 [V]	50 [mA]	2	

*Nota.* Imágenes obtenidas de Internet.

**Tabla 40**

*Dispositivos Eléctricos del sistema de iluminación principal*




Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Lámparas LED	Ilumina el interior del Escenario	90 - 265 [VAC]	300 [mA]	1	
Luz Piloto	Visualiza cuando la lámpara se encuentra encendida o apagada	110 [VAC]	20 [mA]	2	


Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Módulos Relé	Se encargan del encendido y apagado de las luces piloto	5 [VDC]	10 [A]	1 canal	
Cable AWG 12	Usado para la alimentación de la lampara LED	600 [V]	25 [A]	3 [m]	

*Nota.* Imágenes obtenidas de Internet.

**Tabla 41**

*Dispositivos eléctricos del sistema de iluminación LED RGB*





Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Tiras LED	Ilumina el interior del Escenario	12 [VDC]	3 [A]	5 [m]	
Luz Piloto	Visualiza cuando el telón se encuentra en funcionamiento	110 [VAC]	20 [mA]	2	
Módulos Relé	Se encargan del encendido y apagado de las luces piloto	5 [VDC]	10 [A]	1 canal	

Elemento	Descripción	Tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Cable AWG 18	Usado para la alimentación de la tira LED	600 [V]	10 [A]	3 [m]	

*Nota.* Imágenes obtenidas de Internet.

**Tabla 42**

*Dispositivos eléctricos del circuito de la cámara de humo*

Elemento	Descripción	tensión Nominal	Amperaje Nominal	Cantidad	Gráfico
Máquina de Humo	Desprende Humo en el interior del escenario	110 [VAC]	3 [A]	1	
Luz Piloto	Visualiza cuando la máquina de humo está en funcionamiento	110 [VAC]	20 [mA]	2	
Módulos Relé	Se encargan del encendido y apagado de las luces piloto	5 [VDC]	10 [A]	1 canal	
Cable AWG 16	Usado para la alimentación y la comunicación entre el relé	600 [V]	13 [A]	2 [m]	

*Nota.* Imágenes obtenidas de Internet.

### Diseño de Detalle del Módulo de Control

Se detallará la asignación de pines de los dos Módulos ESP8266, uno dedicado únicamente a la comunicación con los elementos del elevador y el otro módulo se utiliza en la comunicación con el resto dispositivos, ambos se enlazan a la HMI en tiempo real.

**Tabla 43**

*Asignación de Pines del Módulo ESP8266 1 y Driver Vnh2sp30*

PLACA	GPIO	OBSERVACIÓN	DRIVER MOTOR
D0	16	Motor PWM 1	D6
D1	5	-	-
D2	4	-	-
D3	0	-	-
D4	2	Piloto_B	Luz Piloto
D5	14	-	-
D6	12	-	-
D7	13	Enable_Motor_P	Eneable motor open
D8	15	GND	GND
SD3	10	Plataforma S/B	Eneable motor close

**Tabla 44**

*Asignación de Pines del Módulo ESP8266 2 y Driver Vnh2sp30*

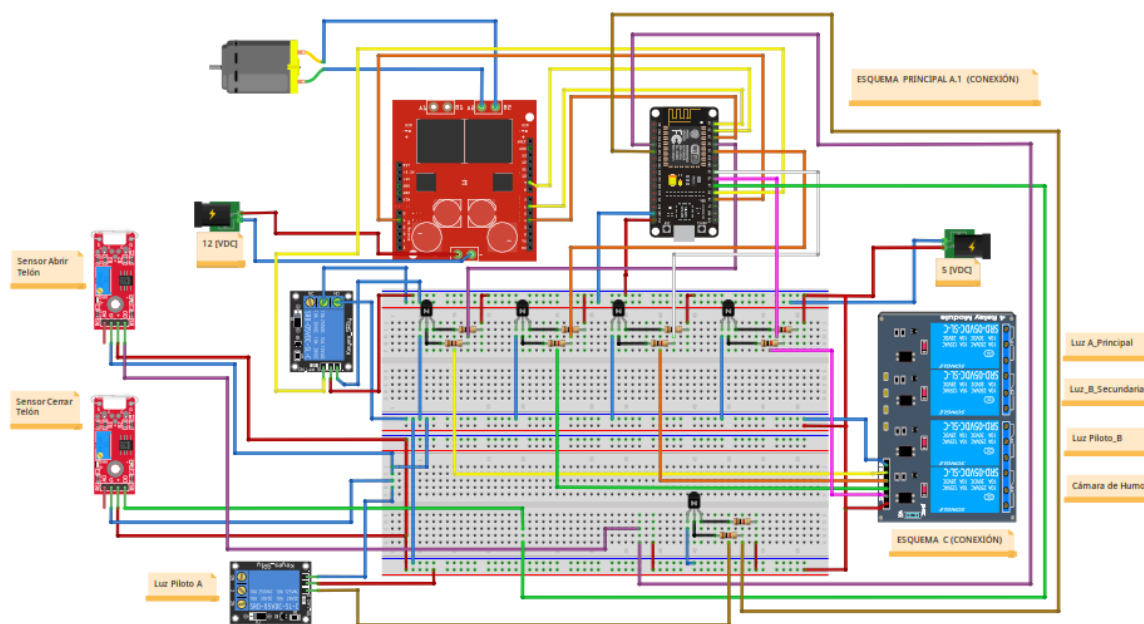
PLACA	GPIO	OBSERVACIÓN	DRIVER MOTOR	GRÁFICO
D0	16	Motor PWM 2	D6	
D1	5	Motor A2	D9	
D2	4	Motor B2	D4	
D3	0	Luz_A (Principal)	RELE	
D4	2	Piloto_B	RELE	
D5	14	Luz_B (Secundaria)	RELE	
D6	12	Camara Humo	RELE	
D7	13	Enable_Motor_P	Reed Switch abrir	
D8	15	GND	GND	
RX	3	Enable Motor T	A1	
TX	1	-	-	
SD3	10	Telón S/B	Reed Switch cerrar	
SD2	9	Piloto_A	RELE	

En la figura 47 se muestran los diagramas de control y potencia del sistema. Los Reed Switch y el motor que permiten el movimiento del telón están a la izquierda. Las salidas para el sistema de Luz Led principal, las luces RGB y la cámara de humo está ubicadas en el módulo relé de la derecha, de igual manera se muestran las luces piloto de todos los dispositivos.

El conjunto de resistencias de 1 k $\Omega$  y transistores n2222 se utilizan para amplificar la señal de salida de los módulos ESP8266 ya que esta tiene una tensión de 3.3 VDC y para activar los relés se necesita una tensión de al menos 5 VDC. Las conexiones se realizan con el calibre del cable dimensionado en los apartados anteriores.

### Figura 47

*Diagrama esquemático de control y potencia del Telón y salidas de módulos*

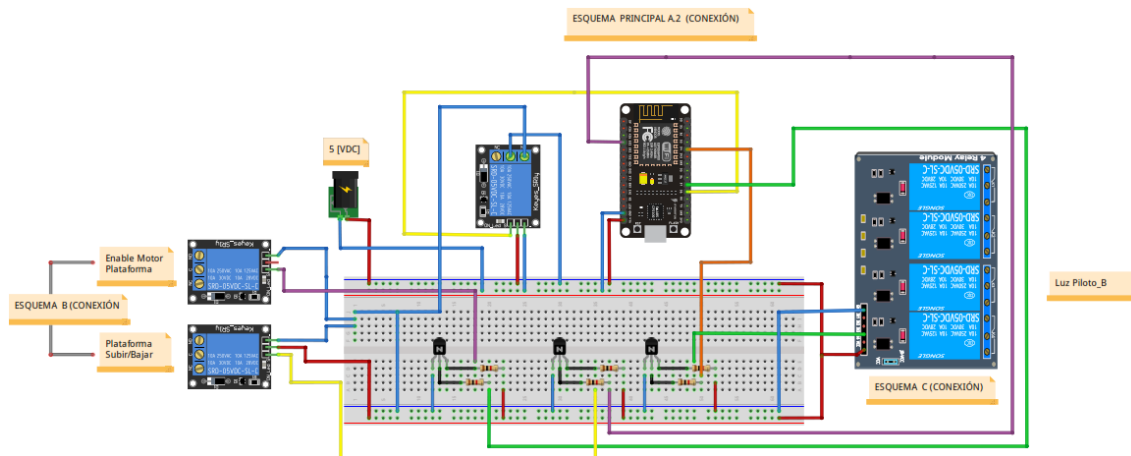


*Nota.* Fuente propia, diseño realizado en Fritzing.

Los diagramas esquemáticos se mostrarán en anexos para una mejor apreciación. En las figuras 48 y 49 se muestra el circuito dedicado para el control y potencia del elevador.

**Figura 48**

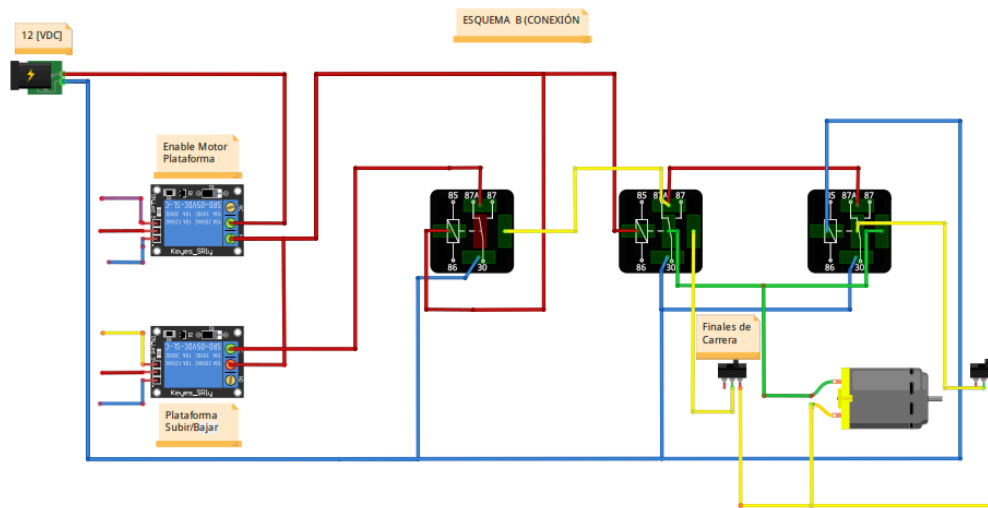
*Diagrama esquemático de control del elevador*



*Nota.* Fuente propia, diseño realizado en Fritzing.

**Figura 49**

*Diagrama esquemático de potencia del elevador*

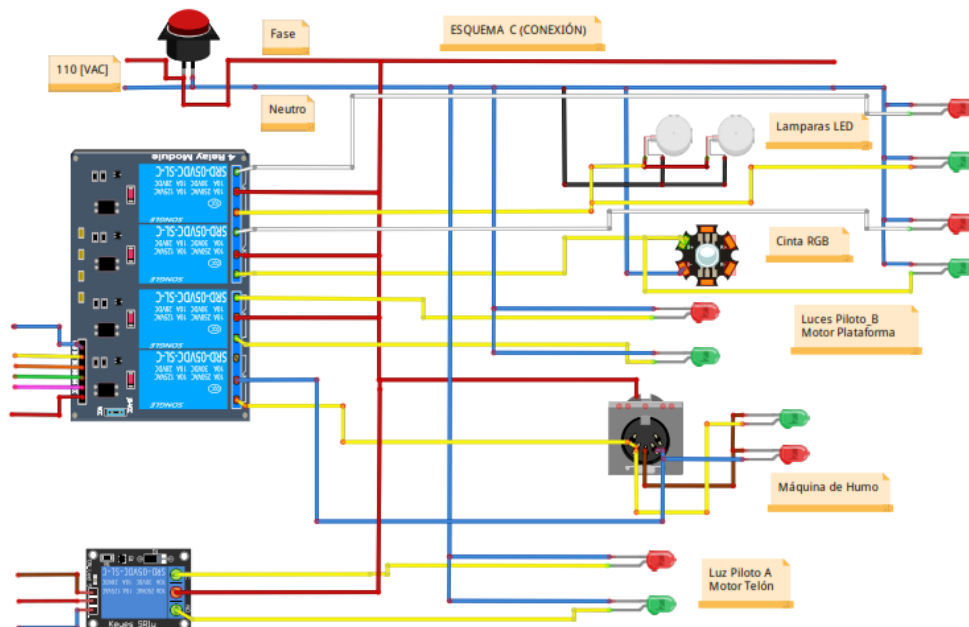


*Nota.* Fuente propia, diseño realizado en Fritzing.

En la figura 50 se muestra se muestra el diagrama de conexión del sistema de iluminación, la cámara de humo y sus luces piloto.

## Figura 50

Diagrama de conexiones del escenario



*Nota.* Fuente propia, diseño realizado en Fritzing.

## Pruebas y Refinamiento

Previo a la construcción del escenario es conveniente realizar simulaciones con un ayuda de un software CAD (Diseño asistido por computador) en el que se puede comprobar el funcionamiento y resistencia del material seleccionado para cada estructura y mecanismo.

Al igual que en la parte mecánica se pueden simular los circuitos diseñados para el control y la alimentación de los dispositivos.

### ***Análisis del Subsistema de Escenografía***

En los elementos que fueron analizados en las secciones anteriores se aplicarán cargas de igual magnitud y demostrar mediante simulaciones el funcionamiento y la resistencia del material.

Se utilizará SolidWorks 2020 como software de simulación. Los programas CAD son una herramienta importante en el diseño mecánico, ya que se usa para comprobar el funcionamiento y evitar fallas posteriores a la construcción.

Los elementos como vigas, columnas, barras pueden ser analizados con gran exactitud y facilidad en SolidWorks debido a que utiliza un método de análisis de elementos finitos (FEA). La técnica de elementos finitos consiste en dividir o “discretizar” un elemento mecánico continuo en subestructuras o partes pequeñas para facilitar su análisis, se dividirán en una cantidad determinada de secciones elásticas bien definidas y con operaciones polinomiales y matriciales se puede analizar al componente.

Para realizar estas operaciones el software debe crear un “mallado” que es la red de elementos y nodos a analizar. La densidad de la malla puede ser modificada por aspectos como la geometría del material y sus dimensiones en el caso de que las piezas o elementos sean complejos. Para el caso de las estructuras del teatro robótico se generará una malla automática, por la simplicidad del diseño y porque el software posee bien definidas las características de los materiales asignados.

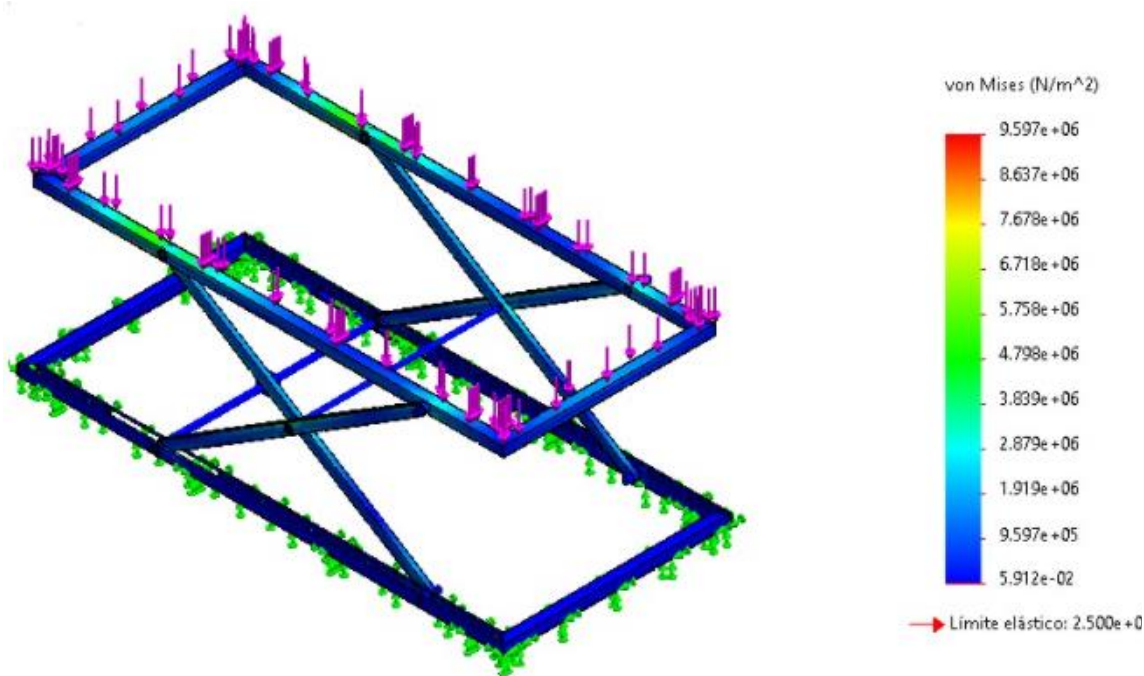
Los elementos más críticos de todo el sistema serán analizados según la teoría de falla de Von Mises y así verificar el factor de seguridad y resistencia del material. Se aplicarán las cargas utilizadas en el diseño teórico en los puntos exactos que se producen.



El primer elemento a analizar es el elevador, como se demostró en el diseño de sistema y de detalle este mecanismo es el que posee mayor cantidad de esfuerzos.

### Figura 51

*Simulación del mecanismo del elevador en software CAD*



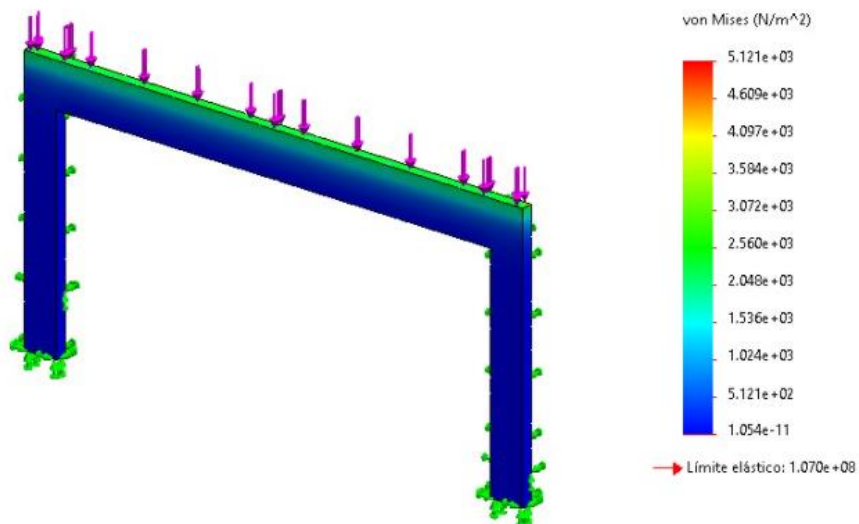
*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).

Según la teoría de falla de la Energía de Distorsión Máxima o de Von Mises para materiales dúctiles, el mecanismo del elevador resiste y tiene un amplio margen de seguridad aplicando las cargas y esfuerzos producidos en su estructura.

Otro elemento sometido a esfuerzos es la pared frontal del escenario en la que se instalará el telón. El peso del mecanismo, así como la fuerza que ejerce el motor en dirección vertical negativa por la transmisión de movimiento por cadena general esfuerzos en la estructura de la pared.

**Figura 52**

*Simulación de la pared frontal del escenario en software CAD*

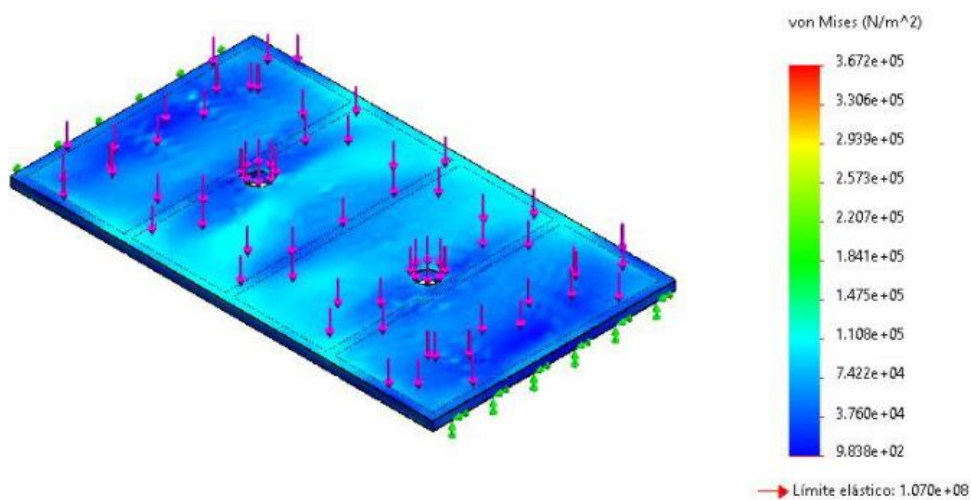


*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).

El techo del escenario es otro elemento sometido a esfuerzos por lo que se analiza a continuación.

**Figura 53**

*Simulación del techo del escenario en software CAD*

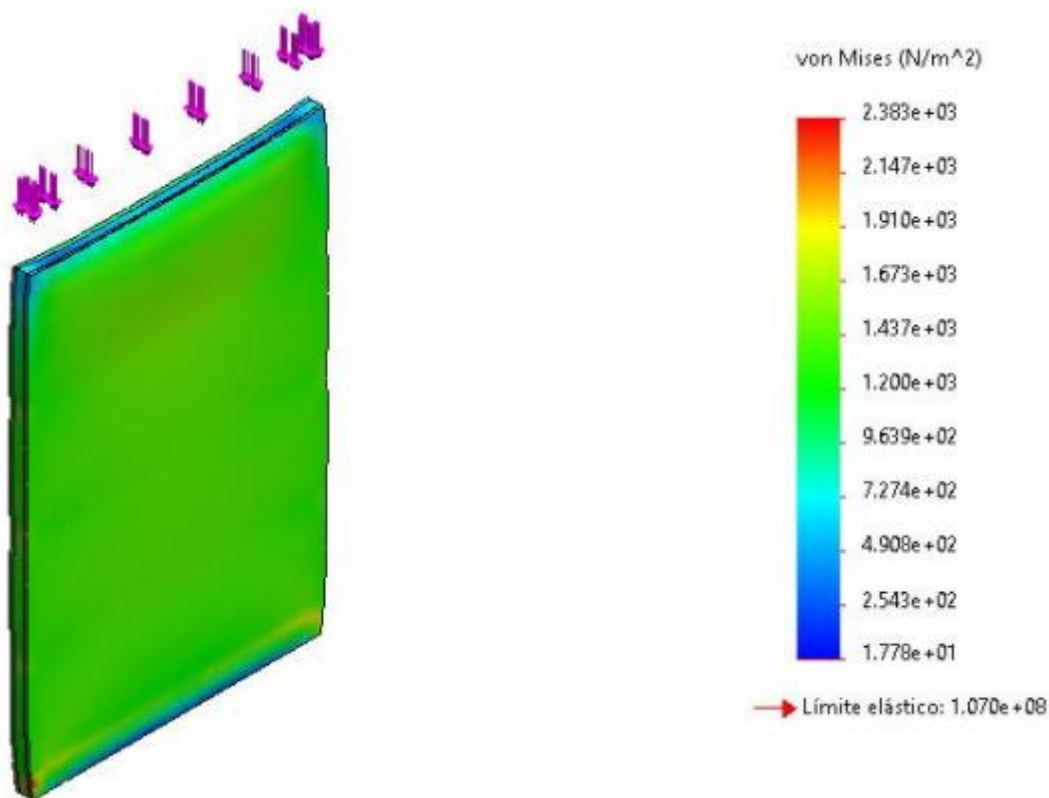


*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).

Por último, las paredes laterales del escenario soportan el peso de todas las paredes y componentes instalados en el escenario, por lo que se debe analizar su resistencia.

### Figura 54

*Simulación del techo del escenario en software CAD*



*Nota.* Fuente Propia (SolidWorks 2020).

Como se observa en las figuras anteriores, los elementos de madera de la estructura del teatro robótico resistirán los esfuerzos con un amplio margen de seguridad según la teoría de falla de Von Mises.

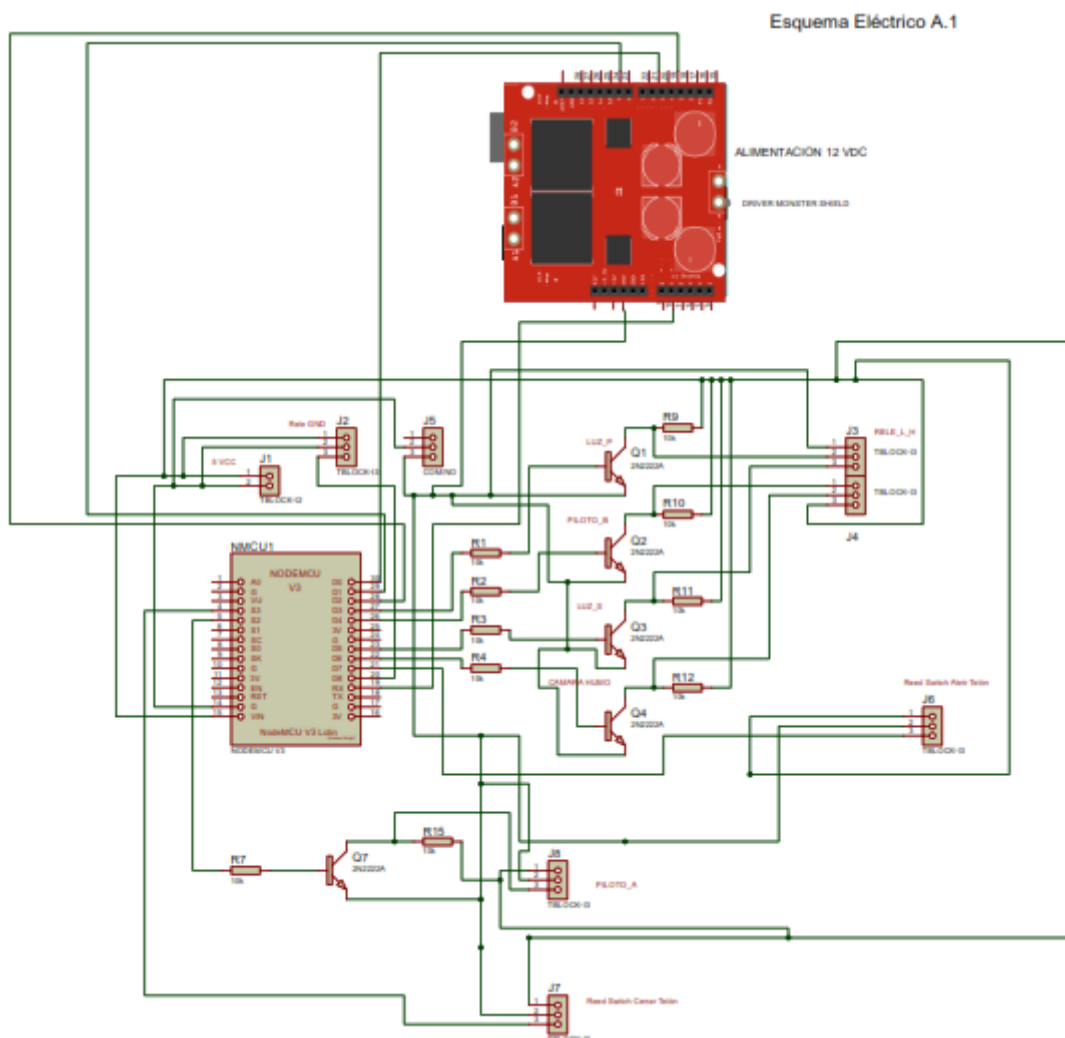
### **Análisis de fallas Eléctricas**

Para comprobar la programación y el estado de las conexiones eléctricas se pueden realizar simulaciones. Proteus es un software de diseño y simulación eléctrica

en el que se pueden medir tensiones y corrientes del circuito. Además, existen las librerías de drivers, sensores y actuadores utilizados, junto con las librerías de Arduino se puede simular el funcionamiento del teatro robótico.

### Figura 55

Simulación del circuito en Proteus



Nota. Fuente Propia (Proteus 8).

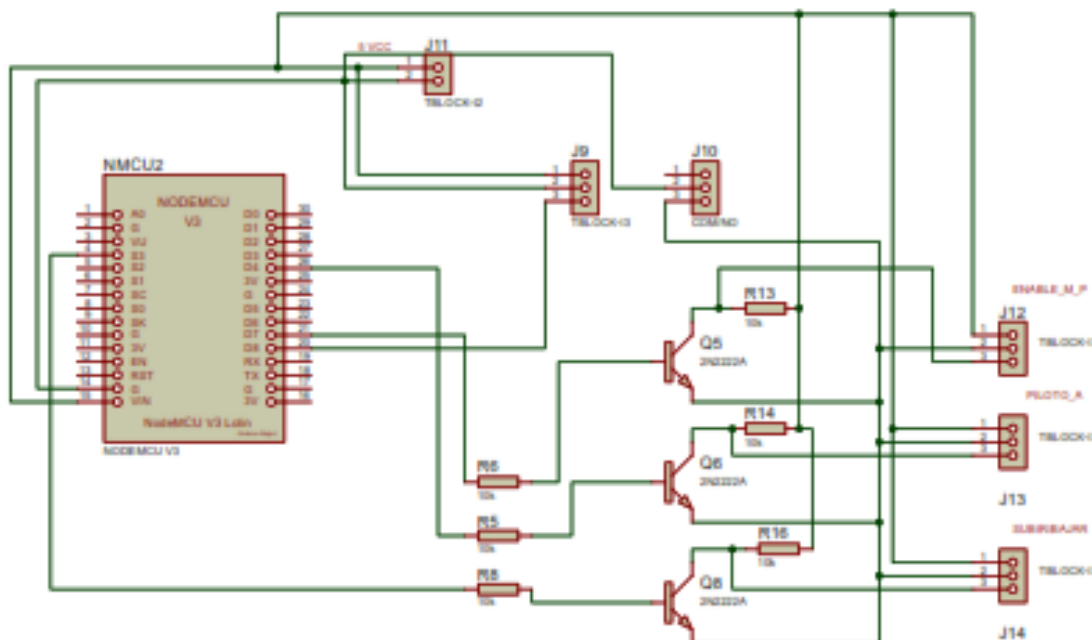
En la siguiente 55 se muestra el circuito diseñado para el control del telón, luces principales, luces secundarias, cámara de humo y luces piloto del tablero. Se incluyen los sensores y actuadores utilizados y los circuitos de acondicionamiento de señal. La

fuentes de alimentación de 5 VDC suministra energía a los elementos de control y la alimentación de 12 VDC a los dispositivos de potencia.

En la siguiente figura se muestra el circuito dedicado al control del elevador con un módulo ESP8266 exclusivo y el driver Vnh2sp30 compartido con el motor del telón.

### Figura 56

*Simulación del circuito dedicado al elevador*



*Nota.* Fuente Propia (Proteus 8).

Con la seguridad del correcto diseño aplicado a los elementos mecánicos y eléctricos del teatro robótico interactivo se culminan las etapas de prueba y refinamiento y se inicia con la construcción e implementación del sistema.

### Inicio de Fabricación

En base al diseño y dimensionamiento realizado en las etapas anteriores las paredes deben ser construidas con una malla de travesaños cuadrados de roble de 40 mm. por lado, para darle rigidez y estabilidad a la estructura, además de distribuir la

carga en varios miembros estructurales y no solo en uno. Para cubrir el armazón del que se compone cada pared se utilizarán planchas delgadas de MDF o tríplex según las necesidades como el espesor o la resistencia requerida.

Se conoce que el Tríplex es más resistente que el MDF y permite uniones empernadas, por lo que se construirá cada pared con las características de la tabla 57.

**Tabla 45**

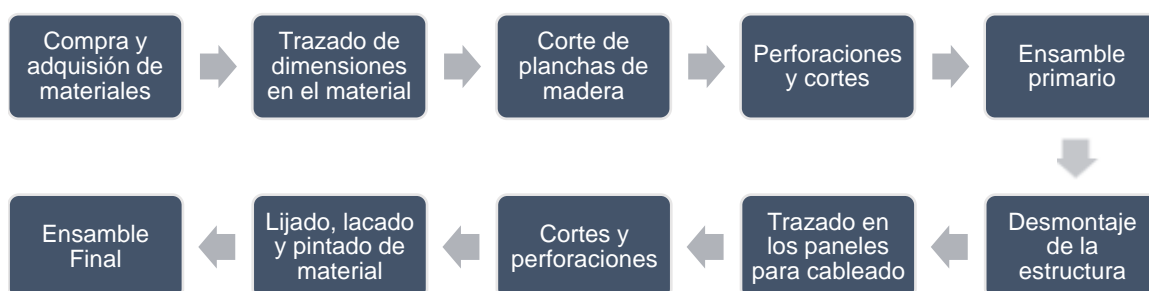
*Configuración de las paredes del escenario*

Descripción	N ° Vigas	N ° Columnas	Recubrimiento
Techo de escenario	7	0	Tríplex 6 mm
Paredes Laterales	4	5	MDF 9 mm
Pared Posterior	2	5	MDF 5mm
Fachada frontal	5	4	Tríplex 15 mm
Pared Frontal Inferior	1	2	MDF 3 mm
Superficie Escenario	7	0	Tríplex 9 mm

El proceso de construcción del escenario es el siguiente:

**Figura 57**

*Proceso de construcción del escenario*



Las siguientes imágenes pertenecen al proceso de construcción del escenario.

## Figura 58

*Fotografías de la construcción del escenario*



(a)



(b)



(c)



(d)

*Nota.* (a) Trazado y corte, (b) Ensamble primario, (c) Pintado de superficies, (d) Ensamble y elevador.

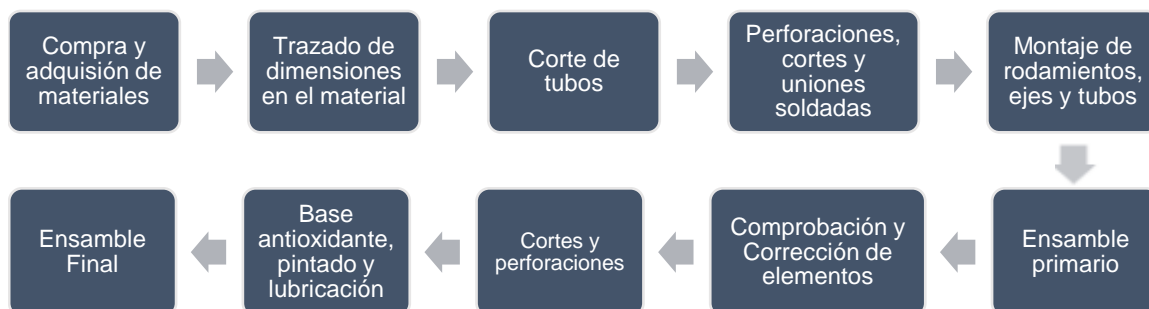
Con el análisis realizado en el diseño del elevador se conocen las dimensiones del mecanismo por lo que se adquirieron 6 metros de tubo cuadrado de 40 mm por lado y 4 metros de tubo rectangular de 40mm x 20mm. El material es acero ASTM A36 y de 1.5 mm de espesor. El mecanismo necesita pasadores, ejes y tubos redondos que se mencionaron en las etapas de diseño.

Será necesario usar rodamientos en los pares rotativos para evitar fricción entre los materiales, por lo que son necesarios 8 rodamientos. Para las uniones soldadas se utilizarán electros AGA 7018, por su resistencia mecánica y el buen acabado superficial que permite obtener. Es uno de los electrodos más comunes para aplicaciones con

acero estructural ASTM A36. Para facilitar la movilidad de la estructura se incorporaron ruedas en la base.

### Figura 59

*Proceso de Construcción del elevador*



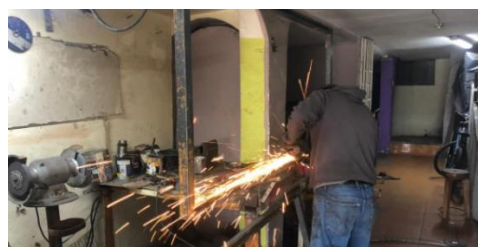
Las imágenes de la siguiente figura corresponden a la construcción del elevador.

### Figura 60

*Imágenes de la construcción del Elevador*



(a)



(b)



(c)



(d)

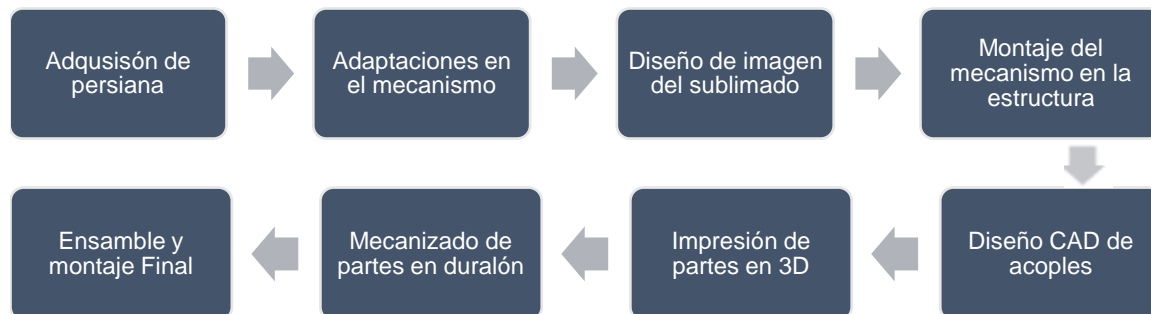
*Nota.* (a) Elementos mecánicos del elevador, (b) Procesos de manufactura, (c) Montaje, (d) Ensamble final.



El Telón del escenario es una adaptación del mecanismo convencional de las persianas, para su implementación fue necesario desarrollar varias operaciones como la impresión de partes en 3D. El proceso se muestra en la siguiente figura.

**Figura 61**

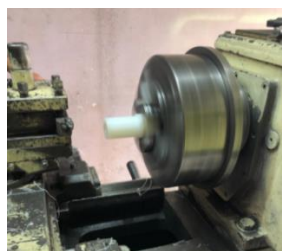
*Proceso de construcción del mecanismo del Telón*



En la figura 62 se muestran imágenes de la construcción del mecanismo del telón del teatro robótico

**Figura 62**

*Imágenes de construcción del Telón*



(a)



(b)



(c)



(d)

*Nota.* (a) operaciones de manufactura, (b) acoples y rueda dentada, (c) Montaje en estructura, (d) Ensamble.

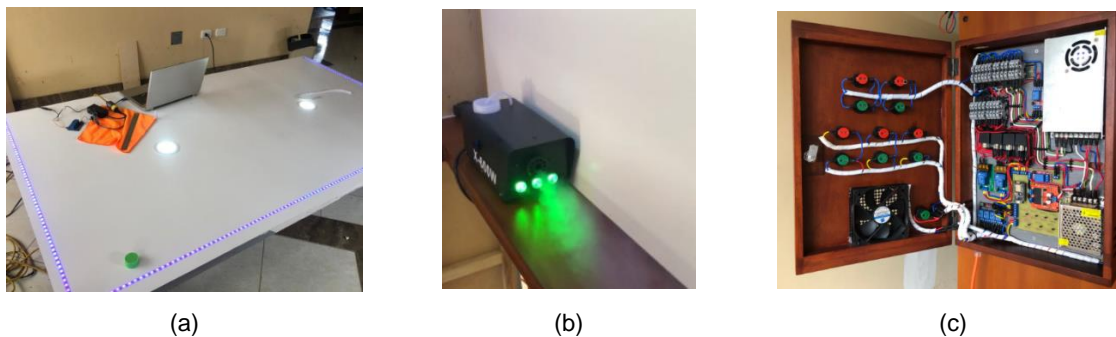
Los componentes de efectos audiovisuales y de iluminación se montaron al finalizar la construcción de las estructuras principales. Los dispositivos se fueron conectando al tablero de control principal, los sensores se colocaron en las posiciones adecuadas y se realizaron pruebas de funcionamiento.

El cableado se realizó cumpliendo los códigos de colores universales para fase, neutro y tierra en el circuito de potencia. De igual manera a nivel de control se utilizó un color específico para señales.

En las conexiones se usaron borneras industriales, acoples para cables macho – hembra, termo encogible de protección y ordenadores de cables en rollo. Se realizaron entradas y salidas de aire en el tablero para ventilación de los dispositivos.

### Figura 63

*Cableado y Montaje de los dispositivos eléctricos y electrónicos*

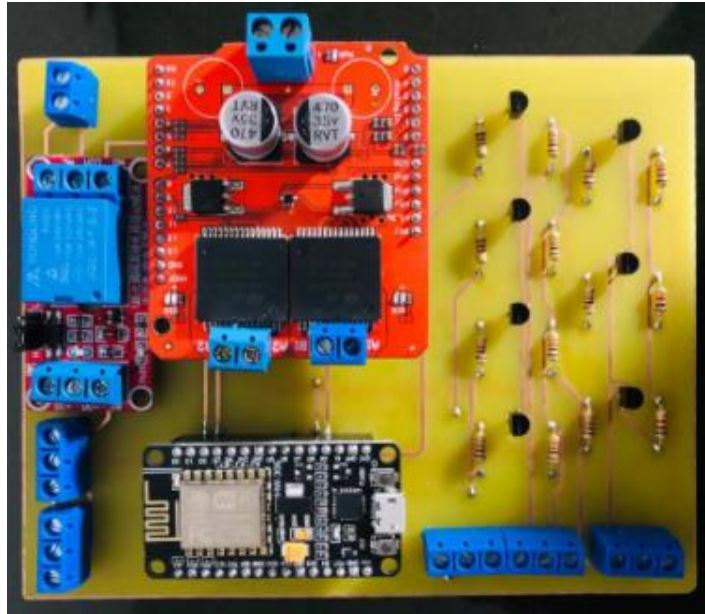


*Nota.* (a) y (b) montaje de dispositivos iluminación y audiovisuales, (c) Tablero de control.

Se diseñó una placa PCB para la conexión de los dispositivos con el fin de evitar el uso de protoboard o pistas “galleta”. En la figura 64 se muestra el diseño impreso de la PCB realizada en proteus.

**Figura 64**

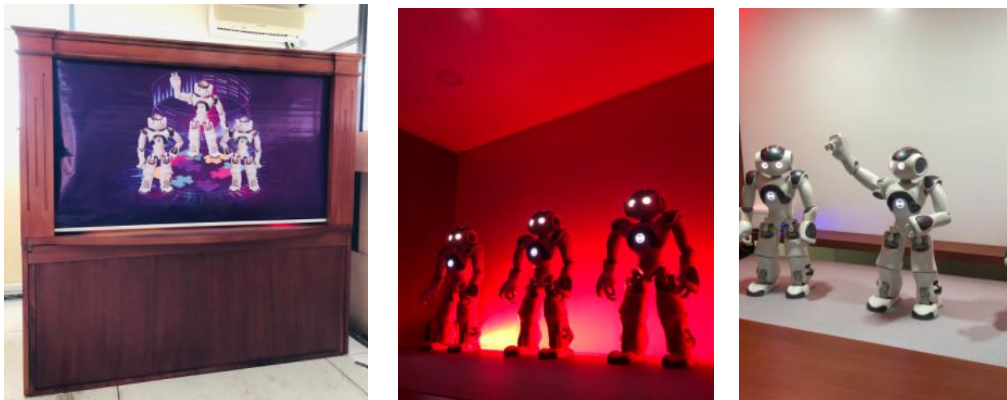
*Placa PCB del circuito*



Finalmente, con todos los subsistemas del teatro robótico construidos se realizó el ensamblaje y posteriormente ligeras correcciones para que todo encaje a la perfección.

**Figura 65**

*Teatro Robótico Interactivo ensamblado*



El teatro robótico cumple con las métricas de peso, estabilidad, fácil transportación y una amplia superficie de actuación para los robots. Además, la sinergia entre los mecanismos automatizados con la escenografía y efectos audiovisuales resulta ser llamativo e innovador.

### **Conclusión del Capítulo 3**

En este capítulo se utilizó la “Metodología de Diseño y Desarrollo de productos” para la construcción del Teatro Robótico. En cada nivel de esta metodología se llevaron a cabo operaciones que dieron como resultado la implementación mecánica y electrónica de este proyecto de robótica colaborativa. Se cumplieron todas las etapas con el orden establecido: Planeación, Desarrollo del Concepto, Diseño a nivel de sistema, Diseño a nivel de Detalle, Pruebas y Refinamiento y Construcción.

Se dividió el subsistema de escenografía en 4 secciones: Escenario, Elevador, Telón y Efectos Audiovisuales, cada una de estas secciones se dividieron en módulos: mecánicos y eléctricos. Esta metodología permite el diseño a partir de información general que se va precisando hasta alcanzar la exactitud necesaria para la construcción.

Se desarrolló el dimensionamiento de los componentes estructurales y eléctricos del escenario, todos trabajan con amplios márgenes de seguridad. Se seleccionaron los dispositivos de control y se conectaron los circuitos para el funcionamiento de cada elemento del escenario. Se analizó la resistencia del material de los mecanismos según el criterio de falla de Von Mises y median un software CAD (SolidWorks) se simuló el funcionamiento y se realizó un análisis estático de fuerzas.

## Capítulo 4

### Desarrollo e Implementación de Software

En el cuarto capítulo se presenta el desarrollo e implementación de los subsistemas de control y actuación del teatro robótico interactivo.

#### Desarrollo del Subsistema de Actuación

El subsistema de actuación se encuentra conformado principalmente por rutinas, basadas en diferentes acciones y gestos, programadas en los robots actores; el desarrollo del narrador y el desarrollo de las acciones del escenario. Este subsistema presenta una estructura general al cual se le puede implementar diferentes guiones teatrales para ser interpretados por el teatro robótico interactivo.

#### *Creación de rutinas*









Las rutinas que serán realizadas por los robots interactivos NAO se presentan en la tabla 46. Las rutinas implementadas se basan en las siguientes categorías:





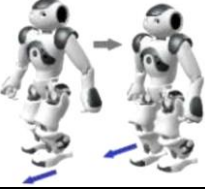
- a) Gestos dinámicos que permitirán a niños y jóvenes mejorar el nivel de interacción con su entorno.
- b) Acciones que ayudarán en diferentes entornos como la enseñanza en niños, terapias en niños y adolescentes con trastornos y discapacidades como el autismo, utilizando los robots NAO.
- c) Acciones que complementarán la actuación de los robots en el escenario.
- d) Acciones que complementarán la escenografía en el escenario (Prócel, 2020).

Los requerimientos para el desarrollo de los gestos y acciones tanto de los robots como del escenario de implementaron con las recomendaciones de profesionales expertos en la enseñanza de niños.

Tabla 46

*Rutinas realizadas por los robots actores NAO*

Categoría	Rutina	Descripción	Gráfico
A	Tranquilo	El robot flexiona sus brazos y ubica sus manos cerca de su cadera.	
	Llorar	El robot ubica su brazo derecho cerca del rostro y gira la cabeza de izquierda a derecha.	
	Hambre	El robot ubica su brazo derecho cerca del estómago y realiza movimientos circulares.	
	Señalar/Apuntar	El robot eleva y estira su brazo derecho.	
	Exclamar	El robot eleva sus brazos y los mueve de forma circular.	
	Negar	El robot mueve su cabeza de un lado al otro.	
	Afirmar	El robot mueve su cabeza de arriba abajo.	
	Saludar	El robot eleva su brazo derecho y lo mueve de un lado al otro.	

Categoría	Rutina	Descripción	Gráfico
B	Manos arriba	El robot eleva sus brazos verticalmente.	
	Manos a la derecha	El robot mueve sus brazos a la derecha.	
	Manos a la izquierda	El robot mueve sus brazos a la izquierda.	
C	Hablar	El robot se encarga de procesar el texto recibido y lo procesa a voz.	
	Caminar	El robot se mueve en línea recta mediante el movimiento de sus piernas	

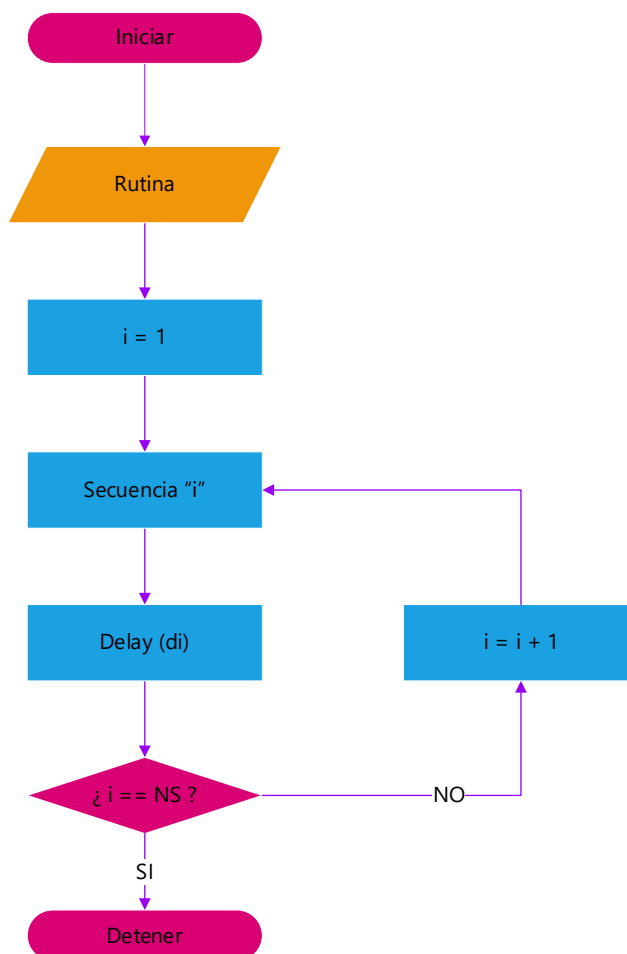
*Nota.* Obtenido de (Prócel, 2020).

### **Desarrollo de rutinas**

Para que los robots NAO puedan realizar las rutinas establecidas de las diferentes categorías A y B, se debe asignar los ángulos de movimiento a cada una de las articulaciones del robot para realizar un gesto o una acción. La Figura 66 muestra el proceso general seguido de la programación para realizar cada proceso. Donde NS significa "número de secuencias". Las rutinas de la categoría C ya están integrados en el robot y no es necesario programarlos (Prócel, 2020).

**Figura 66**

*Diagrama de Flujo: Ejecución general de cada rutina*



*Nota.* Obtenido de (Prócel, 2020)

Cada una de las secuencias se encuentran conformadas por un conjunto de ángulos indispensables que permiten el movimiento de cada una de las articulaciones del robot para realizar cada rutina, las cuales se encuentran separadas por un intervalo de tiempo “d” [ms]. Para los gestos y acciones, solamente se necesita únicamente el control del movimiento de la extremidad superior izquierda, extremidad derecha y de la cabeza, y se han establecido las funciones detalladas en la Tabla 47. Los hilos desarrollados en base a estas funciones para la ejecución de cada rutina se presentan en las Tablas 48 y 49.



**Tabla 47**

*Funciones para el control del movimiento de las extremidades del robot NAO*

Función	Extremidad que Controla	Argumentos	Descripción
EnviarAngulosDerecho	Derecha	(AH, RH, AC, RC, MU, MA)	AH: Ángulo de apertura del hombro RH: Ángulo de rotación del hombro AC: Ángulo de apertura del codo RC: Ángulo de rotación del codo
EnviarAngulosIzquierdo	Izquierda	(AH, RH, AC, RC, MU, MA)	MU: Ángulo de rotación de la muñeca MA: Apertura o cierre de la mano
EnviarAngulosCabeza	Cabeza	(AC, RC)	AC: Ángulo Pitch RC: Ángulo YAW

*Nota.* Obtenido de (Prócel, 2020).

**Tabla 48**

*Secuencias desarrolladas para las rutinas de los robots actores NAO*

Gesto	NS (N° de Secuencia)	"d" [s] (delay)	N°	Secuencias
Tranquilo	1	1	S1	EnviarAngulosDerecho (-16.5, 81.5, 58.5, 23.5, 6.0, 0.40) EnviarAngulosIzquierdo (16.5, 81.5, -58.5, -23.5, 6.0, 0.40)
			S1	EnviarAngulosCabeza (11.5, -26.5) EnviarAngulosDerecho (-0.6, -40, 80, -5.7, 5.8, 0.10)
Llorar	5	d <sub>1</sub> = 1.5 d <sub>2-5</sub> = 1	S2	EnviarAngulosCabeza (3.0, 21.5, 0.2) EnviarAngulosDerecho (-0.6, -40, 80, -5.7, 5.8, 0.10)
			S3	EnviarAngulosCabeza (4.0, -25.5)
			S4	EnviarAngulosCabeza (4.0, 22)
			S5	S5 = S3
			S1	EnviarAngulosDerecho (-5.5, 62.5, 83.5, 15.5, 6.5, 0.10)
Hambre	5	d <sub>1</sub> = 1.5 d <sub>2-5</sub> = 0.65	S2	EnviarAngulosDerecho (0.5, 78, 60.5, 15.5, 6.5, 0.10)
			S3	S3 = S1
			S4	S4 = S2
			S5	EnviarAngulosDerecho (-0.6, 80.8, 61, 15, 6, 0.10)
			S1	EnviarAngulosDerecho (-60.5, -50.5, 60.5, 45.5, 83.5, 0.12) EnviarAngulosIzquierdo (60.5, 50.5, -60.5, -45.5, -83.5, 0.12)
Exclamar	4	1	S2	EnviarAngulosDerecho (-35.5, 23, 61, 45.5, 83.5, 0.12) EnviarAngulosIzquierdo (35.5, 23, -61, -45.5, -83.5, 0.12)
			S3	S3 = S1
			S4	S4 = S2

Gesto	NS (N° de Secuencia)	"d" [s] (delay)	N°	Secuencias
Negar	3	0.5	S1	EnviarAngulosCabeza (-6, -30.5)
			S2	EnviarAngulosCabeza (-6, 30.5)
			S3	EnviarAngulosCabeza (-6, -30.5)
Afirmar	4	0.5	S1	EnviarAngulosCabeza (-17, 0.0)
			S2	EnviarAngulosCabeza (7, 0.0)
			S3	S3 = S1
			S4	S4 = S2
Manos Arriba	2	d <sub>1</sub> = 2 d <sub>2</sub> = 1	S1	EnviarAngulosDerecho (-16.5, 80.5, 58.5, 22.5, 6.0, 0.30) EnviarAngulosIzquierdo (16.5, 80.5, -58.5, -22.5, 6.0, 0.30)
			S2	EnviarAngulosCabeza (-30.5, 0.2)
Manos a la Derecha	1	1	S1	EnviarAngulosCabeza (-6.8, -50) EnviarAngulosDerecho (-56.7, -28.6, 19.4, 90.5, -24.5, 100) EnviarAngulosIzquierdo (-18, -14.8, -35, -51.4, 4.8, 100)
Manos a la Izquierda	1	1	S1	EnviarAngulosCabeza (-6.5, 50) EnviarAngulosDerecho (15.5, -14, 52.0, 26.3, -5.0, 100) EnviarAngulosIzquierdo (75.3, -28.0, -19.5, -90.0, 24.2, 100)

Nota. Obtenido de (Prócel, 2020).

**Tabla 49**

*Secuencias implementadas para la rutina "Saludar"*

Gesto	NS (N° de Secuencia)	"d" [s] (delay)	N°	Secuencias
Saludar	11	0.4	S1	EnviarAngulosDerecho (-14.3, 13.5, 78.3, -17.7, 0, 0.20) EnviarAngulosIzquierdo (20.8, 64.0, -78.5, -46.2, 5.7, 0.30)
			S2	EnviarAngulosCabeza (17.0, -7.4) EnviarAngulosDerecho (-15.2, 11.8, 77.2, -16.7, 0, 0.30)
			S3	EnviarAngulosCabeza (-4.1, -17.5) EnviarAngulosDerecho (-54.6, -67.0, 14.3, 32.5, -17.6, 0.30)
			S4	EnviarAngulosDerecho (-44.6, -65.5, 19.5, 20.8, -17.6, 0.65)
			S5	EnviarAngulosCabeza (-18.6, -23.1) EnviarAngulosDerecho (-26.6, -62.7, 53.0, 0.7, -17.7, 0.85)
			S6	EnviarAngulosCabeza (-16.3, -24.1) EnviarAngulosDerecho (-43.2, -68.7, 39.2, 11.5, -17.7, 0.86)
			S7	EnviarAngulosDerecho (-54.5, -71.7, 11.2, 19.51, -17.7, 0.86)
			S8	EnviarAngulosDerecho (-27.6, -62.7, 52.0, 2.1, -17.7, 0.86)
			S9	EnviarAngulosCabeza (-9.7, -28.8) EnviarAngulosDerecho (-18.8, -62.1, 45.5, 26.5, -17.7, 0.86)
			S10	EnviarAngulosCabeza (-16.3, -24.1) EnviarAngulosDerecho (-18.8, -62.1, 45.5, 26.5, -17.7, 0.86)
			S11	EnviarAngulosDerecho (-16.0, -31.1, 58.5, 55.5, -10.7, 0.86)

Nota. Obtenido de (Prócel, 2020).

### ***Implementación del Narrador***

El ordenador actúa como narrador, gracias a su facilidad de uso, la capacidad de conectarse a diferentes altavoces, un dispositivo de audio que incrementen el volumen mientras se ejecute la obra teatral, con el objetivo de no perder a un robot como actor.

Para llevar a cabo la programación del narrador, se utiliza servicios de código abierto que permiten la posibilidad de realizar la función de “text to speech”.

El desarrollo del narrador se lo hace mediante la librería de Python “Pyttss”, la que se encarga de habilitar el servicio utilizando los paquetes de voz propios de Windows que se encuentren implementados en el ordenador.

Para implementar el narrador con teatro robótico interactivo, se desarrolla un código en Python usando la librería “Pyttss”, asignando un tipo de voz predeterminado del ordenador y en conjunto con la estructura del protocolo MQTT que se explica más adelante (Prócel, 2020).

### ***Establecimiento de las acciones del escenario***

Las acciones que serán realizadas para el escenario se encuentran basadas en un teatro real, cada acción dentro del escenario cumple una aplicación específica que permite la interacción entre los robots y la escenografía dentro de cada obra de teatro, para lo cual se establecen las acciones detalladas en la Tabla 50.

Para realizar la programación del escenario se utiliza servicios de código abierto como es el caso de Python, Arduino y conjuntamente con la estructura del protocolo MQTT. El desarrollo del escenario se realiza utilizando el Módulo ESP8266 ya que es uno de los dispositivos más utilizados en aplicaciones de IoT, posee la cantidad de entradas y salidas exactas para recibir y enviar instrucciones a los otros elementos eléctricos del teatro robótico. Se puede utilizar más de un módulo ESP8266 en la red

dado que se utiliza el protocolo MQTT para la comunicación y el servidor podrá gestionar la transmisión de datos con varios dispositivos simultáneamente (Prócel, 2020).

**Tabla 50**

*Acciones para controlar el funcionamiento del Escenario Robótico*

Acción	Control	Descripción	Gráfico
Luces Primarias	Encender/Apagar	Se encarga de encender o apagar las luces blancas dentro del escenario	
Luces RGB	Encender/Apagar	Se encarga de encender o apagar las luces RGB dentro del escenario	
Telón	Abrir/Cerrar	Esta acción permite abrir o cerrar el telón	
Plataforma	Subir/Bajar	Esta acción permite subir o bajar la plataforma	
Humidificador	Habilitar/Deshabilitar	Se encarga de habilitar o deshabilitar la máquina de humo	

### ***Estructura general del guion teatral***

Para llevar a cabo la ejecución del guion teatral, se previó desarrollar una estructura que tenga la capacidad de organizar el guion en acciones que logren ser interpretadas por un único actor a la vez o por más actores al mismo tiempo según la historia que se realice; es decir que las rutinas se puedan ejecutar paralelamente.

La estructura de una obra de teatro clásica o tradicional se basa principalmente de actos y escenas, y dentro de cada escena se realizan actividades o tareas. La

estructura para el guion del teatro robótico interactivo que se muestra en la Figura 67, se basa en la de un teatro clásico, y consta de tres elementos básicos: Actos, Escenas y Tareas. El orden de ejecución se realizará acto por acto y dentro de cada acto, se ejecuta escena por escena y dentro de cada escena, se ejecutan las tareas paralelamente (Prócel, 2020).

Los elementos con los que se encuentra conformado el guion de la obra de teatro robótico se detalla a continuación.

**Tarea:** La tarea es cada una de las diferentes acciones que serán realizadas por cualquiera de los participantes del teatro robótico (Actores, Narrador, Escenario). Para los actores, se podrá aplicar distinto gesto o rutina de los que se detallaron anteriormente. Para el narrador únicamente se especificará el texto que se convertirá en voz por el ordenador. Finalmente, para el escenario, se podrá especificar diferentes acciones a controlar del escenario que se detallaron anteriormente en la Tabla 50.

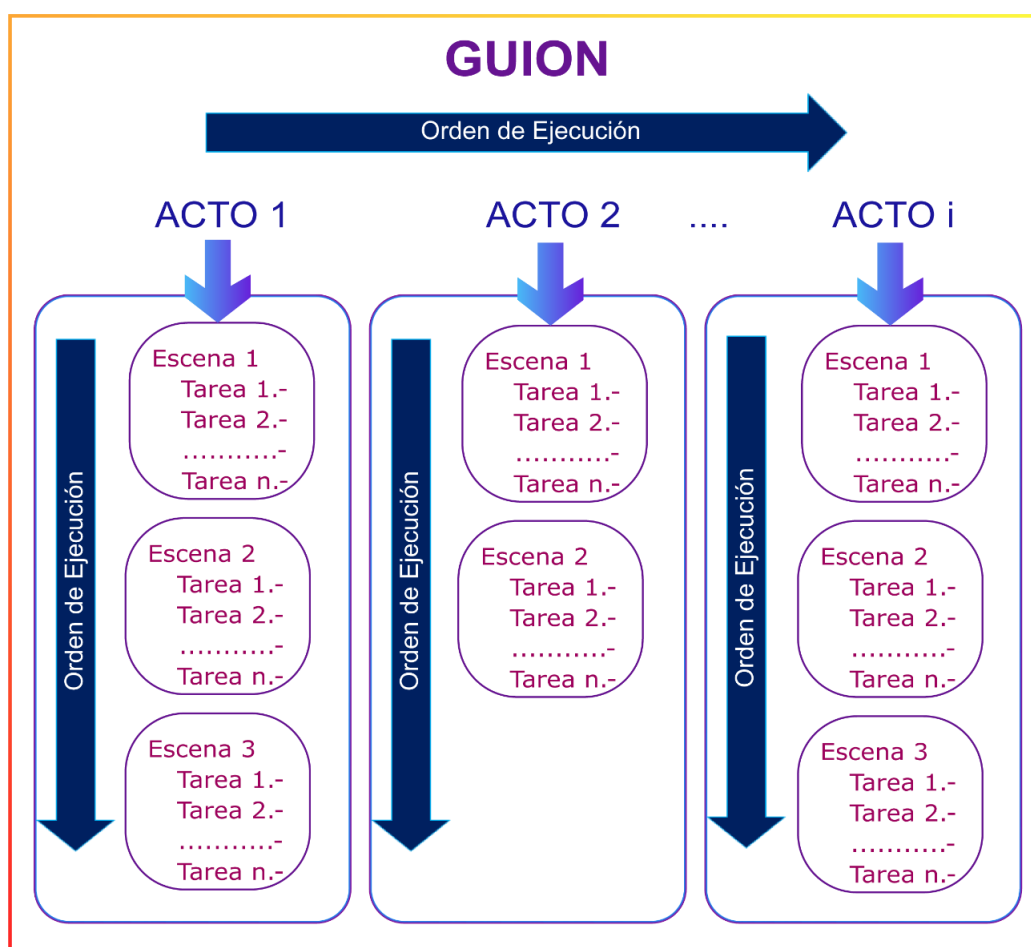
**Escena:** La escena se encuentra conformada por una o más tareas, la finalidad de las escenas es agrupar un sinnúmero de tareas, las cuales se ejecutarán de forma paralela según se lo requiera, es decir al momento en que se ejecute una escena, se ejecutarán todas las tareas que se encuentren dentro de dicha escena.

Es decir, si por ejemplo se necesita que un actor realice una acción de manera individual, “Saludar”, y luego de esta otro robot actor “Negar”, se deberá especificar estas acciones por escenas separadas, ya que si estas dos acciones se las ubica dentro de una sola escena, las acciones se realizaran paralelamente, es decir ambos robots realizaran las acciones al mismo tiempo, pero si se desea realizar acciones por separado siempre se deberá crear una escena independiente para cada acción que se requiera que realice un robot en específico (Prócel, 2020).

**Acto:** Un acto en cambio es un conjunto de escenas. Su propósito es similar al de un guion teatral tradicional, es el que se encarga de dividir el guion en historias específicas según los requerimientos del creador del guion. En un teatro tradicional se implementan actor para diferenciar el principio, el nudo y el desenlace de una trama, en los que cada uno de estos es un acto respectivamente (Prócel, 2020).

**Figura 67**

*Estructura general del guion de la obra teatral*



### **Desarrollo del subsistema de Control**

El subsistema de control se basa en la interfaz que se encarga de manejar todo el sistema del teatro robótico interactivo, que implementa el protocolo MQTT para la comunicación con los diferentes elementos y dispositivos del teatro (Prócel, 2020).

### Estructura MQTT

El protocolo MQTT que se implementa consiste en una estructura de cliente/servidor, la comunicación se la realiza mediante publicador y suscriptor mediante el uso de tópicos en común.

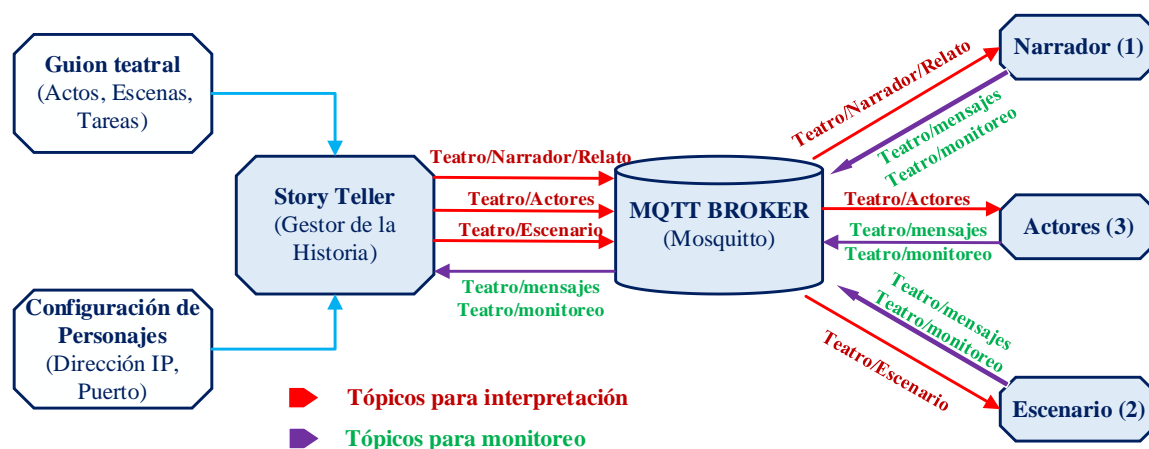
**Broker:** Servidor MQTT que se encarga de la mensajería (Donde se conectan los clientes que publican o se suscriben a tópicos).

**Publicador:** Es el encargado de publicar los diferentes mensajes a un tópico.

**Suscriptor:** Es el componente que se suscribe a uno o varios tópicos.

**Figura 68**

*Estructura MQTT del teatro robótico interactivo*



Para desarrollar la interpretación y el monitoreo de la obra teatral, se implementó la estructura mostrada en la Figura 68. Esta estructura consta en primer lugar del servidor MQTT Mosquitto, y de 7 clientes: los 3 robots actores, el narrador, 2 clientes del escenario, y el administrador de la historia denominado “Story Teller”.

La configuración del guion y la configuración de los recursos de cada personaje es centralizada por el gestor de la historia “Story Teller”. El gestor de la historia es el

que procesa cada tarea, escena y acto del guion teatral con la finalidad de transformar las instrucciones que serán enviadas a cada participante del teatro mediante la aplicación del protocolo MQTT. Los tópicos que se usan se detallan en la Tabla 51.

**Tabla 51**

*Tópicos para la comunicación MQTT con el teatro robótico*

Participante	Tópico Publicador	Tópico Suscriptor
Actores	Teatro/monitoreo	teatro/actores/nao/N°
Narrador	Teatro/mensajes	teatro/narrador/relato
Escenario		teatro/escenario
Story Teller	teatro/actores/nao/N° teatro/narrador/relato teatro/escenario	teatro/monitoreo teatro/mensajes

*Nota:* “N°” será reemplazado por “uno”, “dos”, “tres”, según el actor que ejecute la instrucción. Obtenido de (Procel, 2020).

Mediante esto, y en base al guion establecido, cuando el gestor de la historia deba comunicar una instrucción a alguno de los actores, lo hará publicando dicha instrucción a través del tópico “teatro/actores/nao/N°”, al cual los actores estén suscritos.

Mientras que cuando se deba comunicar una instrucción al escenario, se lo realizará a través del tópico “teatro/escenario”, y para enviar la instrucción al narrador se lo hará a través del tópico “teatro/narrador/relato”.

Tanto los actores, el narrador y el escenario, cada vez que haya finalizado la ejecución de la instrucción recibida, realizaran una comunicación con el gestor de la historia, diciendo que han realizado la instrucción de forma satisfactoria o si no la han realizado, y que de esta forma se encuentran listos para realizar otra instrucción mediante los tópicos “teatro/mensajes” y “teatro/monitoreo” respectivamente. De esta manera, el gestor de la historia podrá realizar un monitoreo respectivo del progreso



general de la obra, mensajes que mostrará al usuario mediante la interfaz que ejecuta el teatro robótico que se detallará más adelante (Prócel, 2020).

### ***Desarrollo de la HMI***

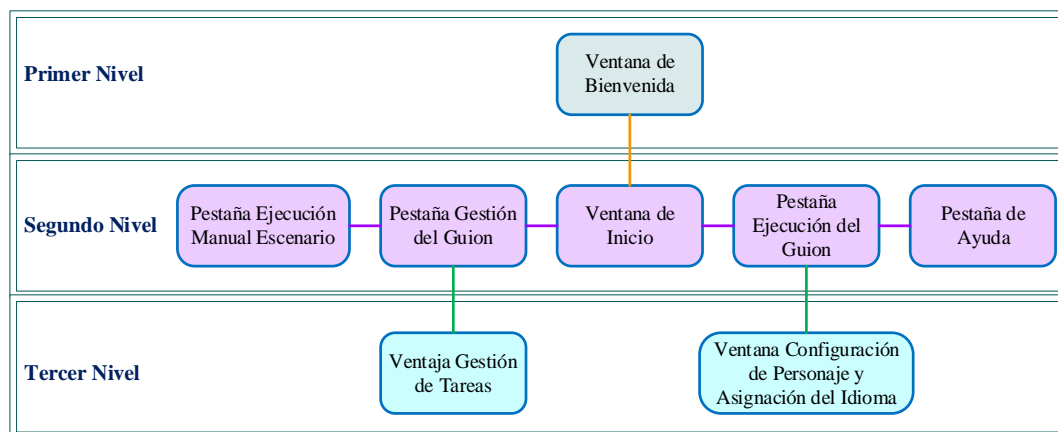
La interfaz es desarrollada con la finalidad de permitir al usuario tener la capacidad de interactuar y realizar las funciones que se detallan a continuación:

- Creación y edición del guion teatral mediante actos, escenas y tareas.
- Asignación de los diferentes recursos para la configuración de los diferentes integrantes dentro de la obra, ya sean actores, narrador y escenario.
- Asignación de diferentes acciones indispensables para el control manual del escenario robótico.
- Ejecución y el respectivo monitoreo de cada acto dentro de la obra teatral, mediante la aplicación del protocolo MQTT.

Para llevar a cabo esto, la interfaz implementará 4 ventanas organizadas según a la jerarquía mostrada en la Figura 69. La interfaz se desarrollará a través del uso de Python y la librería PyQt4 (Prócel, 2020).

**Figura 69**

*Jerarquía de ventanas y pestañas*



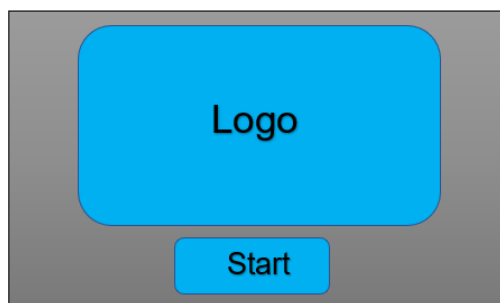
*Nota.* Obtenido de (Procel, 2020).

### A) Ventana de Bienvenida

En esta ventana se presentará el LOGO del teatro robótico y se asignará un botón que permitirá el usuario ingresar a la siguiente ventana de inicio. El esquema de la ventana a realizar se muestra en la Figura 70 (Prócel, 2020).

#### Figura 70

*Esquema para la ventana de Bienvenida*

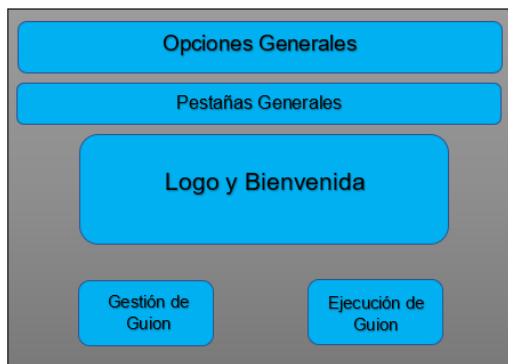


### B) Ventana de Inicio

En esta ventana se presentará el LOGO del teatro robótico y se implementará dos opciones que puedan ser seleccionadas por el usuario para usar el software: Gestión del guion, o ejecutar el guion. El esquema de la ventana a realizar se presenta en la Figura 71 (Prócel, 2020).

#### Figura 71

*Esquema para la ventana de inicio*

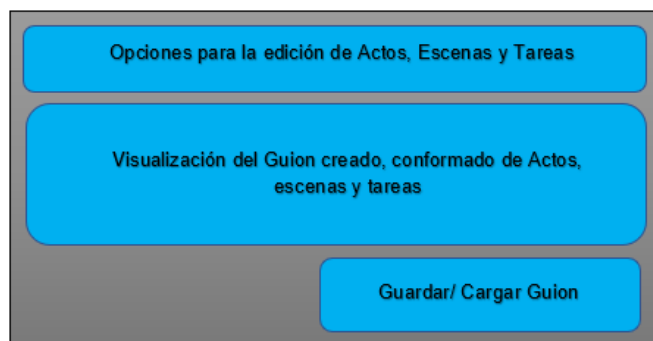


### C) Pestaña Gestión del Guion

En la pestaña de gestión del guion se implementará las opciones necesarias al usuario para que sea capaz de crear un nuevo guion o la edición del mismo o uno ya existente. El esquema de la ventana a realizar se muestra en la Figura 72.

#### Figura 72

*Esquema para la pestaña de Gestión del Guion*

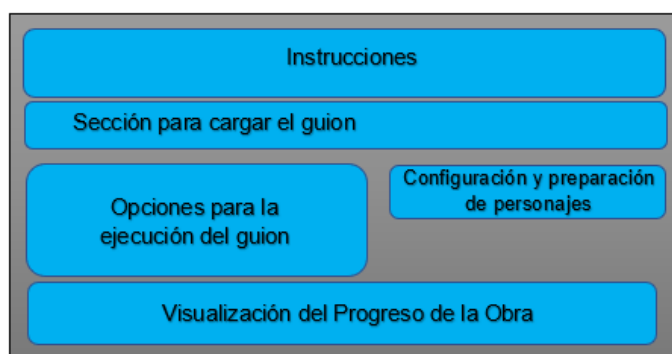


### D) Pestaña Ejecución del Guion

En esta ventana se presentará la facilidad al usuario para que pueda cargar un guion creado previamente, para realizar la ejecución del mismo. Además, se visualizará el progreso respectivo de cada acto de la obra en tiempo real. El esquema de la pestaña para la ejecución del guion se muestra en la Figura 73 (Prócel, 2020).

#### Figura 73

*Esquema para la pestaña Ejecución del Guion*

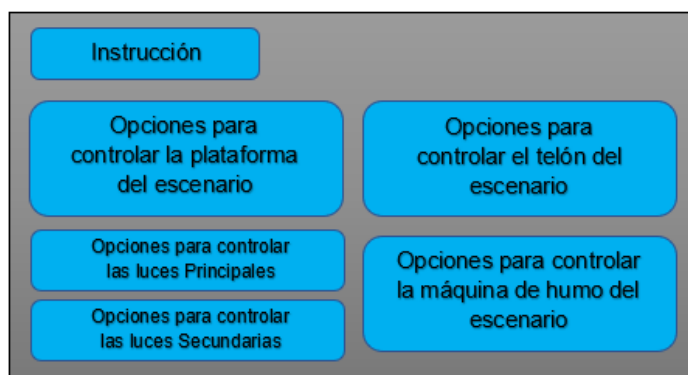


### E) Pestaña Ejecución Manual del Escenario

En esta pestaña, el usuario tendrá la facilidad de controlar los dispositivos que forman parte del teatro robótico de forma manual. El diseño de la pestaña para la ejecución manual del escenario se presenta en la Figura 74 (Procel, 2020).

#### Figura 74

*Esquema para la pestaña ejecución manual del Escenario*



### F) Ventana Gestión de Tareas

A esta ventana, se podrá acceder a través de la pestaña de “Gestión del guion”, el usuario tendrá la capacidad de ingresar toda la información relevante para definir una tarea o acción tanto de los robots como del escenario respectivamente. La información que se deberá especificar es la mostrada a continuación (Prócel, 2020):

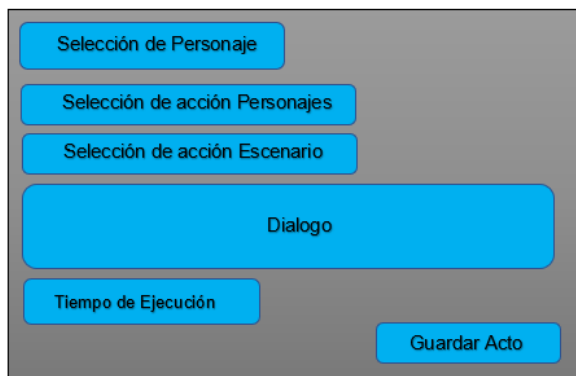
- *Personaje*: Participante encargado de realizar una tarea en específica.
- *Acción Personaje*: Es dicha acción que será realizada por un participante en especial.
  - o Para los actores, se podrá seleccionar todos los gestos y rutinas que fueron mencionados anteriormente.
  - o Para el narrador, no se ejecutará ninguna acción previa.

- Para el escenario, se podrá especificar que acción se desea realizar “Plataforma”, “Telón”, “Luces Principales”, “RGB”, “Humidificador”.
- *Acción Escenario:* Es dicha acción que será realizada por cada uno de las acciones que se podrá escoger del escenario.
  - De la Plataforma se podrá escoger la acción de “Subir” o “Bajar”.
  - Del Telón se podrá escoger la acción de “Abrir” o “Cerrar”.
  - De las Luces Principales se podrá escoger la acción de “Encender” o “Apagar”.
  - De las RGB se podrá escoger la acción de “Activar” o “Desactivar”.
  - Del Humidificador se podrá escoger la acción de “Habilitar” o “Deshabilitar”.
- *Diálogo:* En este campo se podrá ingresar el dialogo correspondiente tanto para el narrador como también para los actores que hayan seleccionado la acción de “Hablar”.
- *Tiempo de Ejecución:* Este es el tiempo de duración de una acción en especifica que el usuario podrá asignarla. El tiempo de ejecución únicamente será habilitado para los gestos o rutinas que realicen únicamente los actores, a excepción de la acción de “Hablar”, ya que esta no tendrá un tiempo de ejecución, de igual forma para las acciones del escenario, el tiempo de ejecución no tendrá ningún funcionamiento.
- *Guardar Acto:* Esta sección permitirá guardar cada tarea independientemente según el usuario vaya asignándole a cada personaje (Prócel, 2020).

El diseño de esta ventana se muestra en la Figura 75.

**Figura 75**

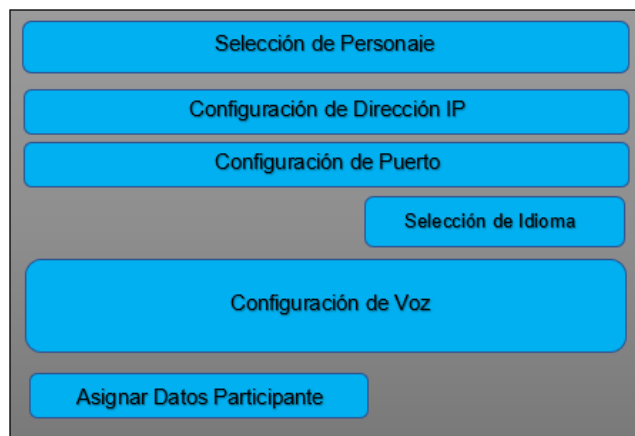
*Esquema para la ventana de Gestión de Tareas*

**G) Configuración de Recursos Personajes**

Esta ventana se realizará para el ingreso de la configuración de recursos para cada uno de los participantes que se encuentren dentro del guion, para los actores se especificará la dirección IP, el puerto al que trabaja un robot NAO, en este caso será el puerto "9559", además se podrá configurar la voz, el volumen de cada uno de los actores y se podrá seleccionar el idioma general para la obra teatral, a la cual se desea que los actores hablen.

**Figura 76**

*Esquema para la ventana de Configuración de recursos de Personajes*



Para el narrador se podrá configurar únicamente la voz. Mientras que para el escenario se deberá especificar la dirección IP del protocolo MQTT “127.0.0.1”, y el puerto “1883” (Prócel, 2020).

## Implementación del Software

Finalmente, se desarrolla la respectiva programación e implementación del software para el teatro robótico interactivo en base a todas las características detalladas previamente. Las distintas ventanas, pestañas y opciones del software desarrollado y su respectiva descripción se presentan a continuación.

### A) Ventana de Bienvenida

La ventana de bienvenida desarrollada se muestra en la Figura 77, y la descripción respectiva de sus componentes y funcionalidades.

### B) Inicio

La ventana de inicio desarrollada se muestra en la Figura 78, y la descripción de sus componentes y su funcionamiento se detallan en la Tabla 53.

## Figura 77

*Interfaz. Ventana de Bienvenida*

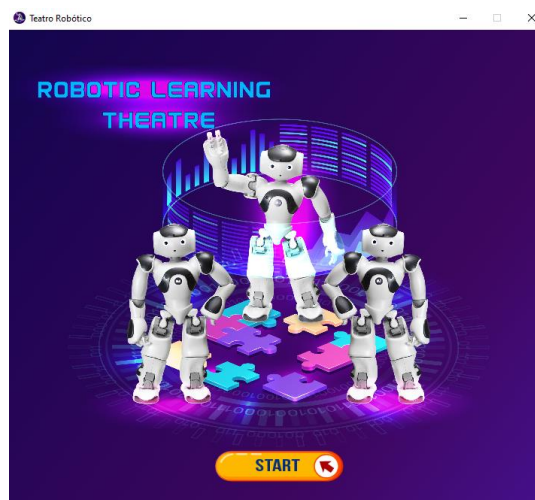


Tabla 52

Descripción de componentes y funcionalidades de la Ventana de Bienvenida


Componentes	Función
	Este botón permite al usuario acceder a la ventana de Inicio

Figura 78

Interfaz. Ventana de Inicio.

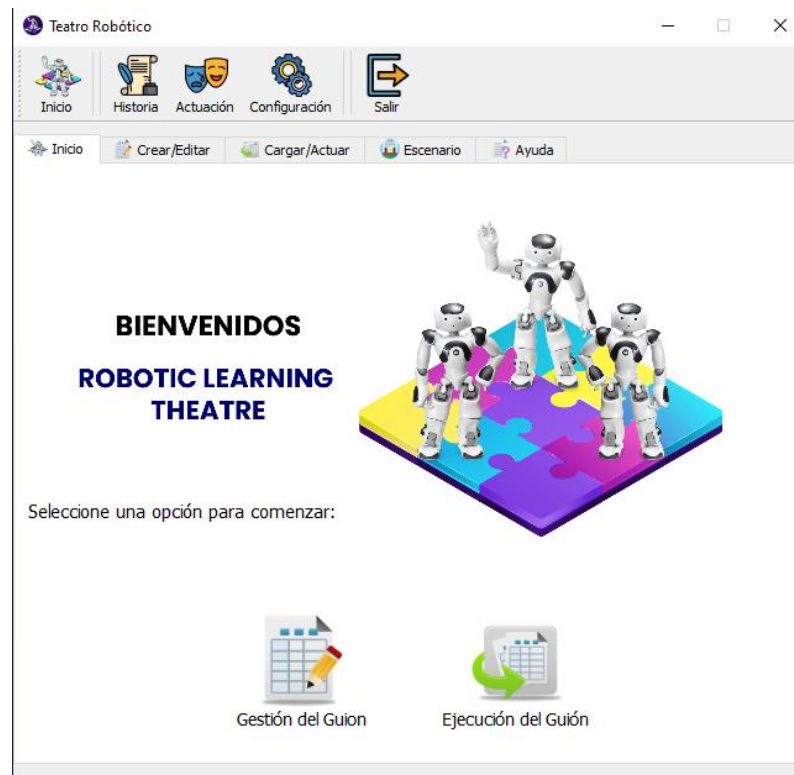




Tabla 53

Descripción de componentes y funcionalidades de la Ventana de Inicio

Componentes	Función
	Permite navegar hacia la pestaña de Inicio



Componentes	Función
	Cualquiera de las tres opciones permite al usuario acceder a la pestaña para crear o editar un guion.
	Cualquiera de las tres opciones permite al usuario acceder a la pestaña para cargar y ejecutar un guion.
	Este botón permite al usuario acceder a la ventana encargada de configurar a cada uno de los personajes.
	Esta pestaña permite al usuario poder acceder a la ventana donde podrá realizar las acciones del escenario de forma manual
	Esta pestaña muestra al usuario información detallada de cómo usar el software y como crear los guiones de la obra.
	Este botón permite al usuario salir del software regresando a la ventana de bienvenida.

*Nota.* Obtenido de (Procel, 2020).

### C) Gestión del Guion

La pestaña para la gestión del guion se muestra en la Figura 79. La descripción de sus componentes y funcionalidades se detallan en la Tabla 54.

### D) Ejecución del Guion

La pestaña para la ejecución y monitoreo del guion se muestra en la Figura 80. La descripción de sus componentes y funcionalidades se detallan en la Tabla 55.

### E) Ejecución del Escenario

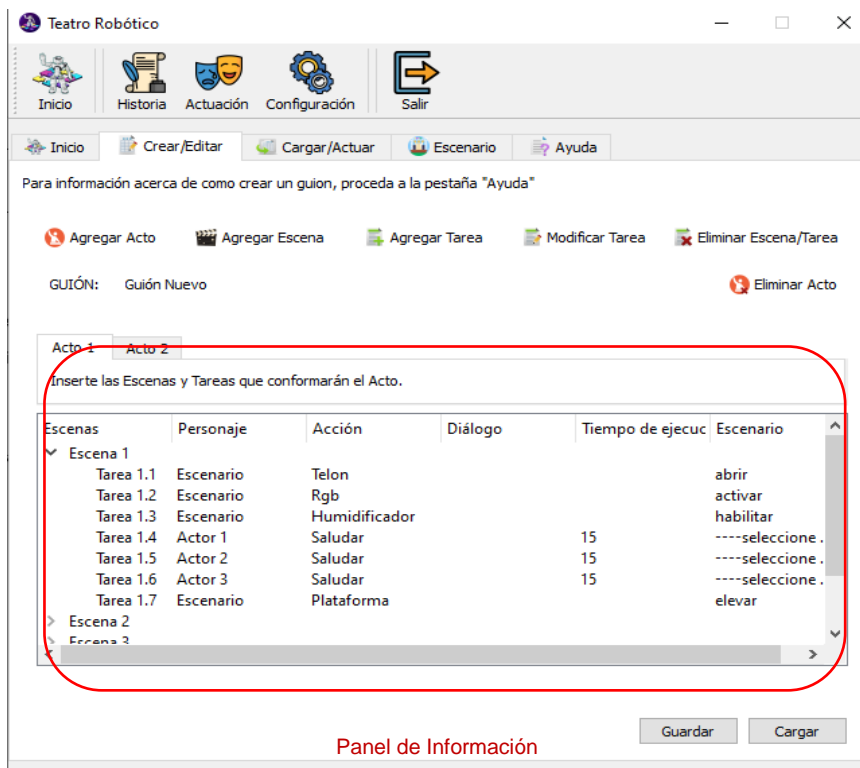
La pestaña para el control manual de las acciones del escenario se muestra en la Figura 81. La descripción de cada uno de sus componentes se detalla en la Tabla 56.

### F) Gestión de Tareas

La ventana para la gestión de tareas se visualiza en la Figura 82. La descripción de sus componentes y funciones se muestran en la Tabla 57 (Prócel, 2020).

## Figura 79




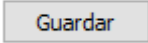
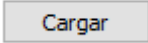
### Interfaz de la pestaña de Gestión del Guion



**Tabla 54**

### Descripción de la pestaña de Gestión del Guion

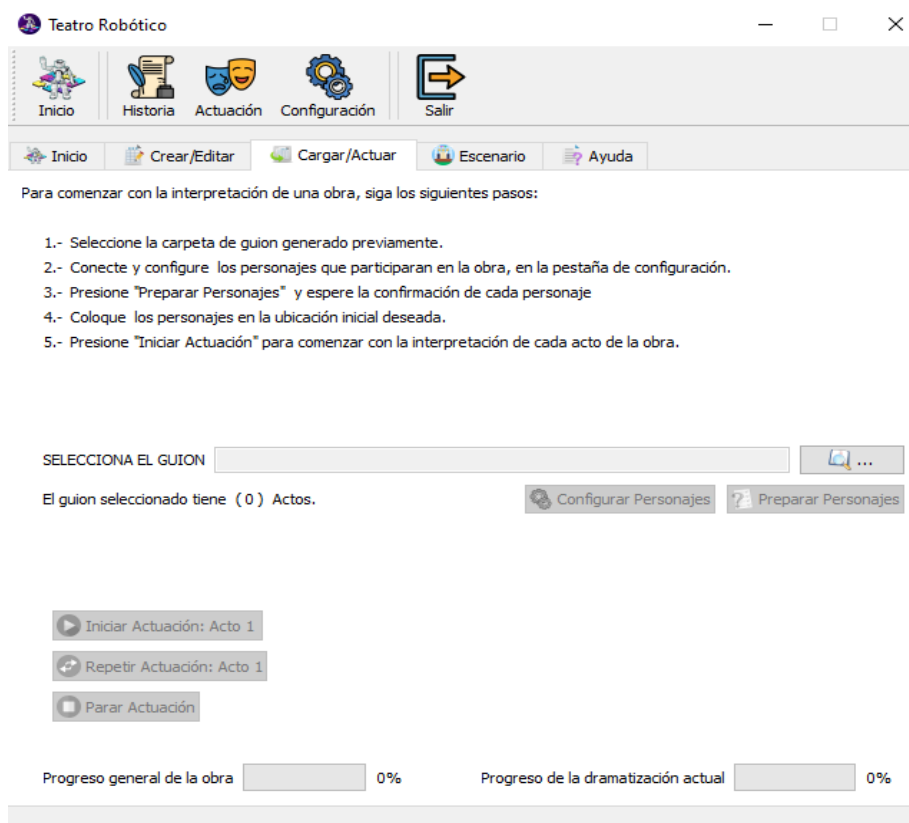
Componentes	Función
Panel de Información	Permite al usuario visualizar los actos, escenas y tareas que integran el guion teatral.
Agregar Acto	Permite al usuario agregar un acto al panel
Agregar Escena	Permite al usuario agregar una escena dentro de un acto
Agregar Tarea	Permite al usuario agregar una nueva tarea dentro de una escena creada previamente. Al pulsar este botón se abrirá la ventana de "Gestión de Tareas".

Componentes	Función
 Modificar Tarea	Permite al usuario modificar la información ingresada por medio de gestor de tareas
 Eliminar Escena/Tarea  Eliminar Acto	Permite al usuario eliminar un acto, escena o tarea
 	Permite al usuario guardar el guion realizado, como también cargar uno ya realizado.

Nota. Obtenido de (Procel, 2020).


## Figura 80






### Interfaz de la pestaña de Ejecución del Guion “Cargar/Actuar”



## Tabla 55

### Descripción de la pestaña de Ejecución del guion

Componentes	Función
	Permite al usuario seleccionar el guion que se haya desarrollado y el cual será ejecutado.

Componentes	Función
 Editar configuración	Permite al usuario ingresar a la ventana de configuración de recursos para asignar la información correspondiente a cada personaje.
 Preparar Personajes	Permite al usuario dar inicio a la conexión y ejecución de cada uno de los participantes, con la finalidad de comprobar la comunicación de los mismos.
 Iniciar Actuación: Acto 1  Repetir Actuación: Acto 1  Parar Actuación	Estas opciones permiten al usuario realizar la ejecución de la obra. La obra se realizará acto tras acto, también existe la posibilidad de repetir o detener el acto como de prefiera el usuario.
Progreso general de la obra <input type="text" value="0%"/> 0%	Permite al usuario visualizar el estado general de la obra
Progreso de la dramatización actual <input type="text" value="0%"/> 0%	Permite al usuario visualizar el estado del acto actual.

Nota. Obtenido de (Procel, 2020).

**Figura 81**

*Interfaz de la pestaña de Ejecución del Escenario*

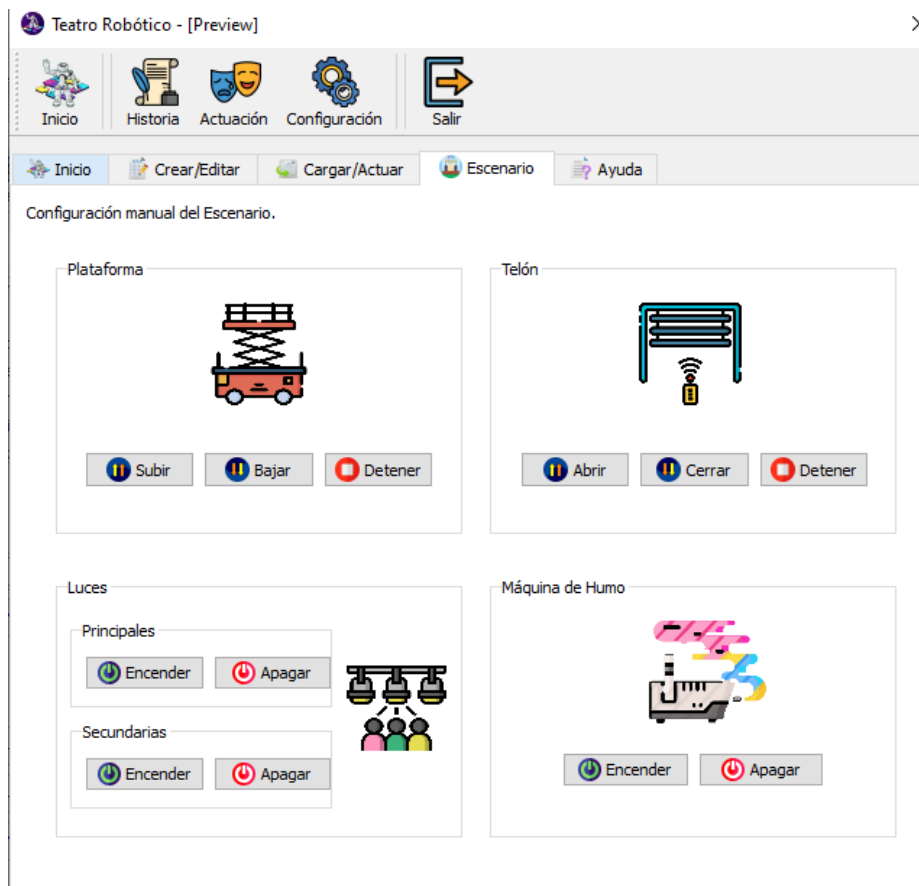


Tabla 56

Descripción de la pestaña de Ejecución del Escenario













Componentes	Función
 Subir  Bajar  Detener	Permite al usuario enviar la instrucción a la plataforma del escenario de "Subir", "Bajar" y "Detener".
 Abrir  Cerrar  Detener	Permite al usuario enviar la instrucción al telón del escenario de "Abrir", "Cerrar" y "Detener".
 Encender  Apagar	Permite al usuario enviar la instrucción a las luces principales de "Encender" y "Apagar".
 Encender  Apagar	Permite al usuario enviar la instrucción a las luces secundarias de "Encender" y "Apagar".
 Encender  Apagar	Permite al usuario enviar la instrucción a la Máquina de humo de "Encender" y "Apagar".

Figura 82


Interfaz de la pestaña de Gestión de Tareas

Gestión de Tareas


Complete la siguiente información y seleccione "Guardar Acto"


**Seleccione el personaje:**


**Seleccione una acción:**







**Seleccione una acción:**

**Diálogo**


**Establezca el tiempo de duración de la acción:**  
 (s)

**Tabla 57**

*Descripción de la ventana de Gestión de Tareas*

Componentes	Función
 <p>Seleccione el personaje:</p> <p>----Seleccione el personaje---- ▾</p>	<p>Permite al usuario seleccionar el personaje encargado de realizar una tarea en específica. Las opciones que se presentan son: Actor 1, Actor 2, Actor 3, Narrador, Escenario.</p>
 <p>Seleccione una acción:</p> <p>----Seleccione una acción---- ▾</p>	<p>Permite al usuario seleccionar la acción que puede realizar el personaje seleccionado en el campo anterior.</p>
 <p>Seleccione una acción:</p> <p>----Seleccione una acción---- ▾</p>	<p>Permite al usuario seleccionar la acción que puede realizar el escenario, si se ha seleccionado escenario en el apartado del personaje.</p>
<p>Diálogo</p>  <div style="border: 1px solid gray; height: 40px; width: 230px;"></div>	<p>Permite al usuario realizar el ingreso de un texto, si se especifica el personaje "Narrador" o si se especifica un actor junto con la acción de "Hablar".</p>
 <p>Establezca el tiempo de duración de la acción:</p> <input style="width: 80px;" type="text"/> (s)	<p>Permite al usuario asignar el tiempo que desea que dure el gesto o una rutina, esto aplica únicamente para las acciones de los actores a excepción de la acción "Hablar".</p>

*Nota.* Obtenido de (Procel, 2020).

### G) Configuración de Recursos de Personaje

La ventana para la configuración de recursos de los personajes pertenecientes al guion teatral elaborado se visualiza en la Figura 83. En esta ventana se deben configurar las direcciones IP de los Robots y otras configuraciones como el tipo de voz entre: masculina, femenina, de niño o de adulto; de igual forma se puede escoger el tono entre niveles agudos y graves y el volumen de los altavoces de los robots. Una vez que se establezcan las configuraciones deseadas y se pulse “Guardar” el programa automáticamente generará una ventana de resumen con todos los dispositivos enlazados.

La descripción de sus componentes y funciones se muestran en la Tabla 57.

Figura 83

Interfaz. Ventana para la configuración de Recursos de Personajes

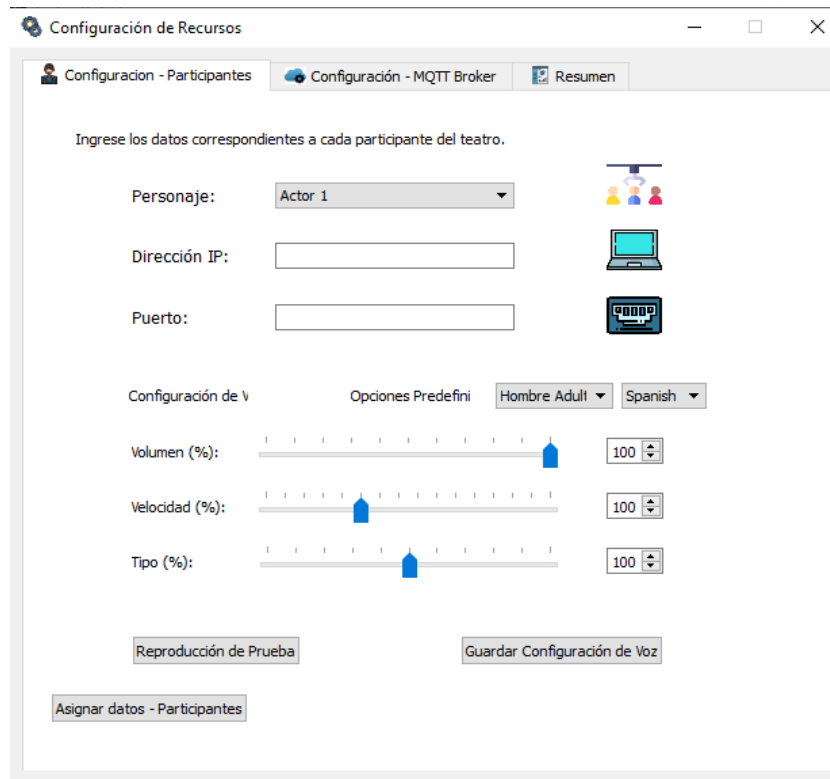





Tabla 58

Descripción de la ventana de Configuración de Recursos

Componentes		Función
Personaje:	<input type="text" value="Actor 1"/>	Permite al usuario seleccionar el personaje para configurar sus recursos.
Dirección IP:	<input type="text"/>	Permite al usuario ingresar la dirección IP del personaje seleccionado
Puerto:	<input type="text"/>	Permite al usuario ingresar el puerto del personaje seleccionado
Opciones Predefinidas	<input type="text" value="Adolescente"/>	Permite al usuario cargar opciones predefinidas del programa para una configuración de voz para los actores
	<input type="text" value="Spanish"/>	Permite al usuario seleccionar el idioma de voz entre "Spanish" y "English" que va ejecutar todos los actores al momento de realizar el guion.

Componentes	Función
Volumen (%): 	80 <input type="text"/>
Velocidad (%): 	95 <input type="text"/>
Tipo (%): 	90 <input type="text"/>
<input type="button" value="Reproducción de Prueba"/>	Permite al usuario reproducir la configuración de voz personalizada para uno de los personajes seleccionados.
<input type="button" value="Guardar Configuración de Voz"/>	Permite al usuario guardar la configuración de voz actual
<input type="button" value="Asignar datos - Participantes"/>	Permite al usuario asignar toda la configuración e información ingresada de cada uno de los personajes. El proceso de configuración y asignación de recursos se lo debe hacer por cada personaje independientemente.
<input type="button" value="Configuración - MQTT Broker"/>	Permite al usuario cambiar la dirección y puerto del servidor MQTT con el que se esté trabajando en caso que se lo requiera.
<input type="button" value="Resumen"/>	Permite al usuario visualizar una tabla de resumen, donde se detalla todas las configuraciones ingresadas.
<input type="button" value="Guardar configuración"/>	Permite al usuario guardar toda la configuración mostrada en la pestaña de "Resumen"
<input type="button" value="Cancelar"/>	Permite al usuario cancelar la asignación de recursos, regresando a la ventana de principal del Software.

*Nota.* Obtenido de (Procel, 2020).

#### Conclusión del Capítulo 4

Se implementó el protocolo MQTT para la comunicación entre los 3 robots NAO que cumplen el papel de actores, el narrador y el escenario con el software principal desarrollado, para que este tenga la capacidad de ejecutar un guion y realizar el monitoreo del mismo. La estructura del protocolo MQTT implementada se desarrolló con 7 clientes y el servidor denominado Mosquitto.

Se desarrollaron 8 gestos y 3 rutinas que serán utilizadas para el aprendizaje y para terapias, que pueden ser seleccionadas y ejecutadas por los robots actores, además se implementó dos funciones propias de los robots NAO, como son la de "Caminar", y la de "Hablar" para complementar su interacción con el guion teatral. Para



el desarrollo del narrador se implementó la librería Pyttsx de Python que permite convertir el texto ingresado a voz, en conjunto con las voces por defecto del sistema de Windows del ordenador.

Para el desarrollo de la gestión del escenario se utilizó dos módulos ESP8266, en conjunto con el protocolo MQTT, formando de esta manera dos clientes independientes, los cuales nos permite enviar datos de forma paralelamente a cada dispositivo conectado al escenario desde el software del teatro robótico.

La interfaz desarrollada permite al usuario realizar principalmente tres tareas; la “Gestión del Guion”, en donde puede crear y editar un guion, la “Ejecución del Guion”, en donde le permite al usuario realizar la ejecución de todas las tareas asignadas a cada personaje, y finalmente “Ejecución del Escenario Manual”, en donde le permite al usuario tener el control completo de cada uno de los dispositivos del escenario robótico.

## Capítulo 5

### Validación y Análisis de Resultados

En este capítulo se realiza un análisis estadístico de los datos obtenidos por medio de encuestas a varios grupos poblacionales con el fin de verificar y validar al teatro robótico como un instrumento tecnológico de apoyo en la educación y como una herramienta de asistencia para la terapia de niños con TEA.

#### Evaluación de la Herramienta Tecnológica

Para valorar la utilidad de este proyecto se realiza un estudio que permita conocer cuantitativamente el impacto generado.

#### *Estudio y recolección de Datos*

Para obtener la información necesaria en la validación del teatro robótico se realizaron encuestas a tres grupos poblacionales.

- *Grupo 1:* Ingenieros pertenecientes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE con experiencia en tecnologías de asistencia social (5 personas)
- *Grupo 2:* Ingenieros pertenecientes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sin experiencia en tecnologías de asistencia social (3 personas)
- *Grupo 3:* Neuropsicólogos especializados en Trastornos del Desarrollo infantil. (2 personas)

El objetivo de encuestar a varios grupos con diferente especialidad y experiencia es obtener información desde diferentes perspectivas para la validación de la herramienta tecnológica. De este modo se tiene una apreciación desde un enfoque técnico y terapéutico mejorando el nivel de estudio.

Se evaluarán aspectos del teatro robótico como la funcionalidad, flexibilidad, facilidad de uso de la HMI, fluidez de las obras, calidad de los efectos audiovisuales y la capacidad para ser utilizado como una herramienta de enseñanza y terapia en niños. En la siguiente tabla se enlistan las preguntas realizadas.

**Tabla 59**

*Listado de preguntas de la encuesta*

N °	Pregunta
1	¿Considera Ud. que el sistema escenográfico es llamativo y despierta el interés?
2	¿Considera Ud. que el uso de un teatro interactivo para la creación de obras con robots humanoides como actores es innovador?
3	¿En qué medida considera Ud. que el teatro robótico es funcional y será una herramienta de apoyo en el aprendizaje de niños?
4	¿En qué medida considera Ud. que el teatro robótico es funcional y asistirá en sesiones terapéuticas y tratamiento de niños con TEA?
5	La interfaz del sistema, que permite el control, creación e interpretación de la obra, es clara y flexible.
6	Considera Ud. que el tiempo de respuesta del sistema permite la interpretación de la obra con una fluidez adecuada.
7	¿Considera Ud. que la clasificación por actos, escenas y tareas permite un manejo adecuado de la historia?
8	¿Considera Ud. que el uso del protocolo MQTT contribuye a un mejor desempeño del teatro?
9	¿Considera Ud. que la creación o edición del guion es fácil de realizar?
10	Considera Ud. que la creación o edición del guion es intuitivo
11	¿La configuración de los participantes (personajes) del teatro es fácil de realizar?
12	La configuración de los participantes permite personalizar cada personaje satisfactoriamente
13	La interpretación del guion se realiza de manera fluida
14	El sistema permite un monitoreo satisfactorio de la ejecución e interpretación de la obra
15	El sistema permite un control adecuado sobre la interpretación del guion
16	La interpretación del guion se realiza según lo esperado
17	¿Considera usted que la estructura del teatro y los mecanismos cumplen correctamente su funcionamiento?
18	¿Considera Ud. que los sistemas eléctricos y electrónicos cumplen su función?
19	¿Considera Ud. que los efectos audiovisuales de la escenografía complementan la actuación de los robots?
20	Considera usted que las obras teatrales pueden tener un gran impacto y entretener a poblaciones diferentes

*Nota.* Fuente propia, preguntas elaboradas con el grupo de trabajo.

Cada pregunta deberá ser respondida con una ponderación del 1 al 5, en base a la escala “Likert” que se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 60**

*Escala de ponderación Likert*

<b>Escala Likert</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Muy en desacuerdo	1
Algo en desacuerdo	2
Ni de acuerdo ni desacuerdo	3
Algo de acuerdo	4
Muy de acuerdo	5

### **Resultados**

Se hicieron demostraciones presenciales y online a los 3 grupos seleccionados para que posteriormente puedan evaluar el proyecto. Se realizaron obras de prueba para exponer el funcionamiento y el método de creación de guiones por medio de la HMI. Se mostraron las habilidades programadas en los robots, los dispositivos que forman parte de la escenografía, los mecanismos construidos y los elementos de control.

**Figura 84**

*Exposiciones del teatro robótico*



También se realizó una breve explicación de la metodología de diseño y construcción del escenario para que los evaluadores conozcan a detalle las capacidades de este proyecto de asistencia social.

Con las presentaciones llevadas a cabo los asistentes realizaron una encuesta, previo a esto firmaron un documento del “Comité de ética” en el que autorizan que el uso de sus datos sea con fines investigativos. De las encuestas se obtuvo la siguiente información.

**Tabla 61**

*Resultados de ingenieros con experiencia en tecnologías de asistencia*

<b>Resultados del Grupo 1 (5 Personas)</b>					
	Muy en desacuerdo	Algo en desacuerdo	Ni de acuerdo ni desacuerdo	Algo de acuerdo	Muy de acuerdo
Pregunta N.º	1	2	3	4	5
1	-	-	-	-	5
2	-	-	-	-	5
3	-	-	-	-	5
4	-	-	-	1	4
5	-	-	-	-	5
6	-	-	-	1	4
7	-	-	-	2	3
8	-	-	-	-	5
9	-	-	-	1	4
10	-	-	-	1	4
11	-	-	-	1	4
12	-	-	-	2	3
13	-	-	-	1	4
14	-	-	-	1	4
15	-	-	-	1	4
16	-	-	-	1	4
17	-	-	-	1	4
18	-	-	-	-	5
19	-	-	-	1	4
20	-	-	-	-	5

**Tabla 62***Resultados de ingenieros sin experiencia en tecnologías de asistencia*

<b>Resultados del Grupo 2 (3 Personas)</b>					
	Muy en desacuerdo	Algo en desacuerdo	Ni de acuerdo ni desacuerdo	Algo de acuerdo	Muy de acuerdo
Pregunta N <sup>o</sup>	1	2	3	4	5
1	-	-	-	1	2
2	-	-	-	1	2
3	-	-	1	1	1
4	-	-	1	2	-
5	-	-	-	1	2
6	-	-	1	-	2
7	-	-	-	1	2
8	-	-	-	-	3
9	-	-	-	1	2
10	-	-	1	-	2
11	-	-	-	1	2
12	-	-	-	-	3
13	-	-	-	1	2
14	-	-	-	1	2
15	-	-	-	-	3
16	-	-	-	1	2
17	-	-	1	1	1
18	-	-	-	1	2
19	-	-	-	1	2
20	-	-	-	1	2

**Tabla 63***Resultados obtenidos de Neuropsicólogos infantiles*

<b>Resultados del Grupo 3 (2 Personas)</b>					
	Muy en desacuerdo	Algo en desacuerdo	Ni de acuerdo ni desacuerdo	Algo de acuerdo	Muy de acuerdo
Pregunta N <sup>o</sup>	1	2	3	4	5
1	-	-	-	-	2
2	-	-	-	-	2
3	-	-	-	-	2
4	-	-	-	-	2

<b>Resultados del Grupo 3 (2 Personas)</b>					
	Muy en desacuerdo	Algo en desacuerdo	Ni de acuerdo ni desacuerdo	Algo de acuerdo	Muy de acuerdo
Pregunta N o	1	2	3	4	5
5	-	-	-	-	2
6	-	-	-	1	1
7	-	-	1	1	-
8	-	-	2	-	-
9	-	-	-	2	-
10	-	-	-	1	1
11	-	-	-	1	1
12	-	-	-	-	2
13	-	-	-	1	1
14	-	-	-	2	-
15	-	-	-	-	2
16	-	-	-	-	2
17	-	-	-	-	2
18	-	-	-	-	2
19	-	-	-	-	2
20	-	-	-	-	2

Con los datos obtenidos se realizará un análisis estadístico para determinar patrones y tendencias con los grupos encuestados. La media es el promedio del puntaje sobre 5 puntos y la moda es la calificación que aparece con más frecuencia. El Coeficiente de variación, desviación estándar y variación de datos permitirán conocer la dispersión de datos y la validez del estudio.

#### **Tabla 64**

##### *Estadística descriptiva del Grupo 1*

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	CoefVar %	Moda
Preg 1	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 2	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 3	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 4	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 5	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 6	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 7	4,6	0,548	0,300	11,91	5

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>Varianza</b>	<b>CoefVar %</b>	<b>Moda</b>
Preg 8	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 9	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 10	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 11	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 12	4,6	0,548	0,300	11,91	5
Preg 13	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 14	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 15	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 16	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 17	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 18	5,0	0,0	0,0	0,00	5
Preg 19	4,8	0,447	0,200	9,32	5
Preg 20	5,0	0,0	0,0	0,0	5

*Nota.* Valores Obtenidos del Análisis en MiniTab.

**Tabla 65**

*Estadística descriptiva del Grupo 2*

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>Varianza</b>	<b>CoefVar %</b>	<b>Moda</b>
Preg 1	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 2	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 3	4,0	1,0	1,0	25,0	4
Preg 4	3,667	0,577	0,33	15,75	4
Preg 5	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 6	4,333	1,155	1,33	24,65	5
Preg 7	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 8	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 9	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 10	4,333	1,155	1,33	24,65	5
Preg 11	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 12	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 13	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 14	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 15	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 16	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 17	4,0	1,0	1,0	25,0	4
Preg 18	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 19	4,667	0,577	0,33	12,37	5
Preg 20	4,667	0,577	0,33	12,37	5

*Nota.* Valores Obtenidos del Análisis en MiniTab.



**Tabla 66***Estadística descriptiva Grupo 3*

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>Varianza</b>	<b>CoefVar %</b>	<b>Moda</b>
Preg 1	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 2	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 3	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 4	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 5	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 6	4,5	0,707	0,50	15,71	5
Preg 7	3,5	0,707	0,50	20,20	4
Preg 8	3,0	0,0	0,0	0,0	3
Preg 9	4,0	0,0	0,0	0,0	4
Preg 10	4,5	0,707	0,50	15,71	5
Preg 11	4,5	0,707	0,50	15,71	5
Preg 12	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 13	4,5	0,707	0,5	15,71	5
Preg 14	4,0	0,0	0,0	0,0	4
Preg 15	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 16	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 17	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 18	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 19	5,0	0,0	0,0	0,0	5
Preg 20	5,0	0,0	0,0	0,0	5

*Nota.* Valores Obtenidos del Análisis en MiniTab.

Según el análisis de estadística realizado se puede observar que el coeficiente de variación es menor 25% en todas las preguntas realizadas encuestas a los tres distintos grupos. En conclusión, la percepción de los profesionales encuestados es similar por lo que se comprueba la funcionalidad del proyecto de tecnología de asistencia.

De manera general el teatro robótico interactivo tuvo gran aceptación y fue evaluado con un puntaje alto, en la mayoría de preguntas se tiene una moda de 5 puntos (Muy de acuerdo), demostrando ser la calificación más seleccionada.

Es importante destacar que para la mayoría de los encuestados la herramienta resulta ser muy llamativa e innovadora, al tratarse de los primeros teatros robóticos interactivos destinados a la asistencia infantil este proyecto alcanzará un gran impacto a nivel nacional e internacional. Según la experiencia profesional de ingenieros y neuropsicólogos la herramienta basada en robótica colaborativa será útil para realizar tareas de asistencia en niños como la educación y terapias de TEA.

### **Conclusión del capítulo 5**

Para validar la funcionalidad y eficiencia del teatro robótico interactivo como una herramienta tecnológica de apoyo en la enseñanza y terapia a niños se realizaron encuestas a 3 grupos de profesionales con diferente especialidad y perspectiva de las tecnologías de asistencia.

Desde el punto de vista ingenieril se encuestaron a dos grupos de personas, el uno con experiencia en tecnologías de asistencia y robótica colaborativa y el otro sin experiencia en este campo. Desde otra perspectiva se evaluaron a neuropsicólogos infantiles para validar la herramienta. Se evaluaron a un total de 10 profesionales. Los resultados obtenidos del análisis de estadística descriptiva son favorables para los objetivos del proyecto. La herramienta muestra tener una gran utilidad en el desarrollo de habilidades y capacidades en niños.

## Capítulo 6

### Conclusiones, Recomendaciones Y Trabajo a futuro

En el último capítulo de este trabajo de titulación se describen las conclusiones a las que se llegaron, las recomendaciones para la realización de este trabajo y posibles mejoras que aumenten la funcionalidad y el alcance de este proyecto de robótica colaborativa a futuro.

#### Conclusiones

Este proyecto se desarrolla a partir del avance constante de la robótica colaborativa para satisfacer necesidades del ser humano. El teatro robótico es planteado como una herramienta de asistencia social innovadora, con el objetivo de mejorar las actividades educativas en niños y aumentar el efecto de las terapias de pacientes con TEA. La mejor manera de aprender para un niño es jugando, por ello se diseñó este proyecto para ser llamativo y entretener a los usuarios.

En el estado del arte se ha demostrado que la tecnología de asistencia es eficiente y crece a pasos agigantados. Cada vez existen sistemas más personalizados a las necesidades de cada persona y este proyecto es una herramienta multidisciplinaria que se adapta a distintas clases de público.

El Teatro Robótico supone enriquecer la experiencia del aprendizaje en niños, fomentando su creatividad y su capacidad analítica. A través de las obras y guiones generados los estudiantes pueden participar e interactuar aumentando su interés personal por aprender. En el tratamiento de niños con TEA el uso de robots permite mejorar las habilidades de comunicación y atención conjunta, ayudando a reestablecer conductas, a menorar el nivel de gravedad de autismo y a establecer comportamientos de empatía y sociabilización.

Se usó la metodología de “Diseño y Desarrollo de productos” de los autores Ulrich y Eppinger, para la construcción de la escenografía y los mecanismos automatizados. El escenario tiene una superficie de actuación de 3 m<sup>2</sup>, cumple con los requerimientos de fácil traslado y movilidad, bajo peso y apariencia atractiva. Su estructura es estable y robusta, por lo que sirve de bancada para el resto de elementos del teatro. La escenografía posee 6 paredes con armazones de roble y recubrimientos de mdf o trípex dependiendo las necesidades de resistencia. El conjunto ensamblado tiene dimensiones de 2.20m x 2.15m x 1.40m (ancho, altura, profundidad) y una masa total aproximada de 80 kg.

En base al análisis cinemático y análisis de fuerzas se diseñó el elevador, un mecanismo de tijeras capaz de desplazar la superficie de actuación en dirección vertical para no dejar a la vista las operaciones de “backstage” de las obras. En el dimensionamiento del elevador se utilizó la teoría de diseño mecánico y resistencia de materiales, es de acero estructural ASTM A36 y es lo suficientemente rígido para dar equilibrio a los robots incluso mientras caminan. Se utilizó la teoría de falla de Von Mises para su diseño.

Se construyó un telón tipo guillotina en base al mecanismo convencional de las persianas al que se le realizaron adaptaciones para automatizar el movimiento. El telón es uno de los elementos del teatro que se utiliza para iniciar y finalizar los guiones de actuación. El elevador y el telón fueron diseñados para trabajar con amplios márgenes de seguridad. Todos los mecanismos se simuló en SolidWorks para comprobar su funcionamiento y resistencia.

Se instaló un sistema audiovisual y de efectos especiales para mejorar la experiencia de interacción con los robots. El escenario tiene un audio de 35 Watts de potencia y un proyector de imagen de 2800 lúmenes con alta resolución para

complementar la escenografía de la obra teatral, dándole contexto y acompañamiento al contenido. El conjunto de efectos especiales está conformado por un sistema principal de luz led blanca, uno secundario con leds RGB y una cámara de humo de 600 Watts.

El dimensionamiento eléctrico se realizó en base a la carga que generan los actuadores y los dispositivos conectados que consumen energía. Los sensores escogidos para automatizar el movimiento de los mecanismos son fines de carrera y módulos Reed Switch, de funcionamiento sencillo, precisos y de tiempos de respuesta rápidos. Se utiliza una fuente de 12 VDC a 20 A para el circuito de potencia y una fuente de 5 VDC a 2 A para el circuito de control. Los circuitos se simularon en proteus previo a su conexión de prueba en protoboard y posteriormente en la placa PCB.

Se diseñó una HMI amigable para el usuario, con la que cualquier persona sin conocimientos de ingeniería puede crear una obra teatral. Esta HMI controla el funcionamiento de todos los dispositivos que forman parte del proyecto, incluyendo los robots actores Nao, robots narradores virtuales, mecanismos automatizados y los efectos especiales. El diseño de esta HMI se fundamenta en la guía GEDIS para la creación de interfaces comprensibles y ergonómicas.

La comunicación entre los dispositivos del teatro robótico y la HMI es inalámbrica y se realiza por medio del protocolo MQTT. Es un modelo de mensajería publicador/suscriptor en el que por medio de un servidor centralizado se gestiona la transmisión de datos. Se utilizaron dos módulos ESP8266 para el funcionamiento general del sistema. El MQTT permite la transmisión de datos en paralelo, lo cual brinda gran fluidez a las obras teatrales y permite que se ejecute más de una instrucción a la vez. La programación de los robots se realizó en Python y se enlaza con la HMI para enviar y recibir información.

Los robots son capaces de hablar en inglés y español, aumentando el alcance de este proyecto. La HMI permite seleccionar el tipo de voz de los robots entre: hombre adulto, mujer adulta, niño, niña o joven. Esta función aumenta la cantidad de personajes que puede tener una obra teatral, ya que cada uno puede ser identificado por su voz.

Para validar la funcionalidad de la herramienta se realizó un análisis estadístico a partir de la información obtenida por encuestas a personas con distinta especialidad. Un total de 10 personas distribuidas en tres grupos fueron la muestra para obtener los datos. El primer grupo está conformado por 5 ingenieros con experiencia en tecnologías de asistencia, al segundo grupo pertenecen 3 ingenieros sin experiencia en tecnologías de asistencia y el tercer grupo está conformado por 2 neuropsicólogas infantiles. Según el análisis de estadística descriptiva el teatro robótico tubo excelentes resultados de sus evaluadores, demostrando ser funcional, flexible y lograría tener un gran impacto en demostraciones con niños

### **Recomendaciones**

En el diseño de elementos mecánicos se debe tomar en cuenta un gran número de parámetros físicos, que a la hora de ser calculados teóricamente aumentan la dificultad del diseño y por lo general no son incluidos, el uso de un software de diseño asistido por computador previo a la construcción permite conocer la resistencia del material de los elementos y la funcionalidad de los mecanismos.

Para evitar el sonido durante el movimiento del elevador se podría reemplazar el eje con rosca métrica actual por un tornillo de potencia con rosca cuadrada, el cual genera mayor desplazamiento y con menor rozamiento entre superficies de las roscas. Actualmente se reduce el sonido lubricando al tornillo de potencia y la tuerca que se desliza sobre sus hélices.

Según la evaluación realizada por los tres grupos seleccionados para la validación de la herramienta, la HMI no es lo suficientemente intuitiva para todos los posibles usuarios del teatro robótico por lo que es conveniente realizar varias explicaciones previas del funcionamiento.

### **Trabajo a Futuro**

El protocolo MQTT es escalable, permitiendo añadir más dispositivos al sistema del teatro robótico sin modificar su estado actual, por lo que añadiendo módulos ESP8266 se podría tener una gran cantidad de elementos conectados y funcionando en paralelo.

Por medio de un sensor Kinect se podría implementar un programa que genere las rutinas y movimientos de los robots con mayor facilidad, aumentando la biblioteca de gestos y movimientos actuales. El uso de este sensor aceleraría la integración de rutinas ya que la actual se basa en la asignación manual de ángulos en los actuadores. Esto permitiría al usuario personalizar la interpretación de las obras.

Otro método para aumentar la biblioteca de gestos es añadir las funciones del software nativo de los robots Nao (Coreograph) a la HMI, de este modo se tendría una gran cantidad de opciones disponibles para mejorar la actuación.

### Referencias Bibliográficas

- Ali, S., Mehmood, F., Dancey, D., Ayaz, Y., Khan, M. J., Naseer, N., & Nawaz, R. (19 de junio de 2019). "An Adaptive Multi-Robot Therapy for Improving Joint Attention and Imitation of ASD Children". *IEEE Access*. vol. 7, pp. 81808-81825, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923678.
- AliveRobotics. (s.f.). Yo soy NAO. Obtenido el 26 de abr. de 21 del sitio web: <https://aliverobots.com/nao>
- Bischoff, R., & Graefe, V. (2004). HERMES - a versatile personal robotic assistant. *IEEE* vol. 92, no. 11, pp. 1759-1779, Nov. 2004. DOI: 10.1109/JPROC.2004.835381.
- Boston Dynamics (2021). ATLAS. Obtenido el 3 de mayo de 2021 del sitio web: <https://www.bostondynamics.com/atlas>
- Causo, A., Vo, G. T., Chen, I.-M., & Yeo, S. H. (2016). Design of Robots Used as Education Companion and Tutor. En S. Zeghloul, M. A. Laribi, & J.-P. Gazeau (Eds.), *Robotics and Mechatronics: Proceedings of the 4th IFToMM International Symposium on Robotics and Mechatronics* (pp. 75–84). Cham: Springer International Publishing. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22368-1\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22368-1_8)
- Celis, K., Cervantes, N., & Escobar, P. (2020). COBOT: teatro robótico educativo orientado a las emociones y el realismo. Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Facultad de Ingeniería. Tesis de Grado. Sitio web: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/52588>
- Cembranos, F. (2008). *Automatismos Eléctricos, Neumáticos e Hidráulicos*. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 5ta edición, pp 33 – 46.



- Cruz, E. (2019). Importancia del manejo de competencias tecnológicas en las prácticas docentes de la Universidad Nacional Experimental de la Seguridad (UNES). *Revista Educación (Universidad de Costa Rica)*, vol. 43, núm. 1, pp. 15-18, 2019  
DOI: <https://doi.org/10.15517/revedu.v43i1.27120>
- DISMETAL. (s.f.). Dismetal. Obtenido de Metales para la industria y construcción:  
<https://dismetal.ec/productos/planchas/aluminio-liso>
- Dickstein-Fischer, L., & Fischer, G. S. (Agosto de 2014). Combining Psychological and Engineering Approaches to Utilizing Social Robots with Children with Autism. 36<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 792-795. Doi: 10.1109/EMBC.2014.6943710.
- EDIMCA. (s.f.). Tableros Edimca. Obtenido de Catálogo de productos:  
<https://edimca.com.ec/wp-content/uploads/2019/10/Catalogo-Tableros-SMALL.pdf>
- Feng, Y., Jia, Q., & Chu, M., (2017). "Engagement Evaluation for Autism Intervention by Robots Based on Dynamic Bayesian Network and Expert Elicitation,". *IEEE Access*. vol. 5, pp. 19494-19504, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2754291.
- Fridin, M., & Belokopytov, M. (2018). Acceptance of socially assistive humanoid robot by preschool and elementary school teachers. *Computers in Human Behavior*, Elsevier. Volume 33, April 2014, pages 23-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2013.12.016>
- Galán P, (2016). *La Robótica en educación Infantil: Realidades y Limitaciones*. Universidad Complutense Madrid (Trabajo Fin de Grado). Cap. 3, pp. 19-25.

- García, F., Portillo, J., Romo, J., & Benito, M. (2007) "Nativos Digitales y modelos de aprendizaje" Universidad del País Vasco, disponible en: <http://www.oei.es/noticias/spip.php?article4105>
- Gómez, R. (2002). Análisis de los Métodos Didácticos en la Enseñanza. Universidad de Málaga (UNED ESPAÑA). Vol. 32, pp. 262-269. Obtenido de: Dialnet- AnalisisDeLosMetodosDidacticosEnLaEnsenanza-638360.pdf
- Guía Práctica para el Diseño de Estructuras de Madera de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015. ISBN.9942-951-48 Primera edición, Quito, septiembre 2016.
- Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2008). "MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks". 2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08). Bangalore, India: pp. 791-798. DOI: 10.1109/COMSWA.2008.4554519.
- Johnson, R. Cuijpers, J., Juola, E., Torta, M., Simonov, A., Frisiello, M., Bazzani, W., Yan, C. Weber, S., Wermter, N., & Meins, J. (2014) Socially assistive robots: A comprehensive approach to extending independent living. *International Journal of Social Robotics*, 6(2):195-211, 2014.
- Levis, D. (2008). *Tecnologías Educativas*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Orientación a Procesos Educativos (2).
- López, I., Martín, A., & Gómez, L. (2010). Niños Nativos Digitales en la Sociedad del Conocimiento: Acercamientos Conceptuales a sus Competencias. *Razón y Palabra* [en línea]. 2010, (72). ISSN: 1605-4806. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=199514906028>.

- Lopez-Caudana, E., Ponce, P., Cervera, L. et al. Robotic platform for teaching maths in junior high school. *Int J Interact des Manuf* 12, 1349–1360 (2018).  
<https://doi.org/10.1007/s12008-017-0405-0>
- Marcelo, C. (2013). Las tecnologías para la innovación y la práctica docente. *Revista Brasileira de Educação. Rev. Bras. Educ.* vol.18 no.52 Rio de Janeiro, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-24782013000100003>
- Ministerio de Salud Pública. (2017). Guía de Práctica Clínica (GPC). Trastornos del Espectro Autista en niños y adolescentes: detección, diagnóstico, tratamiento, rehabilitación y seguimiento. Ecuador: Obtenido de:  
[https://www.salud.gob.ec/wpcontent/uploads/2014/05/GPC\\_Trastornos\\_del\\_espectro\\_autista\\_en\\_ninos\\_y\\_adolescentes-1.pdf](https://www.salud.gob.ec/wpcontent/uploads/2014/05/GPC_Trastornos_del_espectro_autista_en_ninos_y_adolescentes-1.pdf).
- Montalvo, M. (2017). Programación por Demostración del Robot Aldebaran Nao H25 de la Universidad Politécnica Salesiana para la Enseñanza y Preservación de Tradiciones, Leyendas y Expresiones Orales del Ecuador. Carrera de Ingeniería Electrónica. Cuenca, Ecuador.
- Monteiro, S., Spinks-Franklin, A. & Treadwell-Deering, D. (2015). Prevalence of Autism Spectrum Disorder in Children Referred for Diagnostic Autism Evaluation. *Clinical Pediatrics*. 2015;54(14):1322-1327. Doi:  
<https://doi.org/10.1177/0009922815592607>.
- Mosquitto org. (s.f.). Eclipse Mosquitto™. Eclipse Foundation: Obtenido de:  
<https://mosquitto.org/>.
- Mubin, O., Alhashmi, M., Baroud, R., & Alhajjar, F. (2019). Humanoid Robots as Teaching Assistants in an Arab School. *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction (OZCHI'19)*. Association for Computing Machinery,

New York, NY, USA, pp. 462–466. DOI:  
<https://doi.org/10.1145/3369457.3369517>

Omokawa, R., & Matsuura, S. (2018). Development of Thought Using a Humanoid Robot in an Elementary School Classroom. *Universal Access in Human-Computer Interaction. Virtual, Augmented, and Intelligent Environments*, 2018, Volume 10908. ISBN: 978-3-319-92051-1

Paredes-Ramos, P., Pérez-Pouchoulén, M., P. G.-B., Martínez-Conde, R., Rioux, M., Manzo, J., & Coria-Avila, G. (2012). El uso del perro en el tratamiento del trastorno espectro autista. *Eneurobiología. Revista electrónica*. Veracruz, Xalapa, México: ISSN 20073054. Centro de Investigaciones Cerebrales. Universidad Veracruzana.

Pateromichelakis, N. et al., "Head-eyes system and gaze analysis of the humanoid robot Romeo," 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. 1374-1379, doi: 10.1109/IROS.2014.6942736.

Peña, A. (2014). *RoboAct modelo de control autónomo y cooperativo para el Teatro Robótico*. Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Facultad de Ingeniería. Tesis de Maestría. Sitio web: <http://hdl.handle.net/10554/15082>

Pérez V., A. J., Castro-González, Á., Martín, F. A., Castillo, J. C., & Salichs, M. A. (September de 2017). Evolución de la robótica social y nuevas tendencias. Conference: *Jornadas Automática 2017*, At Gijón. Madrid, España: University Carlos III of Madrid.

Pinel C., V. (2016). *Robots sociales y Autismo. Propuesta de intervención en el contexto educativo*. Universitat de les Illes Balears.

- Prócel, A. (2020). Desarrollo e Implementación de un Teatro Robótico como parte de un sistema de enseñanza para niños con Trastorno del Espectro Autista. Trabajo de Titulación de Ingeniería Mecatrónica. Repositorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sangolquí, Ecuador.
- Retto, J. (2017). Sophia, first citizen robot of the world. Universidad Nacional Mayor de San Carlos. Lima, Perú. ResearchGate, URL: <https://www.researchgate.net>.
- Richard Budynas, G., & Keith Nisbett, J. (2012). Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley. McGRAW-HILL/ Interamericana de editores S.A., 9na edición. México D.F., México ISBN: 978-607-15-0771-6
- Rivera N., J. O. (2016). Definamos: ¿Qué es un robot? Obtenido del sitio web: (<https://proyectopuente.com.mx/2016/10/31/definamos-que-es-un-robot/>).
- Rodríguez, H. (2013). Análisis y diseño de Tornillos de Potencia. Tutorial 131. Obtenido del sitio web: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html>
- Rossiter, J. (2019). La robótica, los materiales inteligentes y su impacto futuro para la humanidad. Universidad de Bristol, Reino Unido. Obtenido del sitio web: <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/la-robotica-los-materiales-inteligentes-y-su-impacto-futuro-para-la-humanidad/>
- Ruiz, J., & Danvila, I. (2019). Las Nuevas Tecnologías como herramientas que facilitan la Educación Formativa en la Educación. Universidad Internacional de Rioja, España. Vol. (2), Cap. (7) pp. 2-5. Obtenido del sitio web: <http://www.seeci.net/cuiciid2013/PDFs/UNIDO%20MESA%202%20DOCENCIA.pdf>

- Rus, D. (2018). Robótica: una década de Transformaciones. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (CSAIL), MIT. Obtenido del sitio web: <https://www.bbvaopenmind.com/articulos/robotica-una-decada-de-transformaciones/>
- Sabelli, A., Kanda, T., & Hagita, N. "A conversational robot in an elderly care center: An ethnographic study," 2016 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 2016, pp. 37-44, doi: 10.1145/1957656.1957669.
- Sánchez, M. F., Millán, R. F., Salvador, B. J., Palou, R. J., Rodríguez, E. F., Esquena, F. S., & Villavicencio, M. H. (20 de enero de 2007). Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I). Barcelona, España: Actas Urol Esp. 2007;31(2):6976.
- Sánchez-Martín, F., Jiménez, S. P., Millán, R. F., Salvador-Bayarri, J., Monllau, F. V., Palou, R. J., & Villavicencio, M. H. (3 de marzo de 2007). Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci. (Parte II). Barcelona, España: Actas Urol Esp. 2007; 31(3):185-196.
- Santatiwongchai, S., Kaewkamnerdpong, B., Jutharee, W., & Ounjai, K. (2016). BLISS: Using Robot in Learning Intervention to Promote Social Skills for Autism Therapy. Proceedings of the international Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology. Singapore Therapeutic, Assistive & Rehabilitative Technologies. Centre, Midview City, SGP, Article 16, 1–4.
- Sarmiento, M. (2007). La Enseñanza de las Matemáticas y las NTIC. una Estrategia de Formación Permanente. Universitat Rovira I Virgili. Cap. 2, pp. 33-56. ISBN: 978-84-690-8294-2

- Saval, A. (2018). Diseño, Análisis Cinemático y Resistente de un Sistema Elevador de Vehículos para Parking en espacios reducidos. Universidad Politécnica de Valencia. Trabajo de fin de grado en Ingeniería Mecánica.
- Scassellati, B., Admoni, H., & Matarić, M. (agosto de 2014). "Robots for Use in Autism Research". Annual review of biomedical engineering. Vol. 14:275-294. Disponible en: 10.1146/annurev-bioeng-071811-150036.
- Silva, J., y Maturana, D. (2017). Una propuesta de modelo para introducir metodologías activas en educación superior. Revista Innovación Educativa. (Méx. DF) vol.17 no.73. ISSN 1665-2673.
- So, W. C., Wong, M., Lam, W., Lam, C., & Fok, D. (2017). Using a social robot to teach gestural recognition and production in children with autism spectrum disorders. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, DOI: 10.1080/17483107.2017.1344886.
- Tecnología de los plásticos (2017). Propiedades mecánicas de los plásticos, características, usos, fabricación procesos de transformación y reciclado. Obtenido del sitio web: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com>
- Totosa, F. (2018). Avanzando en el uso de las TIC con personas con Trastorno del EspectroAutista. CPEE y Centro de Recursos para Niños Autistas "Las Boqueras". España.
- Ulrich, K., & Epingler, S. (2013). Diseño y Desarrollo de Productos. McGRAW-HILL/ Interamericana de editores S.A., 5ta edición. México D.F., México ISBN: 978-607-15-944-4.

- Vilches, M. & Correal, E. (2013). Caracterización físico-mecánica de la madera de roble albar, roble cerrioide y roble andaluz de Cataluña. Sexto Congreso Forestal Español. INCAFUST Madrid – España.
- Turkle, S., Breazeal, C., Dasté, O., & Scassellati, B. (30 de septiembre de 2004). Encounters with Kismet and Cog: Children Respond to Relational Artifacts.
- Yassein, M. B., Shatnawi, M. Q., Aljwarneh, S., & Al-Hatmi, R. (2017). "Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol". 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). Monastir, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICEMIS.2017.8273112.
- Zeballos, B. (2018). Aplicación de las TIC en niños de Educación Inicial. Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, Facultad de Educación Inicial. Pp. 13-19. Res. N°0356-2018-D-FEI
- Zúñiga, A. H., Balmaña, N., & Salgado, M. (2017). Los trastornos del espectro autista (TEA). *Pediatr Integral* 2017. Barcelona, España: XXI (2): 92 – 108.



## **Anexos**

Los documentos e información extra de este proyecto se encuentran en la carpeta de anexos.