



**Diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor
en la nube como herramienta de terapia**

Cuenca Torres, Mishell Katherine y Sandoval Vallejo, Steven Paúl

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Tobar Quevedo, Johanna Belén PhD.

22 de febrero del 2023



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

TESIS_Cuenca_Sandoval

5% Similitudes
2% Texto entre comillas
 < 1% similitudes entre comillas
1% Idioma no reconocido

Nombre del documento: TESIS_Cuenca_Sandoval.pdf
 ID del documento: d0b811833ce01b73d99decc648e5bd0cb323284
 Tamaño del documento original: 4,46 Mo

Depositante: PEDRO XAVIER CHINGA MÁRMOL
 Fecha de depósito: 24/2/2023
 Tipo de carga: Interface
 fecha de fin de análisis: 24/2/2023

Número de palabras: 19.753
 Número de caracteres: 123.744

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.espe.edu.ec Diseño e implementación de un escenario mecatrónico int... https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25455/5/T-6596-044664.pdf	2%		Palabra idénticas : 2% (212 palabras)
2	dialnet.unirioja.es https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6756274.pdf	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (89 palabras)
3	repositorio.javeriana.edu.co https://repositorio.javeriana.edu.co/bitstream/mhandle/10554/28786/Daniel%20Andr%C3%A9%20Crows%20P%C3%A9rez.pdf 1 fuente similar	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (86 palabras)
4	repositorio.javeriana.edu.co https://repositorio.javeriana.edu.co/bitstream/mhandle/10554/52588/Memoria_COROT(1).pdf#sequence...	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (71 palabras)
5	www.scielo.br https://www.scielo.br/j/rla/fghicronydy680QPhyW7HG/f/Formato.pdf	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (50 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	hdl.handle.net Prolegómenos a una ética para la robótica social http://hdl.handle.net/2117/345474	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (34 palabras)
2	www.politesi.polimi.it Design and implementation of a multi-modal framework for... https://www.politesi.polimi.it/Design%20and%20implementation%20of%20a%20multi-modal%20framework%20for...	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (15 palabras)
3	bibliotecadigital.educal.com Existencias: RoboAct modelo de control autónomo y c... https://biblioteca.digitaleducal.com/Existencias%20RoboAct%20modelo%20de%20control%20aut%C3%B3nomo%20y%20c...	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (15 palabras)
4	repositorio.espe.edu.ec Investigación y diseño de un sistema mecatrónico para un ... https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14948/5/T-6596L-MEC-0149.pdf	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (16 palabras)
5	link.springer.com ROMOT: A Robotic 3D-Movie Theater Allowing Interaction and M... https://link.springer.com/chap/10.1007/978-3-319-57738-8_5	< 1%		Palabra idénticas : < 1% (10 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://teatorrobotico.social/index.html>
- <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25455>
- <https://doi.org/10.1109/MPRV.2019.2940181>
- https://repositorio.javeriana.edu.co/handle/10554/52588#Y8bc5d1Surg_mendeley
- <https://doi.org/10.3390/19040075>

Firma:



INGENIERA JOHANNA BELÉN TOBAR QUEVEDO

Ing. Tobar Quevedo, Johanna Belén Ph. D.
 C. C.: 1717171241



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera Mecatrónica.

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia**" fue realizado por los señores **Cuenca Torres, Mishell Katherine** y **Sandoval Vallejo, Steven Paul**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 27 de febrero de 2023

Firma



JOHANNA BELÉN TOBAR
QUEVEDO

Ing. Tobar Quevedo Johanna Belén Ph. D.

C.C.: 1717171241



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera Mecatrónica.

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cuenca Torres, Mishell Katherine y Sandoval Vallejo, Steven Paul**, con cédulas de ciudadanía N° 2350194896 y N° 0401747241, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Título: Diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 27 de febrero de 2023

Firma

Cuenca Torres, Mishell Katherine

C.C.: 2350194896

Firma

Sandoval Vallejo, Steven Paul

C.C.: 0401747241



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera Mecatrónica.

Autorización de Publicación

Nosotros **Cuenca Torres, Mishell Katherine** y **Sandoval Vallejo, Steven Paul**, con cédula/cédulas de ciudadanía N° 2350194896 y N° 0401747241, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular:
Título: Diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 27 de febrero de 2023

Firma

Cuenca Torres, Mishell Katherine

C.C.: 2350194896

Firma

Sandoval Vallejo, Steven Paul

C.C.: 0401747241

Dedicatoria

“Todos pueden superar sus circunstancias y alcanzar el éxito si tienen dedicación y pasión por lo que hacen”

Nelson Mandela

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente a mi papi Klever y mi mami Rosa, que me apoyaron y contuvieron en los momentos buenos y malos. Me han enseñado a ser la persona que soy. Hoy les dedico a ustedes este logro, como una meta más conquistada. Orgullosa de haberlos elegido como mis padres y que estén a mi lado en este momento tan importante

También se la dedico a todos mis papis y mamis que estuvieron ahí dándome ánimos y consejos que han sido muy útiles durante toda mi vida.

Y finalmente, a mi compañero de tesis, quien me hacía reaccionar cuando pensaba que no podía continuar. Lo logramos.

Con amor Mishell.

“Muchas veces la historia más importante de todas es la historia que estamos construyendo hoy en día.”

JK Rowling.

A mis padres Li y Gus quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades y su apoyo todo este tiempo.

A mis hermanos Stefy y Samy por su cariño y fe en mí incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, ser mi ejemplo cada uno a su manera y hacerme sentir orgullo de ser su hermano.

A mi mami Marthita por su cariño infinito y sus consejos, a mi papi Oswaldito por su hospitalidad, apoyo y estar siempre pendiente de mí, a mi mami Aidita por cuidarme desde el cielo y mandarme sus bendiciones que siempre las siento y a mi papi Luchito que siempre lo llevo en mis pensamientos y en mi corazón hoy le cumpla la promesa y sé que en su pedacito de cielo está feliz y se siente orgulloso de mí.

Por último, a mi compañera de tesis Mishell por su esfuerzo y dedicación para cumplir esta meta. Objetivo cumplido.

Con amor Steven.

Agradecimiento

Le agradezco a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo, mi luz y mi camino. Por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.

Le agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Gracias por ser quienes son y por creer en mí

A todos mis familiares que cuando he necesitado de su ayuda han estado ahí, cuando he estado enferma, cuando me he sentido sola incluso cuando he cometido errores. Gracias por su apoyo incondicional sin pedir nada a cambio.

A todos mis amigos y compañeros, hoy me toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de mi vida y no puedo dejar de agradecer por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir horas de estudio e incluso en los momentos de diversión. Son muchos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Le agradezco muy profundamente a mi tutora por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias a todos por haber aportado un granito de arena para que este día tan anhelado llegue.

Gracias, Mishell.

Agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

Les agradezco a mis padres porque desde muy pequeño me enseñaron el significado de perseverar y luchar por nuestros sueños, a mis hermanos porque fueron mis primeros compañeros de vida y quienes me enseñaron desde el momento que nació lo esencial que es un equipo. Gracias por ser quienes son y por creer en mí.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan y me apoyan en todos mis sueños y metas.

A mis amigos. Con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas, les agradezco por todo el apoyo y la ayuda incondicionales que me han brindado a lo largo de este proceso. Gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas.

A mi tutora por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados para siempre en la memoria en mi futuro profesional.

Y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta.

Gracias, Steven.

Índice de Contenidos

Reporte de verificación de contenidos	2
Certificado.....	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	8
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I Generalidades del proyecto	21
Introducción.....	21
Antecedentes	22
Justificación e Importancia	26
Alcance	28
Objetivos	30
<i>Objetivo general</i>	30
<i>Objetivos específicos</i>	30
Conclusión del capítulo 1.....	30
Capítulo II Investigación Bibliográfica.....	31
Estado del arte	31
Marco teórico.....	38
<i>Teatro robótico</i>	39

<i>Teatro robótico heterogéneo</i>	39
<i>Internet de las Cosas (IoT)</i>	39
<i>Protocolo de comunicación MQTT</i>	40
<i>NodeRED</i>	41
<i>Python</i>	42
<i>Robots NAO</i>	43
Conclusión del capítulo 2.....	44
Capítulo III Diseño e implementación.....	45
Metodología.....	45
<i>Requerimientos</i>	45
<i>Diseño de Sistemas</i>	46
<i>Dominio específico del diseño</i>	46
<i>Integración del sistema</i>	48
<i>Verificación/Validación</i>	49
<i>Modelamiento y análisis del modelo</i>	49
<i>Producto</i>	50
Diseño y construcción del sistema mecánico.....	50
<i>Diseño mecánico del telón</i>	50
<i>Análisis y repotenciación del mecanismo de elevación</i>	58
<i>Robot KERO</i>	74
Diseño e implementación del sistema electrónico.....	76
<i>Telón</i>	76
<i>Plataforma de elevación repotenciada</i>	82
<i>Robot KERO</i>	86
Diseño e implementación del sistema de control.....	87

	12
<i>HMI</i>	87
<i>Telón</i>	89
<i>Plataforma de elevación</i>	91
<i>Robot KERO</i>	94
Construcción	95
<i>Telón</i>	95
<i>Plataforma</i>	97
<i>KERO</i>	99
Diseño e implementación del servidor en la nube.....	100
Conclusión del capítulo 3.....	103
Capítulo IV Validación y Análisis de Resultados	104
Validaciones previas.....	104
Validación del teatro robótico heterogéneo como herramienta de terapia.....	105
<i>Resultados</i>	106
Evaluación de la herramienta tecnológica	112
<i>Telón</i>	112
<i>Plataforma de elevación</i>	113
<i>Robot KERO</i>	116
<i>Servidor en la nube</i>	117
<i>Integración del teatro robótico</i>	119
Conclusión del capítulo 4.....	122
Conclusiones.....	124
Recomendaciones.....	126
Trabajos Futuros	127

Bibliografía.....	128
Apéndices.....	133

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Matriz del estado del arte</i>	32
Tabla 2 <i>Objetivos de diseño del telón</i>	51
Tabla 3 <i>Propiedades mecánicas del nylon</i>	53
Tabla 4 <i>Propiedades mecánicas del POM</i>	53
Tabla 5 <i>Propiedades mecánicas del PLA</i>	54
Tabla 6 <i>Especificaciones del piñón</i>	55
Tabla 7 <i>Selección del material para la estructura de la plataforma</i>	63
Tabla 8 <i>Selección del material para la mesa de la plataforma</i>	63
Tabla 9 <i>Selección del material para los ejes de rodamientos</i>	64
Tabla 10 <i>Selección del material para los ejes de las uniones de la máquina</i>	64
Tabla 11 <i>Elementos para fabricar los niveladores</i>	65
Tabla 12 <i>Masa de los elementos que debe elevar el mecanismo de tijeras</i>	66
Tabla 13 <i>Comparación de los cambios realizados en la estructura mecánica de la plataforma</i>	71
Tabla 14 <i>Selección del material para la base del Robot KERO</i>	76
Tabla 15 <i>Lista de elementos electrónicos empleados</i>	78
Tabla 16 <i>Detalle de comunicación pines ESP32</i>	79
Tabla 17 <i>Definición de los valores de las variables para la fórmula de la fuerza del pistón</i>	83
Tabla 18 <i>Especificaciones de los pistones electrónicos ECO-WORTHY</i>	84
Tabla 19 <i>Asignación de los pines de la ESP32 para el funcionamiento de la plataforma</i>	85
Tabla 20 <i>Lista de las preguntas de la encuesta realizada</i>	105
Tabla 21 <i>Escala de ponderación de "Likert"</i>	106
Tabla 22 <i>Resultados obtenidos de las encuestas</i>	106
Tabla 23 <i>Resultados de la pregunta 1</i>	107
Tabla 24 <i>Resultados de la pregunta 2</i>	108

Tabla 25 <i>Resultados de la pregunta 3</i>	109
Tabla 26 <i>Resultados de la pregunta 4</i>	110
Tabla 27 <i>Resultados de la pregunta 5</i>	111
Tabla 28 <i>Pruebas del tiempo de subida y tiempo de bajada del telón</i>	112
Tabla 29 <i>Pruebas del tiempo de subida y tiempo de bajada de la plataforma</i>	113
Tabla 30 <i>Pruebas de movimientos de los Robots Nao encima de la plataforma de elevación</i>	114
Tabla 31 <i>Especificaciones técnicas de la plataforma</i>	115
Tabla 32 <i>Pruebas del funcionamiento del KERO</i>	116
Tabla 33 <i>Diferentes conexiones a la página web para el monitoreo y control del teatro</i>	117
Tabla 34 <i>Pruebas del funcionamiento del teatro robótico</i>	122

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Robots humanoides: Jane (izquierda) y Thomas (Derecha)</i>	23
Figura 2 <i>Robots de dos ruedas: Pica (izquierda) y Ringo (Derecha)</i>	24
Figura 3 <i>Teatro niño-robot para integrar la educación STEAM en niños</i>	25
Figura 4 <i>Teatro robótico con Robots NAO</i>	25
Figura 5 <i>Presentación del Teatro robótico con Robots NAO</i>	26
Figura 6 <i>Teatro robótico homogéneo</i>	29
Figura 7 <i>Propuesta del teatro robótico heterogéneo</i>	29
Figura 8 <i>Modelo PUB/SUB del protocolo MQTT</i>	41
Figura 9 <i>Robots NAO</i>	43
Figura 10 <i>Metodología de Diseño y Desarrollo de Productos</i>	46
Figura 11 <i>Tipos de telones: (a) Plegable (b) Telescópico (c) Enrollable</i>	50
Figura 12 <i>Sistema mecánico del telón</i>	52
Figura 13 <i>Guía para el telón</i>	54
Figura 14 <i>Elementos para el diseño del piñón</i>	55
Figura 15 <i>Diseño para la parte frontal del telón</i>	58
Figura 16 <i>Mecanismo de elevación actual</i>	58
Figura 17 <i>Análisis de Von Mises del mecanismo de tijera actual</i>	60
Figura 18 <i>Análisis de deformación unitaria del mecanismo de tijera</i>	60
Figura 19 <i>Análisis de factor de seguridad del mecanismo de tijera</i>	61
Figura 20 <i>Análisis de frecuencia del mecanismo de tijeral con $f = 13.104\text{Hz}$</i>	62
Figura 21 <i>Análisis de cuerpo libre para repotenciar el mecanismo de tijeras (arriba)</i>	66
Figura 22 <i>Análisis de cuerpo libre para repotenciar el mecanismo de tijeras (abajo)</i>	68
Figura 23 <i>Análisis de cuerpo libre para repotenciar el mecanismo de tijeras (Barra AC)</i>	69
Figura 24 <i>Análisis de Von Mises del mecanismo de tijeras repotenciado</i>	71
Figura 25 <i>Análisis de deformación unitaria del mecanismo de tijeras repotenciado</i>	72

Figura 26	<i>Análisis del factor de seguridad del mecanismo de tijeras repotenciado</i>	72
Figura 27	<i>Análisis de frecuencias del mecanismo de tijeras repotenciado con $f = 13.074\text{Hz}$</i>	73
Figura 28	<i>Kit Lúdico completo del Robot KERO</i>	74
Figura 29	<i>Diseño final de la base para el robot KERO</i>	75
Figura 30	<i>Diagrama esquemático de control y potencia del teatro robótico</i>	80
Figura 31	<i>Diagrama de conexiones de los elementos visuales del teatro</i>	81
Figura 32	<i>Diseño de la PCB para el telón</i>	81
Figura 33	<i>Gráfica de la fuerza del pistón</i>	82
Figura 34	<i>Actuadores lineales ECO-WORTHY</i>	83
Figura 35	<i>Diagrama de control y potencia de la plataforma repotenciada</i>	85
Figura 36	<i>Diseño de la PCB para la plataforma repotenciada</i>	86
Figura 37	<i>Sistema electrónico del robot KERO</i>	87
Figura 38	<i>Páginas principales de la HMI</i>	88
Figura 39	<i>Estructura del guion del teatro robótico</i>	89
Figura 40	<i>Estructura MQTT del telón</i>	90
Figura 41	<i>Control del telón mediante actos en la HMI</i>	90
Figura 42	<i>Control del telón manual en la HMI</i>	91
Figura 43	<i>Estructura MQTT de la plataforma</i>	92
Figura 44	<i>Control automático de la plataforma</i>	93
Figura 45	<i>Control manual de la plataforma</i>	93
Figura 46	<i>Estructura MQTT del robot KERO</i>	94
Figura 47	<i>Control automático del robot KERO</i>	95
Figura 48	<i>Proceso de construcción del telón</i>	96
Figura 49	<i>Imágenes de la construcción del telón</i>	96
Figura 50	<i>Imagen de la PCB del circuito</i>	97
Figura 51	<i>Proceso de repotenciación de la plataforma</i>	97

Figura 52 <i>Imágenes de la repotenciación de la plataforma</i>	98
Figura 53 <i>Imágenes del sistema electrónico de la plataforma</i>	98
Figura 54 <i>Proceso de construcción del KERO</i>	99
Figura 55 <i>Imágenes de la construcción del KERO</i>	99
Figura 56 <i>Estructura MQTT del servidor web</i>	100
Figura 57 <i>Esquema de la ventana de monitoreo del servidor web</i>	101
Figura 58 <i>Ventana de monitoreo del servidor web</i>	101
Figura 59 <i>Esquema de la ventana de control del servidor web</i>	102
Figura 60 <i>Ventana de control del servidor web</i>	102
Figura 61 <i>Gráfica estadística de la pregunta 1</i>	107
Figura 62 <i>Gráfica estadística de la pregunta 2</i>	108
Figura 63 <i>Gráfica estadística de la pregunta 3</i>	109
Figura 64 <i>Gráfica estadística de la pregunta 4</i>	110
Figura 65 <i>Gráfica estadística de la pregunta 5</i>	111
Figura 66 <i>Pruebas de los robots Nao caminando encima de la plataforma</i>	115
Figura 67 <i>Rutina programada para la validación del KERO</i>	117
Figura 68 <i>Conexión a la página web desde un iPad conectado a una red wifi</i>	118
Figura 69 <i>Conexión a la página web desde un celular con datos móviles de Movistar</i>	118
Figura 70 <i>Conexión a la página web desde una computadora de escritorio</i>	119
Figura 71 <i>Guion creado en la HMI del teatro robótico</i>	120
Figura 72 <i>Secuencia del guion de prueba</i>	121

Resumen

El presente proyecto de robótica social se basa en la implementación de un teatro robótico heterogéneo funcional, conformado por tres robots Nao, un robot KERO y su correspondiente escenario que cuenta con una plataforma de elevación, una cámara de humo, el sistema de iluminación y un telón automático. El objetivo principal del proyecto es programar al robot KERO para que actúe como el narrador, incluyendo su control y monitoreo en la HMI (Interfaz humano máquina) del teatro, y generar el monitoreo y control de los elementos que conforman el escenario desde una página web. De igual forma, se requiere diseñar un telón mecatrónico y repotenciar el mecanismo de elevación para eliminar las vibraciones que se producen al momento de colocar los robots.

El teatro robótico heterogéneo ha sido diseñado para ser una herramienta de aprendizaje y terapia que ayude a personas con discapacidades en el país o con problemas de aprendizaje, tales como son el TEA (Trastorno del espectro autista), déficit de atención, entre otros. Finalmente, el proyecto fue evaluado por un grupo de psicopedagogos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, validando el desempeño y versatilidad del teatro robótico heterogéneo como una herramienta terapéutica. Todos los evaluadores concordaron en que la participación del nuevo robot fue buena y aportaron con diferentes consejos en la tonalidad de la voz del robot y su ubicación al momento de presentar una obra frente a personas con TEA.

Palabras clave: robótica social, robot NAO, interfaz humano máquina, teatro robótico heterogéneo

Abstract

This social robotics project is based on the implementation of a functional heterogeneous robotic theater, made up of three Nao robots, a KERO robot and its corresponding stage that has a lifting platform, a smoke chamber, the lighting system and an automatic curtain. The main objective of the project is to program the KERO Robot to act as the narrator including its control and monitoring in the HMI of the theater. And generate the monitoring and control of the elements that make up the scenario from a web page. Similarly, it is necessary to design a mechatronic curtain and repower the lifting mechanism to eliminate the vibrations that occur when placing the robots.

The heterogeneous robotic theater has been designed to be a learning and therapy tool that helps people with disabilities in the country or with learning problems, such as ASD, attention deficit, etc. Finally, the project was evaluated by a group of educational psychologists from the University of the Armed Forces - ESPE, validating the performance and versatility of the heterogeneous robotic theater as a therapeutic tool. All the evaluators agreed that the participation of the new robot was good and they provided different advice on the tonality of the robot's voice and its location when presenting a work in front of people with ASD.

Key words: social robotics, Nao robots, human machine interface, heterogeneous robotic theater

Capítulo I

Generalidades del proyecto

Introducción

El teatro robótico es un campo de investigación relativamente joven, novedoso y con un gran crecimiento a futuro. El presente trabajo presenta las generalidades para el diseño de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia para ello se tiene como base un teatro robótico homogéneo conformado por 3 robots NAO que figuran como actores y a su vez, un escenario mecatrónico que cuenta con una plataforma de elevación, cámara de humo y luces. El control del escenario mecatrónico se lo realiza mediante una HMI (Interfaz humano máquina) y el sistema de comunicación de todos los elementos fue creado con la ayuda del protocolo MQTT (Protocolo de comunicación para recibir y enviar mensajes mediante una red) en un servidor local.

Para cumplir los objetivos planteados, se integrará al teatro robótico un nuevo robot. El robot KERO, el cual es un robot poli articulado de aspecto amigable y que tomará el papel del narrador. Además, se incluirá en el escenario un telón mecatrónico para la apertura y cierre de las presentaciones del teatro robótico.

Actualmente, la plataforma de elevación presenta problemas de estabilidad, lo cual provoca que se caigan los actores (robots NAO) cuando se mueven. Es por eso que se dará solución a los problemas de la plataforma de elevación realizando análisis de frecuencias en la estructura, verificando y cambiando las partes más críticas. Por último, el monitoreo del teatro robótico heterogéneo se lo realizará mediante un servidor en la nube.

Antecedentes

La robótica social se encuentra enfocada en la interacción con el ser humano, es decir la arquitectura, componentes y recursos que se centran en lograr que los robots se integren con la sociedad humana sin ningún problema. La robótica social se ha ido introduciendo moderadamente dentro de la sociedad humana formando parte de la normalidad del día a día en muchos de los países desarrollados, permitiendo así que la interacción humano robot se desarrolle a mayor escala.

Según Liliana Quiroga, el robot social, generalmente de aspecto humanoide, interactúa y se comunica con las personas siguiendo comportamientos, patrones o normas de conducta sociales. La emulación de emociones en la interacción hombre–robot permite mejorar el comportamiento de los robots mediante fases de aprendizaje frente a las interacciones con humanos; y que junto a agentes de comunicación, visión y movimiento forman el robot social. Dentro de la inteligencia artificial, la separación más lógica, son las actividades cognitivas basadas en el razonamiento y desarrollo lógico, y las actividades afectivas basadas en las emociones (Quiroga, 2018).

Los robots sociales se definen también como plataformas capaces de establecer una interacción social con las personas, de forma similar a la interacción interpersonal. Este tipo de plataformas han sido propuestas como herramientas complementarias en terapias y rehabilitación con el fin de mejorar la adherencia y conformidad al tratamiento, o también para el entretenimiento y el confort (Pérez Vidal et al., 2017).

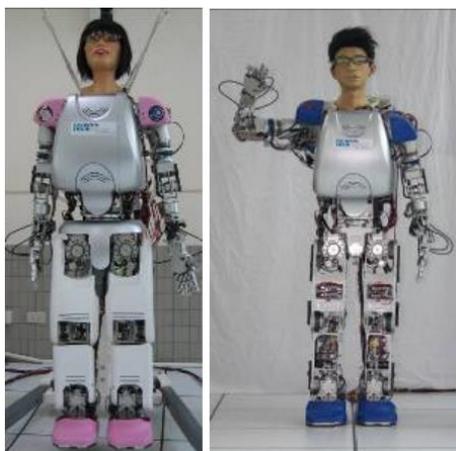
Por ejemplo, existe evidencia de que la terapia robótica (TR) puede mejorar la conducta de niños con Trastorno del Espectro Autista (TEA) de forma espontánea y entretenida. Los robots sociales ayudan a los pacientes con TEA por medio de la asistencia física, terapia e interacción verbal y corporal. Dentro de los diferentes enfoques en los que se ha introducido la robótica desde su creación, se ha incluido uno nuevo conocido como el teatro robótico. Este

nuevo enfoque consiste en el uso de robots en obras de teatro, ya sea interactuando con humanos o con otros robots. Las aplicaciones de los teatros robóticos abarcan las áreas de la educación, terapia y el entretenimiento, ya que sirven como apoyo para los procesos de enseñanza y aprendizaje, terapias enfocadas en personas con discapacidades o trastornos de atención, de una forma didáctica y entretenida (Celis et al., 2020). Existen proyectos y programas orientados en el diseño y construcción de teatros robóticos que en su mayoría son homogéneos, de los cuales se destacarían los siguientes:

En 2009, se realizó el primer teatro de robots del mundo con un elenco compuesto por dos andróides bípedos y dos robots humanoides de dos brazos y ruedas gemelas, como se puede ver en la Figura 1 y Figura 2. Este proyecto fue financiado por la Fundación Nacional del Consejo de Ciencias de la República de China (Taiwán). Su presentación constaba de 5 actos, de los cuales, el último se consideró un teatro robótico heterogéneo debido a la interacción de los dos tipos diferentes de robots. Para el control de los robots utilizaron la red inalámbrica, pero tenían mucha interferencia en la comunicación de los robots (Lin et al., 2009).

Figura 1

Robots humanoides: Jane (izquierda) y Thomas (Derecha)



Nota. Tomado de The realization of robot theater: Humanoid robots and theatric performance, por Lin et al., 2009.

Figura 2

Robots de dos ruedas: Pica (izquierda) y Ringo (Derecha)



Nota. Tomado de The realization of robot theater: Humanoid robots and theatric performance, por Lin et al., 2009.

En 2019, se implementó el primer teatro niño-robot en la escuela primaria “Dollar Bay” en Michigan, Estados Unidos, como una herramienta que ayude a introducir la educación STEAM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) en los niños. Como se puede ver en la Figura 3, se utilizaron una serie de robots, tales como: Pleo Reborn, Robosapien, Nao, Darwin, Romo, Mindstorm, Zoomer and Swarm robots. Se trató de un teatro homogéneo debido a que no existió una interacción entre los diferentes tipos de robots, ya que su fin era poder distribuirlos entre todos los niños. Este programa tuvo un potencial significativo para promover la educación STEAM en los niños de manera integrada y bastante didáctica (Barnes et al., 2020).

Figura 3

Teatro niño-robot para integrar la educación STEAM en niños



Nota. Tomado de Child-Robot Theater: Engaging Elementary Students in Informal STEAM Education Using Robots, por Barnes et al., 2020.

En 2020, Alan Prócel desarrolló un Teatro Robótico con 3 robots Nao de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, el cual fue presentado en el laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos frente a diferentes grupos de personas, como se puede visualizar en la Figura 4. Este proyecto es importante en el desarrollo de tecnologías de asistencia social, ya que la interacción humana – robot que se consigue con el teatro ayuda a mejorar las habilidades comunicativas y expresiones corporales de los niños con TEA (Tobar et al., 2021).

Figura 4

Teatro robótico con Robots NAO



Nota. Tomado de Autism Robotic Theater: a technological tool to contribute to the social interaction of children diagnosed with autism spectrum disorder, Tobar et al., 2021.

En 2021, el proyecto antes mencionado fue complementado con la implementación de un escenario mecatrónico interactivo, el cual se puede visualizar en la Figura 5, orientado a ser una herramienta de apoyo a la enseñanza de niños, realizado por Daniel Almeida y Antonio Balladares (Almeida & Balladares, 2021).

Figura 5

Presentación del Teatro robótico con Robots NAO



Nota. Tomado de Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños, por Almeida & Balladares, 2021.

Justificación e Importancia

La discapacidad es compleja, dinámica, multidimensional y controvertida. Históricamente se segregaba a las personas con discapacidad confinándolas en instituciones residenciales y escuelas especiales. En la actualidad, se ha optado por la inclusión y las soluciones orientadas al componente médico enfocadas en recursos interactivos considerando que la discapacidad en las personas se origina tanto en los factores ambientales como en el cuerpo (Collado, 2013).

Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud en 2010 más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad; es decir, alrededor del 15% de la población mundial (OMS, 2011). De acuerdo al último censo nacional realizado en el 2010, hay 816.156 personas que tienen algún tipo de discapacidad, esto representa el 5,63% de la población del Ecuador que alcanza los 14'483.499. El mayor porcentaje de personas con discapacidad corresponde a mujeres, con un 51,6%, frente al 48,4% de hombres, y se presume que esa cantidad ha ido en aumento (INEC, 2010).

En el Ecuador existen múltiples centros, programas y fundaciones para el tratamiento de personas con discapacidad, en los cuales el uso de tecnología de vanguardia es nulo, es por eso que resulta de suma importancia desarrollar herramientas y programas tecnológicos innovativos que colaboren a la sociedad y, particularmente, a las personas que padecen de alguna discapacidad para mejorar su estilo de vida.

A nivel terapéutico y educativo hay multitud de programas de intervención como el Análisis Conductual Aplicado, la Intervención Conductual Naturalista, el Modelo Evolutivo Pragmático, la metodología TEACCH, fisioterapia, musicoterapia, aromaterapia, técnicas de relajación, danza o terapia asistida con animales, sin olvidar la influencia de las nuevas tecnologías y el surgimiento de nuevos mecanismos y sistemas (Pinel et al., 2018).

Varias investigaciones han demostrado que los pacientes con discapacidad tienen una mayor predisposición hacia las nuevas tecnologías, lo que les permite concentrar su atención, para hacerles llegar órdenes, estímulos, etc., a través de herramientas tecnológicas unidas a una terapia de imitación (Díaz-Portales Chaves, 2017).

La lista de nuevas tecnologías crece cada día. Robots, realidad aumentada, algoritmos y las comunicaciones de máquina a máquina ayudan a las personas en una gran variedad de tareas. Estas tecnologías son de amplio espectro y trascendentales por su potencial para transformar las empresas y las vidas humanas. Tienen la capacidad de facilitar la vida de los individuos y mejorar sus relaciones personales y laborales (Rus, 2015).

El presente proyecto de robótica social implica la implementación de un teatro robótico heterogéneo funcional, con el objetivo de fomentar nuevas tecnologías en la terapia de personas con discapacidad en el país, diseñado para generar por medio de estímulos un aprendizaje continuo necesario para mejorar sus habilidades y capacidades.

Alcance

En el Laboratorio de Mecatrónica y Sistema Dinámicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se encuentra un teatro robótico homogéneo que servirá como base para el presente proyecto. Este teatro robótico está conformado por tres robots Nao v6, como actores, un ordenador que actúa como narrador y su correspondiente escenario que cuenta con un elevador de presentación para los robots, una cámara de humo y el sistema de iluminación. Todos los elementos del teatro robótico son controlados a través de una HMI, utilizando el protocolo MQTT para la comunicación inalámbrica de los mismos (Almeida & Balladares, 2021)

En este Plan de Trabajo de la Unidad de Integración Curricular se plantea el diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia. Para esto, se integrará al teatro robótico homogéneo, antes mencionado, un robot diferente a los Nao, con su correspondiente programación para que asuma el papel del narrador. Por otro lado, cabe recalcar que el elevador actualmente es inestable, haciendo que los robots se caigan cuando caminan sobre su superficie. Por eso, es necesario repotenciar los elementos del sistema de elevación, para que tenga un correcto funcionamiento y no interfiera con el de los robots. Además, se diseñará e implementará un telón, con toda la instrumentación (sensores y actuadores), en la infraestructura actual del teatro para que se pueda abrir y cerrar. El telón será controlado a través de la HMI con un funcionamiento automático y manual.

Todo el sistema será monitoreado y controlado por medio de la HMI actual, para ello se integrarán todos los nuevos elementos dentro de la misma. La programación para el proyecto se realizará en lenguaje Python, cuya licencia es de código abierto, lo que facilita futuras

publicaciones de este trabajo. El sistema también estará comunicado mediante el uso de un servidor en la nube permitiendo el monitoreo y control desde cualquier lugar con acceso a internet. En la Figura 6 se indica la composición del teatro robótico homogéneo, por otro lado, en la Figura 7 se presenta un bosquejo con todo lo que se busca implementar en el presente trabajo:

Figura 6

Teatro robótico homogéneo

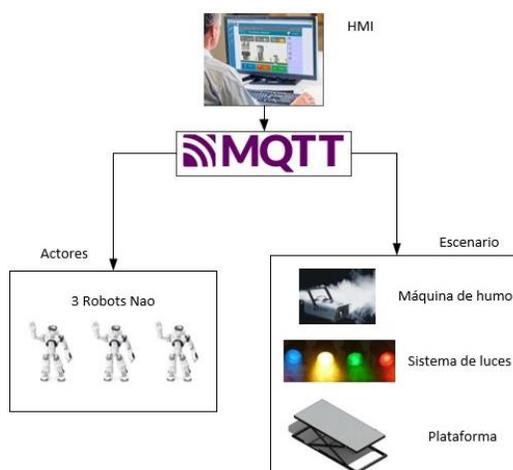
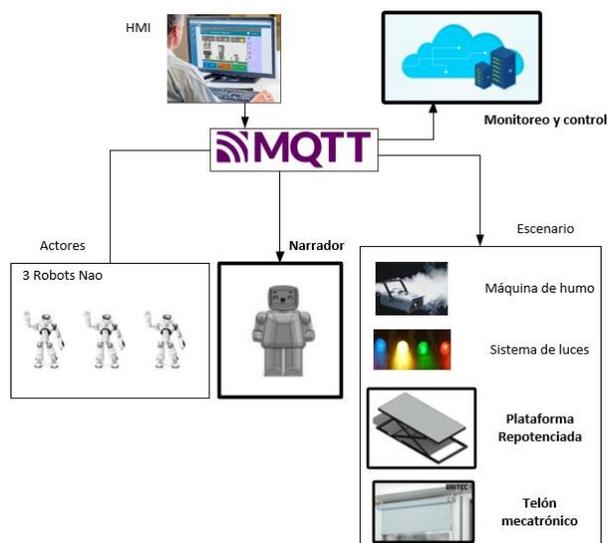


Figura 7

Propuesta del teatro robótico heterogéneo



Objetivos

Objetivo general

- Diseñar e implementar un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia.

Objetivos específicos

- Diseñar el proyecto del teatro robótico heterogéneo integrando al robot KERO como narrador.
- Desarrollar la interfaz para su monitoreo en la nube con la ayuda del protocolo MQTT.
- Diseñar la etapa de control del proyecto e integrarla dentro de la interfaz HMI actual.
- Implementar el proyecto.
- Validar los resultados.

Conclusión del capítulo 1

El teatro robótico es planteado con base a la constante innovación de la tecnología y la robótica social. El proyecto de la Unidad de Integración Curricular engloba el diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo como una herramienta de terapia, partiendo de un teatro robótico homogéneo conformado por 3 robots Nao, como los actores, dentro de un escenario compuesto por una plataforma de elevación, luces RGB, luces blancas y una máquina de humo. También se implementará el Robot KERO, el cual pertenece a un Kit Lúdico, todos estos elementos se encuentran en el laboratorio de la Universidad. Con la integración del Robot KERO en el teatro, este se transforma en un teatro robótico heterogéneo.

El funcionamiento de todos los dispositivos participantes en el teatro robótico se monitorea y controla desde una HMI conectada a la red local con un protocolo de comunicación MQTT. Para generar el servidor en la nube se emplea la HMI configurando y programando la conexión a la nube con la ayuda del mismo protocolo de comunicación MQTT y NodeRED.

Capítulo II

Investigación Bibliográfica

En este capítulo se hace una recopilación de trabajos realizados por diferentes autores, los cuales han sido de ayuda para encaminar el diseño del teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube. Además, se definen los términos más relevantes que abarca este trabajo.

Estado del arte

La investigación bibliográfica permite comprender temáticas referentes al proyecto planteado y formular un criterio sobre aspectos generales comprendidos en el teatro robótico heterogéneo. Es por eso que se necesita tener la información referente al estado del arte actual de la Robótica Social, centrando el análisis en los proyectos referentes a los teatros robóticos.

Muchas veces, el contraste entre los robots sociales y los industriales llega a confundirse, provocando una equiparación errónea entre robot social y robot de servicios. Debido a que la interacción humano-robot tiene como finalidad cumplir con algún objetivo dentro de un determinado contexto relacional, los robots sociales pueden clasificarse en distintos grupos de acuerdo con criterios relativos a esta finalidad. Por esta razón existe una gran diversidad terminológica para categorizar a los robots sociales en distintos subgrupos como: robots tutores o profesores, robots sanitarios, robots de cuidados, robots de asistencia, robots personales, etc. (Pareto, 2021).

En un futuro los avances de la robótica social tendrán como resultado diferentes tipos de robots desarrollados tecnológicamente, esto se puede notar en los robots asistenciales que ayudan en los hospitales y en las casas de las personas discapacitadas o enfermas. Todos los robots sociales contarán con inteligencia artificial, la cual les permitirá aprender de su entorno y poder reaccionar a diferentes situaciones del modo correcto. Esta inteligencia será la que les dote de su autonomía, y con los años esta inteligencia será más sofisticada (Valverde-Castro, 2020).

N°	ARTÍCULO	Año	Tipo de teatro		HERRAMIENTAS UTILIZADAS										FINALIDAD		
			Homogéneo	Heterogéneo	Software				Hardware			Comunicación			Entretención	Terapia	Educativo
					App Móvil	App Computador	Servidor local	Servidor en la nube	ESP32	ESP8266	Arduino	MQTT	TCP/IP	Wifi			
12	Design and implementation of a multi-modal framework for scenic actions classification in autonomous actor-robot theatre improvisations.	2020	X								X				X	X	
13	Child-Robot Theater: Engaging Elementary Students in Informal STEAM Education. Using Robots	2020	X		X										X		
14	Universal Biological Motions for Educational Robot Theatre and Games.	2021	X		X									X			X
15	Robot magic show as testbed for humanoid robot interaction.	2022	X				X							X		X	
16	Diseño e implementación de un teatro robótico heterogéneo con conexión a un servidor en la nube como herramienta de terapia.	2023		X			X	X		X						X	X

Al analizar la Tabla 1, se puede notar que, a diferencia del trabajo propuesto, ninguno de los 15 artículos menciona el crear un servidor en la nube para el monitoreo y control del teatro robótico. Por otro lado, solo 2 artículos presentan un teatro robótico heterogéneo con la inclusión de diferentes tipos de robots dentro de las obras teatrales y en su mayoría utilizan robots humanoides comerciales. Por consiguiente, de este análisis e investigación de diferentes artículos relacionados con los teatros robóticos se pueden recalcar los siguientes aspectos:

En 2014, en la conferencia internacional IEEE-RAS sobre robots humanoides se hace mención de la implementación del software de visión por computadora SHORE™ con el fin de recopilar la respuesta de la audiencia con respecto al espectáculo de comedia stand-up en vivo del robot humanoide RoboThespian™ en Oxford y Londres. Los resultados indicaron que un robot puede actuar en un espectáculo de comedia con éxito provocando risas y aplausos de la audiencia (Katevas et al., 2014).

En 2016, en la revista Internacional de Robótica Social se presenta el desarrollo de una obra de teatro conformada por un escenario de cuidado futuro plausible entre un humano y un robot de asistencia social. Se propone una metodología y pautas para utilizar el teatro aplicado como una plataforma para estudiar la Interacción Humano-Robot (HRI). Este estudio marca un primer paso hacia el diseño de un marco sólido para combinar el teatro aplicado con la investigación HRI (Jochum et al., 2016).

En este mismo año, en la revista *“Art Research”* se menciona la integración de los robots en las producciones escénicas con una “actuación” en el escenario junto con actores profesionales. Los robots que se mencionan como propuesta son los androides diseñados por Hiroshi Ishiguro en ATR Laboratories en Kioto, los cuales han participado en varias obras de la directora y dramaturga japonesa Oriza Hirata. A través de la puesta en escena de Hirata, el robot se convierte en parte de una experiencia muy importante, en la que se le da una función de actuación única a un robot humanoide. Se trata de una innovación cuyo nivel tecnológico no

tiene precedentes y pone en entredicho uno de los paradigmas constitutivos del teatro: la presencia (Pluta, 2016).

En 2017, la revista "*Future Internet*" menciona un sistema de interpretación actoral en el que un androide y un humano interactúan en una obra de teatro en el mundo real. Para lo cual se adaptó la teoría teatral llamada "Teoría del Teatro Coloquial Contemporáneo", y de esa forma dar al androide comportamientos naturales que sean fáciles de entender. La singularmente alta aceptación del androide por parte del público japonés parece estar correlacionada con una elevada tendencia al animismo, más que a la empatía (Chikaraishi et al., 2017).

En el Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y la Comunicación de la Universidad de Valencia se creó ROMOT, un teatro robótico en 3D. ROMOT está construido con una plataforma de movimiento robótico, incluye dispositivos multimodales y admite la interacción audiencia-película. Incluso presentan su idea de expansión de ROMOT para películas interactivas relacionadas con el amor y relaciones sexuales (Casas et al., 2017).

En 2018, Crovo Daniel, estudiante de la Pontificia Universidad Javeriana, diseñó e implementó una aplicación que permite al usuario configurar por medio de una interfaz gráfica, los elementos básicos para crear dramatizaciones de teatro robótico, esta aplicación fue diseñada para niños entre 9 a 14 años (Crovo Pérez, 2018).

En 2019, en la Conferencia Europea de Robots Móviles (ECMR) fue presentado "Autonomous Robots as Actors in Robotics Theatre - Tribute to the Centenary of R.U.R." el cual es un trabajo enfocado en generar un guion para que los robots Nao y los robots Pepper desarrollen sus funciones en la puesta en escena. Durante este evento los robots humanoides actuaron junto con actores humanos. Todo esto para verificar la capacidad de los robots para actuar de forma autónoma (Petrović et al., 2019). En este mismo año, en la Conferencia Internacional de Software, Telecomunicaciones y Redes Informáticas (SoftCOM) se presentó la investigación del impacto de los robots sociales como actores ciberfísicos en el entretenimiento

y la educación llegando a la conclusión de que poseen un gran potencial pero existen varios factores que deben ser arreglados para ser llevados a cabo correctamente, problemas tales como son la alimentación de los robots para que trabajen durante periodos largos de tiempo y también el poder garantizar una percepción fiable del entorno del robot durante la obra de teatro, es decir, un escenario que se adapte al robot (Lytridis et al., 2019).

En 2019, Andrea Bonarini diseñó un robot con el objetivo principal de ser el actor de una obra de teatro, para el control de los movimientos del robot empleó ROS en conjunto con múltiples sensores y actuadores, a pesar de no estar completamente automatizado, cumplió con su objetivo de actuar y entretener a un grupo de personas (Bonarini, 2019).

En 2020, en la Conferencia Internacional sobre Comunicación Interactiva Humana y Robótica (RO-MAN) se presentó un teatro simulado de múltiples robots, el cual estaba conformado por tres robots similares. Los robots realizaron acciones y expresiones particularmente efectivas dentro del contexto de la obra. Pese a que cada robot respondió según el comportamiento de otros personajes, sus respuestas emocionales primarias en diferentes circunstancias continuaron siendo similares, como es el caso de la forma y el color de los ojos. El objetivo de este estudio fue entender cómo los niños interpretan el teatro multi-robot simulado y sus opiniones, siendo esta la base para el diseño de una futura plataforma de teatro de robots (Peng et al., 2020).

En 2020, un grupo de ingenieros desarrollaron "COBOT", el cual pretendía ser un sistema flexible que se adaptaba a cualquier tipo de robot, mediante la modulación de los movimientos de este, dependiendo de una emoción y la red de sensores - actuadores propia del robot. Fue un teatro robótico orientado en las emociones, los robots poseían capacidades expresivas y lograron transmitir el mensaje deseado a la audiencia, conformada por niños entre 7 y 11 años. Hay que tener en cuenta que no se trabajó con robots físicos, sino virtuales (Celis et al., 2020)

En 2020, Andrea Bonarini diseñó y creó un framework para hacer que un robot autónomo sea capaz de percibir el estado emocional y las intenciones del actor, detectando las acciones escénicas que realiza en el escenario. Basado en teorías de neurociencia, psicología, actuación y coreografía, el framework adquiere, procesa y analiza en tiempo real varias características de la actuación del actor, a través de un conjunto de sensores montados en el robot y algoritmos computacionales. El robot que utilizó fue en efecto uno diseñado por ella misma en el 2019 (Bonarini, 2020).

En 2022, estudiantes de la Universidad Nacional Normal de Taiwán desarrollaron el “Show de magia de Robinion”, Robinion es un robot humanoide autónomo que se utiliza tanto en investigación como en competiciones, con muchas capacidades funcionales diferentes, como caminatas omnidireccionales, control de manipuladores, planificación de movimientos, reconocimiento de objetos mediante visión artificial y algoritmos de aprendizaje profundo, comprensión del lenguaje natural, síntesis de texto a voz. El sistema de software consta de seis partes, como la selección de menús, escenas, música y movimientos mediante botones, la detección de objetos mediante algoritmos de procesamiento de imágenes y el control de la entrada cinemática directa del robot si es necesario. Cuando Robinion muestra el espectáculo de magia a la audiencia, un asistente controla el sistema de software (Jeong et al., 2022).

Marco teórico

Para comprender los diversos conceptos que abarcan este proyecto se realizará una definición de cada uno, empezando por los términos más generales hacia aquellos que se derivan de estos. Las definiciones se consultaron en artículos, libros y documentos relacionados con el fin de obtener las ideas principales que conforman el concepto. Se obtuvieron las siguientes palabras claves a partir del estado del arte realizado con respecto al proyecto: teatro robótico, teatro robótico heterogéneo, internet de las cosas (IoT), protocolo de comunicación MQTT, NodeRED, Python, Robots NAO. Las definiciones de las palabras claves se mencionan a continuación, de igual forma, se ha establecido la relación que tienen entre sí.

Teatro robótico

El teatro robótico es una de las múltiples incursiones de la robótica en las artes, siendo un campo de investigación relativamente reciente con un gran crecimiento a futuro gracias a los avances tecnológicos en robótica, sensores, inteligencia artificial y el desarrollo de la teoría de los sistemas multi agentes, permitiendo autonomía en los robots e interacción entre ellos.

El teatro se ha convertido en un campo de investigación cómodo para la robótica debido a su capacidad para controlar el ambiente y las acciones, tanto de humanos como de robots en escena, logrando así el desarrollo del campo conocido como Interacción Humano-Robot. Sin embargo, el teatro robótico ha llegado más allá del ámbito investigativo, y se relaciona con la práctica misma del teatro tradicional involucrando activamente robots. Esto ha provocado que el teatro robótico se vea como una nueva rama artística que permite llegar al público con nuevas, diferentes y atractivas maneras. Es por eso que en los últimos años se han incrementado el número de robots que pueden ser parte del escenario de un teatro e incluso robots diseñados completamente para este propósito (Crovo, 2018)

Teatro robótico heterogéneo

El teatro robótico heterogéneo se podría definir como el uso de robots en el contexto de dramatizaciones teatrales, ya sea que los robots estén interactuando con humanos o con ellos mismos, con el fin de dar una interpretación teatral a un guion.

Para poder llamarse teatro robótico heterogéneo los robots que interactúan en dicha interpretación teatral deben ser de diferentes clases, por lo menos 2 clases diferentes. Es decir, se requiere que exista la comunicación entre varios y diferentes robots.

Internet de las Cosas (IoT)

El concepto de Internet de las cosas (IoT) permite conectar las cosas físicas con la electrónica, el software, los sensores y la conectividad, para lograr el intercambio de datos con fabricantes, operadores y/u otros dispositivos conectados.

En 2013, la Iniciativa de Estándares Globales sobre Internet de las Cosas (IoT-GSI) definió IoT como “La infraestructura de TI global que brinda servicios avanzados (físicos y virtuales) mediante la creación de redes de cosas basadas en tecnologías de información y comunicación existentes e interoperables en el desarrollo”. Para este propósito, el término “cosa” representa “el objeto del mundo físico (cosas físicas), la información o la palabra (cosas virtuales), que pueden identificarse e integrarse en redes de comunicación” (Lekić & Gardašević, 2018).

El IoT permite que la infraestructura de red existente detecte y controle las cosas de forma remota, generando una integración más directa del mundo físico y los sistemas informáticos, lo que resulta en una mayor eficiencia, precisión y beneficios económicos, al mismo tiempo que reduce la intervención humana. Al agregar sensores al concepto de IoT se produce una variedad de tecnologías, como son los hogares inteligentes, ciudades inteligentes, redes inteligentes, transporte inteligente y centrales eléctricas virtuales. Cada cosa se puede identificar de forma única a través de un sistema informático integrado y es interoperable dentro de la infraestructura de Internet existente (Lekić & Gardašević, 2018).

Protocolo de comunicación MQTT

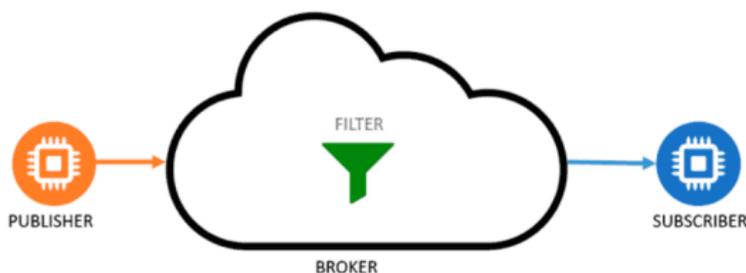
El MQTT es un protocolo de comunicación basado en M2M (Machine to Machine), el cual se implementa sobre la pila TCP/IP. Este protocolo se ha convertido en uno de los más utilizados en el ámbito del Internet de las Cosas (IoT) debido a las múltiples ventajas que ofrece, como la pequeña cantidad de ancho de banda que consume y su fácil implementación, hace que sea compatible con un gran número de dispositivos del mercado. MQTT implementa un esquema basado en el modelo PUB/SUB conformado por tres componentes el Publisher, el Subscriber y el Bróker, cada uno de ellos encargado de llevar a cabo una función en concreto, el diagrama de este modelo se puede ver en la Figura 8.

- Publisher (Publicador): se encarga de enviar los mensajes a un topic localizado en el bróker.

- Subscriber (Subscriber): recibe todos los mensajes enviados al topic al cual se ha suscrito con anterioridad.
- Bróker: se encarga de administrar los mensajes recibidos por parte del *Publisher* y hacerlos llegar a los *Subscribers* indicados, para ello clasifica los mensajes recibidos en topics y los reenvía a los subscribers que se han suscrito a dichos topics en cuestión (Vives Parra, 2020).

Figura 8

Modelo PUB/SUB del protocolo MQTT



Nota. Tomado de Desarrollo de una aplicación IoT con almacenamiento y procesamiento de datos en la nube mediante el protocolo MQTT por Vives Parra, 2020.

El MQTT es un protocolo de código abierto, es decir, todo el mundo puede utilizarlo, facilitando su implementación en dispositivos enfocados o relacionados con IoT. Aunque, como cualquier protocolo de encaminamiento, también tiene puntos negativos y en este caso, los sistemas que usan este protocolo son lentos, se miden en segundo, por tanto, no entran en el rango de “tiempo real” (Guasch & Calleja, 2019).

NodeRED

Node-RED es una herramienta gratuita basada en JavaScript, creada en la plataforma Node.js, que proporciona un editor de flujo visual basado en navegador. El sistema contiene nodos que están representados por iconos apropiados. Puede operar de dos maneras: arrastrar, soltar y conectar nodos, o importar código JavaScript.

Node-RED permite a los desarrolladores conectar nodos de entrada, salida y procesamiento creando flujos para el procesamiento de datos, controlar objetos o enviar alertas. Funciona según el siguiente principio: permite la conexión de servicios web o personaliza los nodos entre sí o con las cosas, para realizar funciones como enviar datos de sensores por correo electrónico o a servicios como Twitter, también realiza fácilmente análisis complejos, etc.

Además, es una herramienta flexible y poderosa que se utiliza para crear prototipos. Este sistema permite la creación rápida de aplicaciones, especialmente aplicaciones que se activan en un evento, como las aplicaciones IoT. La esencia de esta herramienta es permitir que los ingenieros y técnicos simplemente creen y configuren aplicaciones en tiempo real en dispositivos finales (Lekić & Gardašević, 2018).

Python

Python es un lenguaje que usa muchas características de los componentes del lenguaje C, bibliotecas iteradas, definiciones de clase, funciones, objetos, etc. Python tiene una buena capacidad de legibilidad y su sintaxis pasa bien por la mente de los programadores. Python también fomenta la creación de códigos reutilizables.

Los programadores siempre están en busca de mejores herramientas de desarrollo y lenguajes de programación. Algunos lenguajes vienen bajo el desarrollo de un lenguaje bajo y otros sobre la base de un lenguaje de alto nivel. Python se está apoderando rápidamente de gran parte del mundo de la programación.

Python produjo el código mágico como una herramienta de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD) que puede multiplicar el esfuerzo. Puede hacer cosas sorprendentes en pocas líneas de código, por ejemplo, una línea de código de 1008 mm en C y C++ se puede convertir fácilmente en 100 líneas en Python y se puede usar como prueba de concepto, por lo que trabajar con Python es muy emocionante; un viaje increíble y entretenido. Python usa escritura dinámica, ya que puede reasignar variables a diferentes tipos de datos. Esto hace que

Python sea muy flexible en la asignación de tipos de datos; se diferencia de otros idiomas que se escriben estáticamente (Kumar & Panda, 2019).

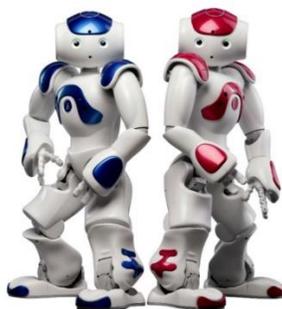
Robots NAO

Nao es un robot humanoide programable y autónomo, desarrollado por Aldebaran Robotics, una compañía de robótica francesa con sede en París subsidiaria del grupo Softbank en la Figura 9 se puede ver el aspecto de estos robots. Es importante tener en cuenta que el robot NAO se denominó robot ZORA (Zorg [Salud], Ouderen [Persona mayor], Revalidatie [Rehabilitación], Animatie [Animación]) en algunos estudios. El robot ZORA es, de hecho, un software diseñado específicamente para la rehabilitación y el cuidado de personas mayores.

El NAO (o ZORA) es un robot bípedo de 58 cm de altura, lanzado en 2006, ha evolucionado desde la primera versión hasta la más reciente, concretamente la sexta, en 2018. Tiene 25 grados de libertad, lo que le permite moverse y adaptarse al entorno, dos cámaras 2D, siete sensores táctiles, cuatro micrófonos direccionales y parlantes para interactuar con los humanos y el medio ambiente. El reconocimiento de voz y el diálogo están disponibles en 20 idiomas diferentes. Por estas características, el robot NAO se considera como un robot de asistencia social (SAR) adecuado (Robaczewski et al., 2021).

Figura 9

Robots NAO



Nota. Tomado de Socially Assistive Robots: The Specific Case of the NAO, por Robaczewski et al., 2021.

Conclusión del capítulo 2

Con la ayuda de la matriz del estado del arte se puede concluir que el desarrollo de un teatro robótico heterogéneo es un proyecto que muy pocos investigadores han intentado, la mayoría de los teatros robóticos son homogéneos por la facilidad de programar un solo tipo de robots y de esa forma aumentar la cantidad de actores del teatro sin tener que modificar el formato de programación base.

Los teatros robóticos en su mayoría son diseñados para el entretenimiento, en los últimos años ha ido incrementando su participación dentro de la educación. Ahora bien, existen muy pocos teatros robóticos que hayan sido diseñados para ser una herramienta de terapia, es difícil de creer, pero la realidad está en que las investigaciones se han enfocado en diseñar y construir diferentes robots como herramientas de terapia para TEA, dislexia, déficit de atención, etc. Pero, centrarse en usar esos robots conjuntamente con un escenario automatizado y recrear obras que aborden esa clase de temas es una idea que no se ha propuesto todavía.

De igual forma, el monitoreo y control del teatro robótico a través de un servidor en la nube es un aspecto bastante innovativo, ya que la cantidad de artículos relacionados que mencionan este tipo de monitoreo son casi nulos. Existen casos en los que no disponen una interfaz gráfica debido a que configuran los robots de forma individual, incluso algunos no emplean ningún protocolo de comunicación.

Capítulo III

Diseño e implementación

En este capítulo se detallan el diseño, construcción e implementación de los sistemas por los que está conformado este trabajo, sistema mecánico, sistema electrónico y sistema de control.

Metodología

El proyecto se llevará a cabo en torno al diseño del teatro robótico siguiendo la metodología del modelo V de norma VDI 2206, logrando así su desarrollo e investigación de manera satisfactoria. La VDI es una norma perteneciente a la Asociación de Ingenieros Alemanes que contempla una estructura para guiar el diseño mecatrónico, esta se especifica con el nombre general de Norma VDI 2206 desde el año 2002. Este modelo consta de 3 fases que son llevadas a cabo de manera paralela: Diseño del sistema, diseño específico e integración del sistema con base en los requisitos propuestos, para obtener un producto (Gausemeier & Moehring, 2002).

Requerimientos

En esta parte del modelo se analizan, estudian y enumeran los requisitos específicos del proyecto. Para este proyecto se definen los siguientes requerimientos:

- Integración del nuevo robot al teatro robótico.
- Repotenciación de la plataforma del escenario.
- Diseño y construcción del telón mecatrónico para el escenario el cual debe contar con una apariencia atractiva y llamativa.
- Integración de los nuevos elementos al protocolo de comunicación implementado actualmente.
- Implementación del servidor en la nube.

Diseño de Sistemas

En esta etapa se determina la función general, y esta a su vez se descompone en subfunciones con las cuales se van a realizar los diseños correspondientes a cada subfunción. Los subsistemas del proyecto se dividirán conforme a los requerimientos de desarrollo para crear sistemas más pequeños que faciliten su análisis. Los subsistemas propuestos son:

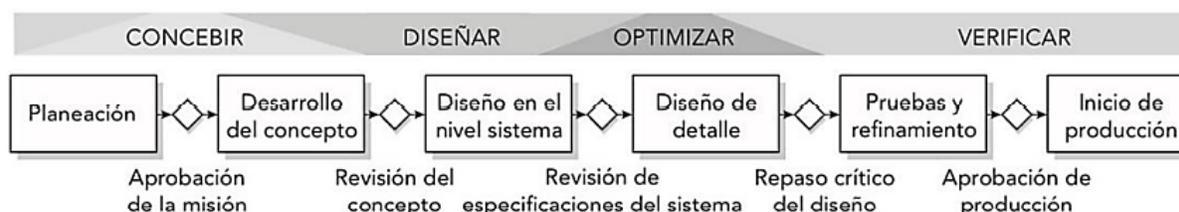
- Sistema mecánico
- Sistema electrónico
- Sistema de control

Dominio específico del diseño

En esta etapa se hace énfasis en el diseño a detalle de los componentes del sistema acorde a cada disciplina de la mecatrónica. Para el diseño de los subsistemas se tendrá en cuenta la Metodología “Proceso Genérico de Desarrollo de Producto” de los autores Karl Ulrich y Steven Eppinger en su libro *Diseño y Desarrollo de Productos (2013)*. Esta Metodología permite un proceso estructurado que consta de 6 fases, las cuales se pueden ver en la Figura 10.

Figura 10

Metodología de Diseño y Desarrollo de Productos



Nota. Tomado de *Diseño y desarrollo de productos*, por Eppinger S & Ulrich K, 2013.

Considerando esta metodología y aplicándola al proyecto se desprenden las siguientes fases:

Planeación: En esta fase se realizará el planteamiento del problema identificando los requerimientos necesarios para la solución del mismo y teniendo en cuenta que:

- En el sistema mecánico se abordará la repotenciación del mecanismo de la plataforma que dispone el escenario actualmente y también el mecanismo necesario para el telón mecatrónico del escenario.
- En el sistema electrónico se integrarán los sensores y actuadores necesarios para automatizar los mecanismos antes mencionados.
- En el sistema de control se busca integrar al nuevo robot y los nuevos mecanismos del escenario dentro del protocolo de comunicación y de la interfaz HMI que se dispone actualmente.

Desarrollo del concepto: Se realizará la correspondiente investigación del estado de arte enfocándose en la robótica social y proyectos previos relacionados con los teatros robóticos y su impacto dentro del campo de la terapia de personas.

Diseño a nivel sistema: En esta fase se incluye una especificación más exacta de lo que se necesita dentro de cada subsistema.

- Para la repotenciación del mecanismo de la plataforma del escenario se requiere mejorar el criterio de estabilidad y funcionalidad del mismo ya que actualmente presenta un juego que provoca un desequilibrio que interrumpe los movimientos de los robots Nao.
- En cuanto al mecanismo del telón mecatrónico se requiere que sea funcional y de preferencia ligero para que no provoque ningún conflicto con la estructura del escenario. También se necesita que su apariencia sea llamativa y atractiva, ya que el telón es lo primero que se ve en un teatro.
- Finalmente, la integración del nuevo robot al teatro robótico debe darse de tal forma que no afecte la programación o la comunicación existente de los robots Nao, pues es

necesario que se incorpore de la mejor forma posible y se genere una interacción entre los robots sin interrupciones.

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

- Estructura del sistema de elevación: Estable, resistente y suficientemente robusta.
- Mecanismo para el telón mecatrónico: Ligero, con una apariencia atractiva y de fácil fabricación.
- Evitar que las partes móviles estén al alcance de los usuarios.
- Evitar que cables y otros componentes electrónicos estén expuestos a la vista y al contacto de los usuarios.
- Evitar el choque de los robots.
- Evitar sonidos fuertes de los componentes mecánicos.
- Funcionamiento ágil y efectivo de todo el sistema.

Pruebas y refinamiento: Previo a la construcción de los mecanismos antes mencionados es conveniente realizar simulaciones con la ayuda de un software CAD (Diseño asistido por computador) en el que se puede comprobar el funcionamiento de los mismos. De igual forma se pueden simular los circuitos diseñados para el control y alimentación de los dispositivos.

Presentación del prototipo: Una vez terminado el teatro robótico heterogéneo estará disponible en el laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Integración del sistema

En esta etapa se busca generar y analizar un conjunto global en donde interactúan los subsistemas diseñados a detalle por cada disciplina de la mecatrónica referente al producto final. Es por eso que, para la integración de los sistemas, se utilizarán los protocolos necesarios

para lograr la comunicación inalámbrica de los nuevos elementos que formarán parte del teatro robótico heterogéneo.

También se realizará la programación para integrar al nuevo robot y los nuevos elementos en la interfaz HMI existente para su control y monitoreo teniendo en cuenta la guía GEDIS para la adecuación de la misma.

Verificación/Validación

En esta fase se busca comprobar de forma continua la correcta integración de las subfunciones del sistema, el cumplimiento de los requisitos y el progreso general del proyecto mecatrónico. Con el objetivo de generar una retroalimentación en las etapas de diseño e integración de todos los sistemas se llevará a cabo una validación constante.

El diseño de cada subsistema puede ser modificado debido a diferentes circunstancias con el fin de mejorarlo o hacerlo más eficiente. En el proyecto, cada paso dado será verificado y validado en términos de funcionalidad para corregir de manera efectiva los problemas que vayan surgiendo.

De igual forma cuando ya esté terminado el proyecto se montará un escenario de pruebas en donde se repetirá la misma escena n veces para verificar la estabilidad de la plataforma, el correcto funcionamiento del telón mecatrónico, la integración del nuevo robot y el monitoreo mediante la nube, obteniendo así la confiabilidad del sistema.

Modelamiento y análisis del modelo

Todas las actividades anteriores deben apoyarse en la utilización de modelos y herramientas asistidas por ordenador para la simulación de las funciones y funcionamiento preliminar del sistema. De igual forma, para la programación del robot es necesario utilizar diferentes softwares y protocolos de comunicación.

Producto

El producto final de este proyecto será:

- El teatro robótico heterogéneo funcionando con una plataforma repotenciada y un nuevo telón.
- Manual de usuario.
- Tesis escrita.
- Todos los programas funcionales se incluirán en la computadora del laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Diseño y construcción del sistema mecánico

Diseño mecánico del telón

El telón es el encargado de separar a los personajes del teatro con la audiencia, principalmente se lo utiliza al inicio y al final de las obras teatrales además de ser un componente estético del teatro. Para el diseño mecánico del telón del escenario es necesario un sistema ágil para que no se vuelva aburrido o desvíe la atención de la audiencia, debe ser liviano y tener una buena apariencia. Existen diferentes configuraciones de telones para teatros como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Tipos de telones: (a) Plegable (b) Telescópico (c) Enrollable



(a)



(b)



(c)

El telón plegable consiste en secciones que se pueden contraer o expandir de manera vertical u horizontal de acuerdo a las necesidades del usuario, el telón telescópico consiste en contraer y expandir la tela sin modificar su tamaño y el telón enrollable el cual se almacena en forma de rollo de forma vertical.

En la Tabla 2 se presenta una comparación entre los diferentes tipos de telones y los objetivos de diseño calificando del 0 al 1 el grado en el que se cumplen los requisitos.

Tabla 2

Objetivos de diseño del telón

Tipo de telón	Espacio reducido	Liviano	Fluidez	Apariencia	Total
(a)	0.75	1	0.5	0.75	3
(b)	0.5	1	0.75	1	3.25
(c)	1	1	1	1	4

Nota. (a) Plegable, (b) Telescópico, (c) Enrollable.

El sistema del telón que mejor se adecua a los objetivos de diseño es el tipo persiana enrollable el cual tiene un desplazamiento vertical para la apertura y el cierre del telón, al ser enrollable también ocupa menor espacio que otras configuraciones, es ágil y liviano. Para obtener un buen desempeño del telón, en el tiempo y espacio reducido, se utilizará el sistema de persianas modificando el mecanismo para su automatización.

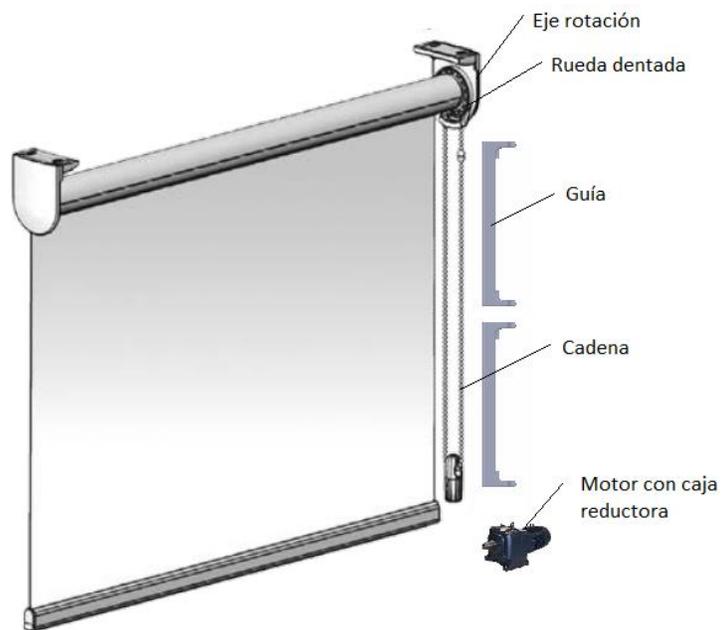
Este sistema mecánico está compuesto por partes móviles que generan que el telón se enrolle. Para su automatización se acopló un motor con caja reductora que transmita el movimiento y el torque requerido para abrir y cerrar el telón, y guías para evitar la vibración en el movimiento como se muestra en la Figura 12.

La transmisión de movimiento del sistema para telón se fundamenta en la transmisión de cadena, aprovechando los elementos de una persiana convencional, la cual tiene un eje y

una rueda dentada en la parte superior (rueda conducida) acoplado un piñón al motor en la parte inferior (rueda conductora) para que, dependiendo del sentido de giro del motor, el telón subirá o bajará.

Figura 12

Sistema mecánico del telón



Al no estar en contacto directo la rueda conducida y la conductora, el sistema mecánico no produce un deslizamiento, provocando un menor desgaste del mecanismo, lo cual genera una relación de movimiento constante y una transmisión del torque adecuada para el telón.

La cadena que viene en una persiana convencional se compone de un cordón tejido de nylon de 0.2 mm y esferas de plástico polioximetileno (POM) de 4.5 mm, el cordón tiene una gran resistencia mecánica especialmente a la tracción y las esferas son muy resistentes al impacto, poseen una alta rigidez y un índice de fricción casi nulo. En la Tabla 3 se detallan las propiedades mecánicas del nylon.

La rueda dentada es de POM, por eso el piñón que se acopló en el motor con la caja reductora es del mismo material, el POM es mayormente utilizado en aplicaciones industriales donde se requiere gran precisión. En la Tabla 4 se detallan sus propiedades mecánicas.

Tabla 3

Propiedades mecánicas del nylon

Propiedad	Valor	Unidad
Alargamiento a la ruptura	90	%
Coefficiente de Poisson	0.39	-
Resistencia a la flexión	117.2	MPa
Resistencia a la tracción	85.5	MPa

Nota. Tomado de Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños, por Almeida & Balladares, 2021

Tabla 4

Propiedades mecánicas del POM

Propiedad	Valor	Unidad
Coefficiente de Poisson	0.35	-
Módulo de elasticidad por flexión	2900	MPa
Módulo de elasticidad por tracción	3100	MPa
Resistencia a la ruptura por flexión	110	MPa
Resistencia a la tracción	70	MPa

Nota. Tomado de Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños, por Almeida & Balladares, 2021

En las guías se trabajó con impresión 3D obteniendo una forma precisa para que encajen en la estructura del teatro sin problema. El diseño de las guías se muestra en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** El material que se utilizó es PLA (ácido poliláctico), el cual tiene una buena apariencia y es liviano, al ser una guía no va a estar sometida a ninguna carga, sin embargo, el material escogido presenta una buena resistencia a la tracción. En la Tabla 5 se detallan las propiedades mecánicas del PLA.

Figura 13

Guía para el telón

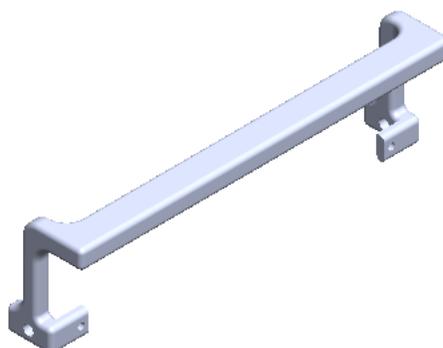


Tabla 5

Propiedades mecánicas del PLA

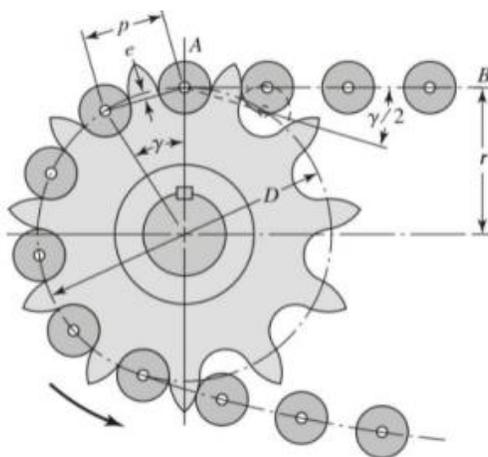
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1.25	g/cm ³
Módulo de corte	2.4	GPa
Módulo de elasticidad	3.5	GPa
Módulo de flexión	4	GPa
Resistencia a la flexión	80	MPa
Resistencia a la tracción	50	MPa

Nota. Tomado de KERO-Playable Robotic Platform to Contribute to Non-verbal Communication Teaching in Children with Autism Spectrum Disorder, por Miranda et al., 2021.

Para el diseño del piñón de acuerdo a la normativa ANSI como se puede ver en la Figura 14, es necesario calcular el paso lineal (P), el diámetro de paso del piñón (D), el ángulo que se forma desde la línea de acción hasta la cadena (γ), el diámetro de la esfera (d) y el espacio entre cuentas (e).

Figura 14

Elementos para el diseño del piñón



Nota. Tomado de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, por Budynas & Nisbett, 2015.

Tabla 6

Especificaciones del piñón

Descripción	Valor	Unidad
Diámetro de paso (D)	44	mm
Paso de la cadena (P)	7	mm
Ángulo de paso	20	grados
Diámetro de la esfera (d)	4.5	mm
Espacio entre cuentas (e)	2.5	mm

En la Tabla 6 se especifican los valores necesarios para el piñón del telón, el cual necesita tener 22, dientes de manera que sea igual a la rueda dentada de la persiana, obteniendo así la misma velocidad angular.

El cordón de nylon, según datos del fabricante, es capaz de soportar una carga en tensión de hasta 30kgf, siendo este el elemento más crítico del mecanismo, ya que la fuerza que se aplique para el movimiento debe ser menor a la especificada.

Para encontrar la fuerza necesaria para abrir y cerrar el telón experimentalmente se añade una masa conocida al mecanismo hasta lograr que gire simulando la apertura del telón. El valor obtenido en el experimento es de 8kgf, que representa la tensión mínima necesaria para subir el telón mediante el sistema de cadena – piñón, el valor es considerablemente menor a la carga máxima permitida, por lo tanto, el material y el mecanismo es eficiente y soportará las cargas sin ningún problema.

El cálculo de la potencia de transmisión está dado por el esfuerzo útil soportado por la cadena en la primera articulación que engrana a la rueda dentada y la velocidad lineal, el valor del esfuerzo se obtiene con la siguiente expresión.

$$F_n = F_o \left(\frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi + \alpha)} \right)^n \quad (1)$$

Donde F_o es el esfuerzo máximo que soporta la cadena en la primera articulación que entra en contacto con la rueda, φ y α son los ángulos entre la diferencia el primer eslabón en contacto y la línea de centros en los engranes y n el es número de articulación de la rueda dentada.

El esfuerzo máximo se encuentra en la primera articulación del eslabón que entra en contacto con la rueda dentada, el esfuerzo va decreciendo cuando el eslabón continuó su trayectoria girando hasta alcanzar la salida, donde el esfuerzo es mínimo.

Para el primer, segundo y tercer eslabón en contacto con la rueda dentada se tiene:

$$F_1 = 30 \left(\frac{\text{sen}(10)}{\text{sen}(10 + 10)} \right)^1 = 15.24 [Kgf] \quad (2)$$

$$F_1 = 30 \left(\frac{\text{sen}(10)}{\text{sen}(10 + 10)} \right)^1 = 7.72 [Kgf] \quad (3)$$

$$F_1 = 30 \left(\frac{\text{sen}(10)}{\text{sen}(10 + 10)} \right)^1 = 3.93 [Kgf] \quad (4)$$

La rueda conducida y conductora al tener la misma cantidad de dientes y diámetro, tendrán la misma velocidad angular. La velocidad angular se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$w = V \left(\frac{2}{D_p} \right) \quad (5)$$

Donde V es la velocidad lineal que sale de la relación entre la distancia recorrida y el tiempo necesario para subir el telón, y D_p el diámetro primitivo de las ruedas.

$$w = \left(\frac{104cm}{15s} \right) \left(\frac{2}{4.4cm} \right) = 189.1[rpm] \quad (6)$$

La potencia para el primer eslabón de la cadena con el esfuerzo máximo quedaría expresada de la siguiente manera:

$$P = 15.24 Kgf \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) \left(\frac{1.04m}{15s} \right) = 10.36[Watts] \quad (7)$$

Para la parte frontal del telón se eligió una imagen representativa de los 3 robots Nao que se encuentran en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Esta imagen también es la portada de la HMI desarrollada para el teatro robótico. La imagen elegida se puede apreciar en la Figura 15.

Figura 15

Diseño para la parte frontal del telón

***Análisis y repotenciación del mecanismo de elevación***

El sistema de elevación actual presenta problemas de estabilidad lo cual dificulta el movimiento de los robots en la mesa de la plataforma haciendo que se caigan. En la Figura 16 se muestra el mecanismo de elevación actual.

Figura 16

Mecanismo de elevación actual



Nota. Tomado de Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños, por Almeida & Balladares, 2021.

El mecanismo fue diseñado para elevar una carga que abarca los 3 robots Nao (4.8 kg cada Nao) y el material de la base (10 Kg), incluyendo los elementos del mecanismo (18 kg) considerando un factor de seguridad de 1.2, dando una masa aproximada de 50 kg. Obteniendo así una carga total de 490.5 N (Almeida & Balladares, 2021).

Para la repotenciación de la plataforma se debe tener en cuenta que en el diseño de elementos estructurales debe cumplir una serie de requisitos, y en el caso de un mecanismo tipo tijera, se toma en cuenta los siguientes criterios:

Criterio de resistencia: Es necesario comprobar que las tensiones máximas sean menores que las tensiones admisibles del material seleccionado para la construcción de cada elemento.

Criterio de rigidez: Es importante identificar si el elemento a diseñar será rígido, esto quiere decir que, al estar sometido a una carga no se deformará. Se debe verificar que las deformaciones o desplazamientos máximos no superen los límites admisibles.

Criterio de estabilidad: Comprobar que desviaciones de las fuerzas reales sobre las cargas estimadas no provoquen efectos que generen inestabilidad elástica o pérdida de equilibrio de la estructura.

Criterio de funcionalidad: Verificar el conjunto de condiciones auxiliares que puedan aparecer durante la vida útil de la estructura y estén relacionadas con los requisitos que debe cumplir la misma (Casillas & Estacio, 2013).

Para identificar los problemas mecánicos que presenta el mecanismo de elevación es necesario realizar los respectivos análisis que ayuden a verificar la resistencia y estabilidad del mecanismo.

Análisis estático. Se realizan las simulaciones del mecanismo de tijeras actual, verificando y analizando Von Mises, deformación unitaria y factor de seguridad del mismo.

Figura 17

Análisis de Von Mises del mecanismo de tijera actual

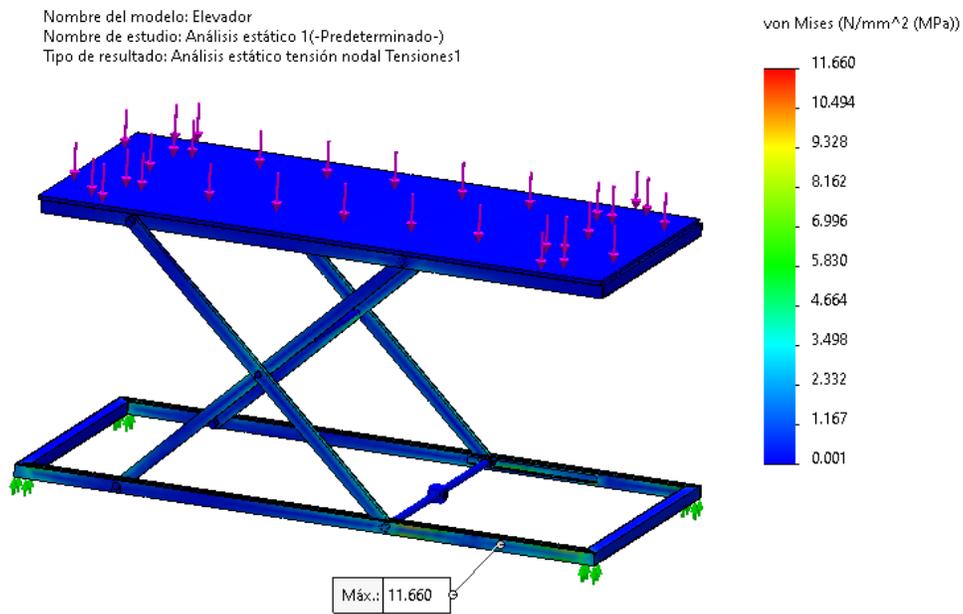


Figura 18

Análisis de deformación unitaria del mecanismo de tijera

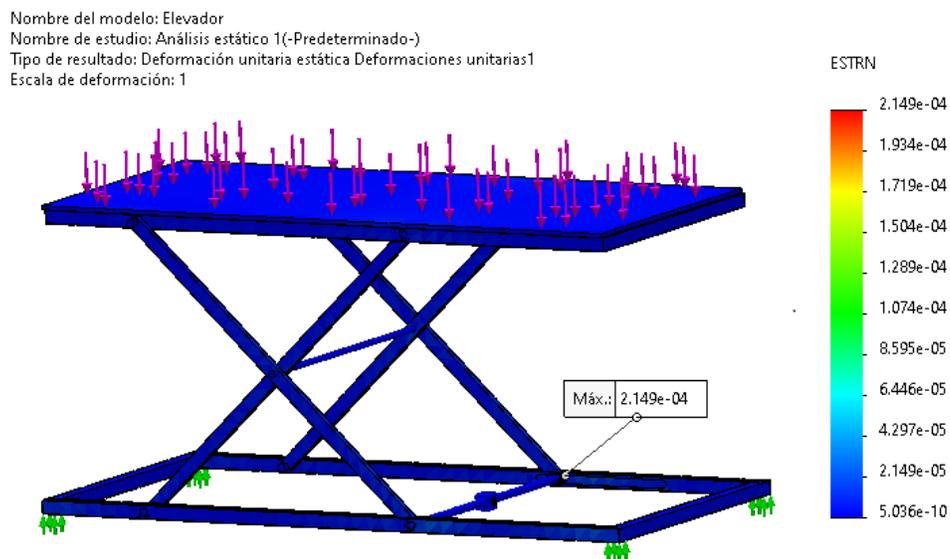
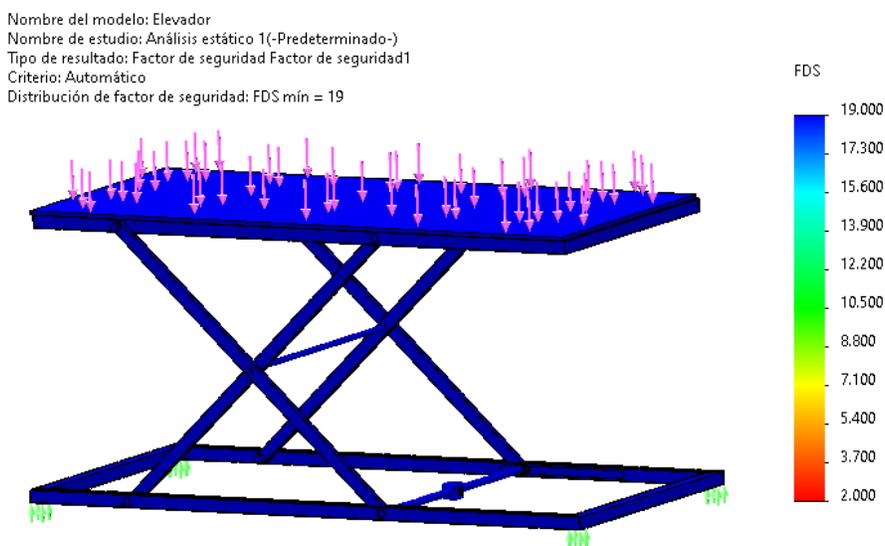


Figura 19

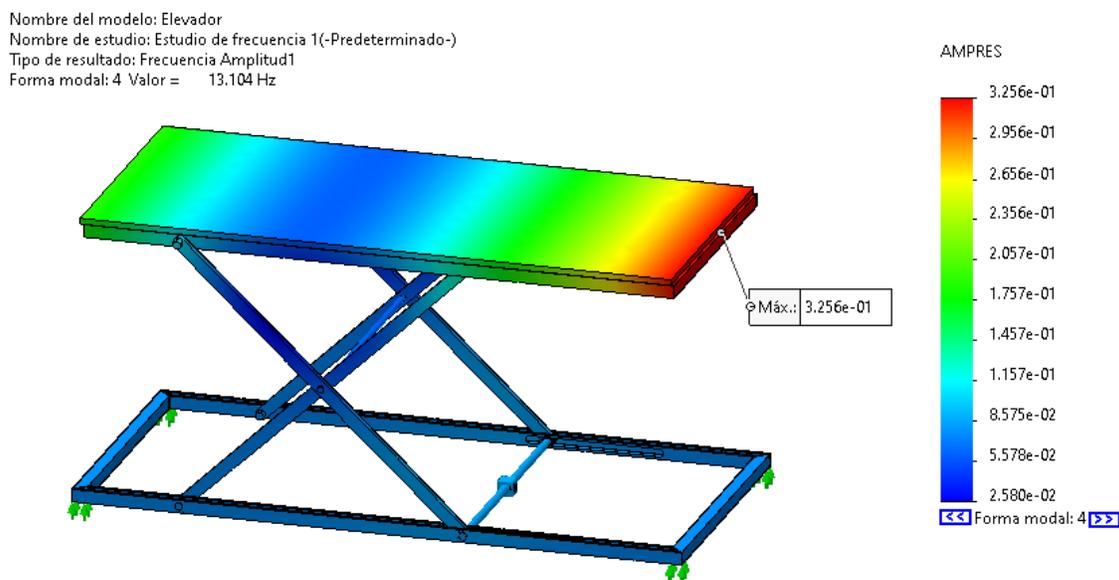
Análisis de factor de seguridad del mecanismo de tijera

Según la teoría de falla de Von Mises para materiales dúctiles, el mecanismo de tijeras actual resiste la carga máxima para la que fue diseñado, una masa de 50 kg, debido a que presenta un amplio margen de seguridad, obteniendo una tensión máxima de 11.66 MPa, tal y como se puede visualizar en la Figura 17. La deformación unitaria equivalente máxima que se obtiene es de 0.00021 cm/cm, como se puede ver en la Figura 18. Y finalmente se obtuvo un factor de seguridad de 19 (ver Figura 19), indicando así que la estructura se encuentra sobredimensionada. Hay que mencionar que a simple vista es notorio que el mecanismo de tijera se encuentra descentrado, lo que produce que la parte superior tienda a pandear hacia uno de los lados.

Análisis de Frecuencia. Para analizar los problemas de vibraciones que presenta la plataforma a través de un software de simulación se analizaron los cambios que se producen en el mecanismo al aplicarle una frecuencia.

Figura 20

Análisis de frecuencia del mecanismo de tijera con $f = 13.104\text{Hz}$



Al analizar la Figura 20 se puede notar que la estructura presenta una amplitud máxima de 0.325 frente a una frecuencia de 13.104Hz. Este problema puede producirse debido a la falta de robustez en la estructura de la plataforma, ya que en la parte superior no cuenta con vigas transversales y es un marco hueco. Otro factor que genera estas vibraciones es el hecho de que no posee una fijación en la parte inferior; las ruedas, a pesar de contar con seguros, no son suficientes para sostener y fijar toda la estructura.

Por lo tanto, es necesario realizar cambios en el diseño de la plataforma para centrar el mecanismo de tijeras y adaptar la nueva carga que se genere, ya que existirá un nuevo integrante en el teatro. Se debe modificar la estructura de la plataforma incluyendo vigas transversales auxiliares en la parte superior y añadir niveladores a los cuatro lados para que ayuden con la fijación de la plataforma.

Selección de Materiales. Se detallarán los diferentes elementos que se emplearon para repotenciar la plataforma y los materiales que cumplen con las especificaciones requeridas para la construcción de cada elemento, detallando el material que se escogió.

La estructura de la plataforma está conformada por perfiles cuadrados de 40x1.5mm, de los cuales el espesor puede variar un poco. Los posibles materiales para los perfiles cuadrados se detallan en la Tabla 7, siendo el acero de transmisión el material seleccionado.

Tabla 7

Selección del material para la estructura de la plataforma

Material	Maquinabilidad	Peso	Precio	Corrosión
Acero Galvanizado	5	4	3	5
Acero de transmisión	5	4	5	4
Acero ASTM A36	5	4	4	4

Nota. La escala de valoración de la tabla está representada con 5 como mejor opción y 0 como peor opción.

La mesa de la plataforma es una plancha de 850x1850x10mm los posibles materiales para la mesa se detallan en la Tabla 8, seleccionando el MDF como la mejor opción.

Tabla 8

Selección del material para la mesa de la plataforma

Material	Peso	Precio
MDF	5	5
Madera de Roble	2	2
Madera de Pino	3	3

Nota. La escala de valoración de la tabla está representada con 5 como mejor opción y 0 como peor opción.

Se requieren 4 ejes para los rodamientos que se incluirán en la máquina, para su sujeción se hará uso de arandelas, las cuales tendrán un ajuste de tipo juego para bocín. Los posibles materiales para estos ejes se detallan en la Tabla 9, siendo el acero de transmisión el material elegido.

Tabla 9

Selección del material para los ejes de rodamientos

Material	Maquinabilidad	Peso	Precio	Corrosión
Acero Galvanizado	5	4	3	5
Acero de transmisión	5	4	5	4
Bronce	4	4	2	5

Nota. La escala de valoración de la tabla está representada con 5 como mejor opción y 0 como peor opción.

Se requieren 10 ejes para las diferentes uniones que se agregaran en la máquina (centrales, extremos y con los pistones). Los posibles materiales para estos ejes se detallan en la Tabla 10, seleccionando el acero ASTM A36.

Tabla 10

Selección del material para los ejes de las uniones de la máquina

Material	Maquinabilidad	Peso	Precio	Corrosión
Acero Galvanizado	5	4	3	5
Acero de transmisión	5	4	5	4
Acero ASTM A36	5	4	5	4

Nota. La escala de valoración de la tabla está representada con 5 como mejor opción y 0 como peor opción.

Los soportes para la mesa se fabrican con una PLT100x8mm y los soportes para el pistón actuador se fabrican con una PLT50x4mm. Estas platinas pueden ser del mismo material

de los perfiles cuadrados, por lo tanto, se elige el acero de transmisión para los soportes. En total son necesarios 32 bocines, los cuales son soldados ya sea al soporte o al perfil, estos bocines deben ser de acero galvanizado.

Los niveladores deben tener un soporte mínimo de 40kg y una altura mínima de 190mm. Como resulta complicado conseguir los niveladores industriales, se procede a fabricarlos, cada nivelador consta de 5 partes y deben ser de un material en específico, lo cual se encuentra detallado en la Tabla 11.

Tabla 11

Elementos para fabricar los niveladores

Parte	Material	Observaciones
Base	Acero Galvanizado	
Eje roscado M14x2 – 177 mm	Acero Galvanizado	Paso coincidente con la tuerca
Arandela M14	Acero Galvanizado	
Tuerca M14x2	Acero Galvanizado	
PAD de Neopreno $\varnothing 40$ – 15 mm	Neopreno	

Memoria de Cálculo (Repotenciación). A continuación, se presentarán los cálculos para encontrar la nueva carga que debe elevar el mecanismo y los cálculos para encontrar la fuerza necesaria para elevar la carga.

La masa de cada uno de los elementos que necesita elevar el mecanismo de tijeras se encuentra especificada en la Tabla 12.

Dando una masa total de 37.4kg aplicando un factor de seguridad de 1.2 se obtiene una carga aproximada de 50kg.

Tabla 12

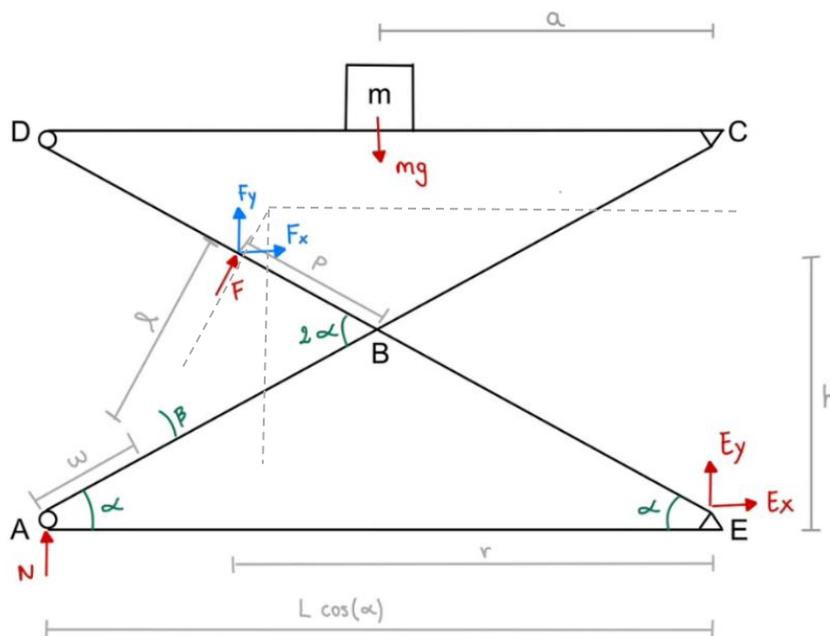
Masa de los elementos que debe elevar el mecanismo de tijeras

Elementos	Masa
Robots Nao	4.8Kg x 3=14. 4Kg
Robot Kero	4Kg
Estructura de la plataforma	12Kg
Mesa de la plataforma	7Kg

Para conocer la ecuación que describe el valor de la fuerza necesaria para elevar todos esos elementos hay que realizar el siguiente análisis:

Figura 21

Análisis de cuerpo libre para repotenciar el mecanismo de tijeras (arriba)



Teniendo en cuenta que:

$$AC = DE = L$$

(8)

Por ley de coseno se tiene que:

$$l^2 = p^2 + \left(\frac{L}{2} - w\right)^2 - 2p\left(\frac{L}{2} - w\right)\cos(2\alpha) \quad (9)$$

$$l = \sqrt{p^2 + \left(\frac{L}{2} - w\right)^2 - 2p\left(\frac{L}{2} - w\right)\cos(2\alpha)} \quad (10)$$

Por ley de senos se puede obtener β .

$$\frac{\sin(\beta)}{p} = \frac{\sin(2\alpha)}{l} \quad (11)$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{p \sin(2\alpha)}{l}\right) \quad (12)$$

Las fórmulas para encontrar h y r estarían dadas por:

$$h = \left(p + \frac{L}{2}\right)\sin(\alpha) \quad (13)$$

$$r = \left(p + \frac{L}{2}\right)\cos(\alpha) \quad (14)$$

Por ley de equilibrio se debe cumplir que la sumatoria de momentos debe ser igual a cero, obteniendo entonces:

$$\sum M_E = 0 \quad (15)$$

$$mga - F_y r - F_x h - NL \cos(\alpha) = 0 \quad (16)$$

Teniendo en cuenta que F_x y F_y están definidas por:

$$F_x = F \cos(\beta) \quad (17)$$

$$F_y = F \sin(\beta) \quad (18)$$

Reemplazando (17) y (18) en (16) se tiene que:

$$mga - F(r \sin(\beta) + h \cos(\beta)) - NL \cos(\alpha) = 0 \quad (19)$$

$$F = \frac{mga - NL \cos(\alpha)}{r \sin(\beta) + h \cos(\beta)} \quad (20)$$

Poy ley de equilibrio también se debe cumplir que la sumatoria de fuerzas en x y la sumatoria de fuerzas en y deben ser cero, por lo tanto:

$$\sum F_x = 0 \quad (21)$$

$$F_x + E_x = 0 \quad (22)$$

$$E_x = -F_x \quad (23)$$

$$E_x = F \cos(\beta) \quad (24)$$

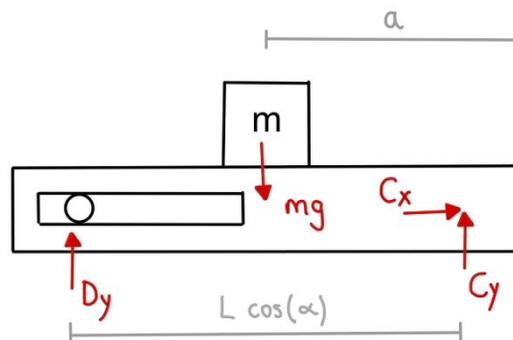
$$\sum F_y = 0 \quad (25)$$

$$-mg + F_y + N + E_y = 0 \quad (26)$$

$$E_y = -F \sin(\beta) - N - mg \quad (27)$$

Figura 22

Análisis de cuerpo libre para repotenciar el mecanismo de tijeras (abajo)



Poy ley de equilibrio se debe cumplir que la sumatoria de momentos debe ser igual cero, la sumatoria de fuerzas en x y la sumatoria de fuerzas en y deben ser cero, por lo tanto:

$$\sum M_C = 0 \quad (28)$$

$$mga - D_y L \cos(\alpha) = 0 \quad (29)$$

$$D_y = \frac{mga}{L \cos(\alpha)} \quad (30)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (31)$$

$$C_x = 0 \quad (32)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (33)$$

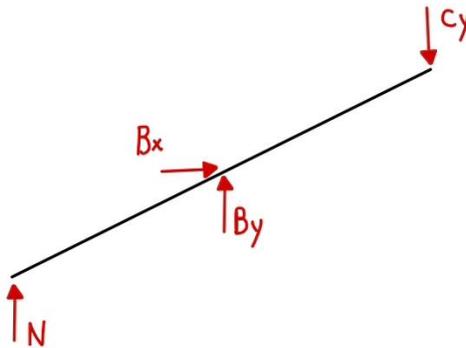
$$D_y - mg + C_y = 0 \quad (34)$$

$$C_y = mg - D_y \quad (35)$$

$$C_y = mg \left(1 - \frac{a}{L \cos(\alpha)} \right) \quad (36)$$

Figura 23

Análisis de cuerpo libre para repotenciar el mecanismo de tijeras (Barra AC)



Por ley de equilibrio se debe cumplir que la sumatoria de momentos debe ser igual cero, la sumatoria de fuerzas en x y la sumatoria de fuerzas en y deben ser cero, por lo tanto:

$$\sum M_B = 0 \quad (37)$$

$$-C_y \left(\frac{L}{2} \cos(\alpha) \right) - N \left(\frac{L}{2} \cos(\alpha) \right) = 0 \quad (38)$$

$$-C_y = N \quad (39)$$

$$N = -mg \left(1 - \frac{a}{L \cos(\alpha)} \right) \quad (40)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (41)$$

$$B_x = 0 \quad (42)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (43)$$

$$N + B_y - C_y = 0 \quad (44)$$

$$B_y = C_y - N \quad (45)$$

$$B_y = 2mg \left(1 - \frac{a}{L \cos(\alpha)} \right) \quad (46)$$

Por lo tanto, si se reemplaza la ecuación (46) en la (20) se tendría que la fuerza está dada por:

$$F = \frac{mga + mg \left(1 - \frac{a}{L \cos(\alpha)} \right) L \cos(\alpha)}{r \sin(\beta) + h \cos(\beta)} \quad (47)$$

$$F = \frac{mgL \cos(\alpha)}{r \sin(\beta) + h \cos(\beta)} \quad (48)$$

Una vez realizados los cambios en el diseño del mecanismo de tijeras se procede a realizar nuevamente las simulaciones para el análisis estático y el análisis de frecuencias, verificando que se reduzca la vibración de la máquina. En la Tabla 13 se elabora una comparación con los cambios que se realizaron para repotenciar la estructura de la plataforma de elevación.

Tabla 13

Comparación de los cambios realizados en la estructura mecánica de la plataforma

Parámetros	Plataforma anterior	Plataforma repotenciada
Carga máxima	50kg	50kg
Sujeción	Seguro de las ruedas	Niveladores y seguro de las ruedas
Vigas transversales	No	Si
Mesa	Madera contra placada	Plancha de MDF
Soportes para la mesa	No	Si

Análisis estático. Se realizan las simulaciones del mecanismo de tijeras repotenciado verificando y analizando Von Mises, deformación unitaria y factor de seguridad del mismo.

Figura 24

Análisis de Von Mises del mecanismo de tijeras repotenciado

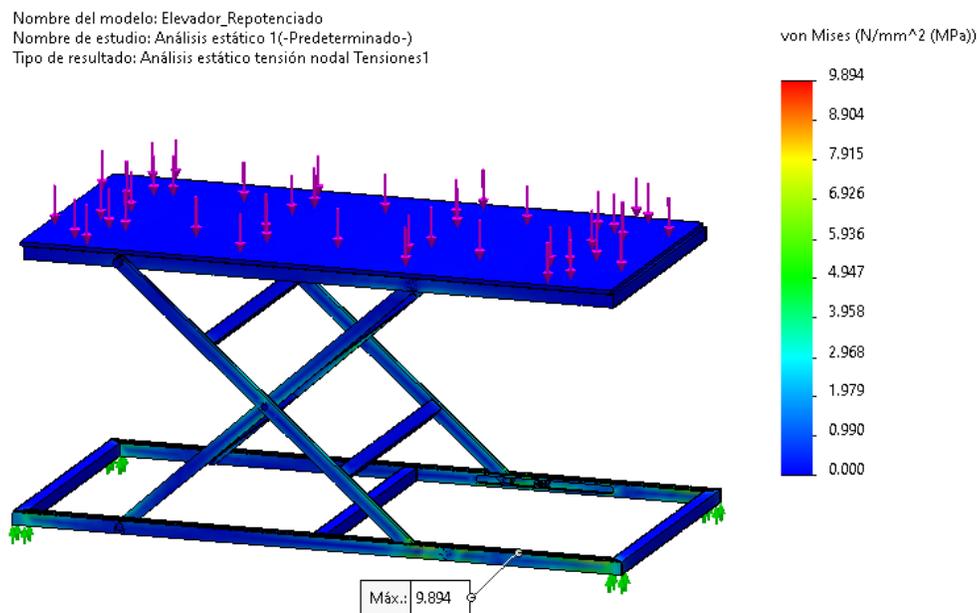


Figura 25

Análisis de deformación unitaria del mecanismo de tijeras repotenciado

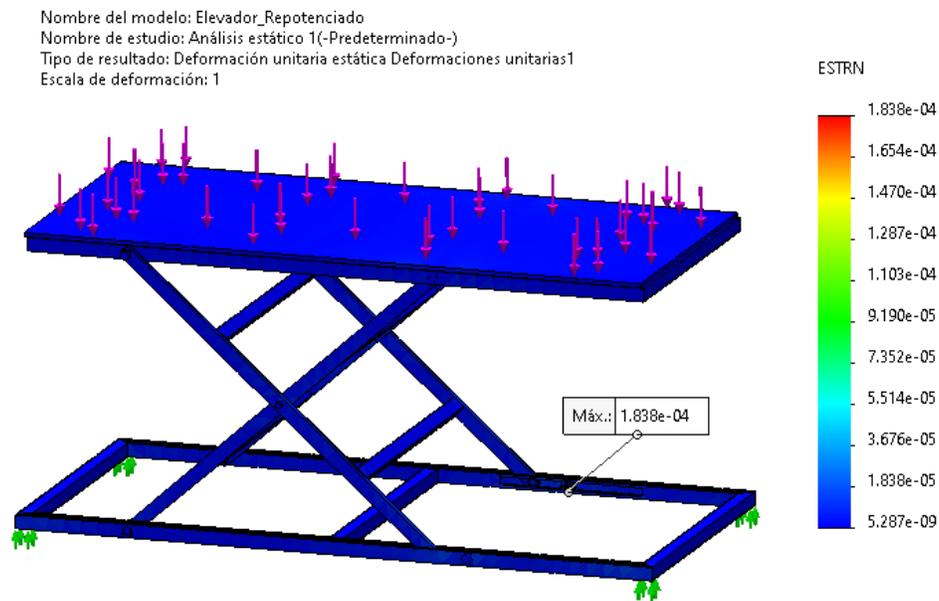
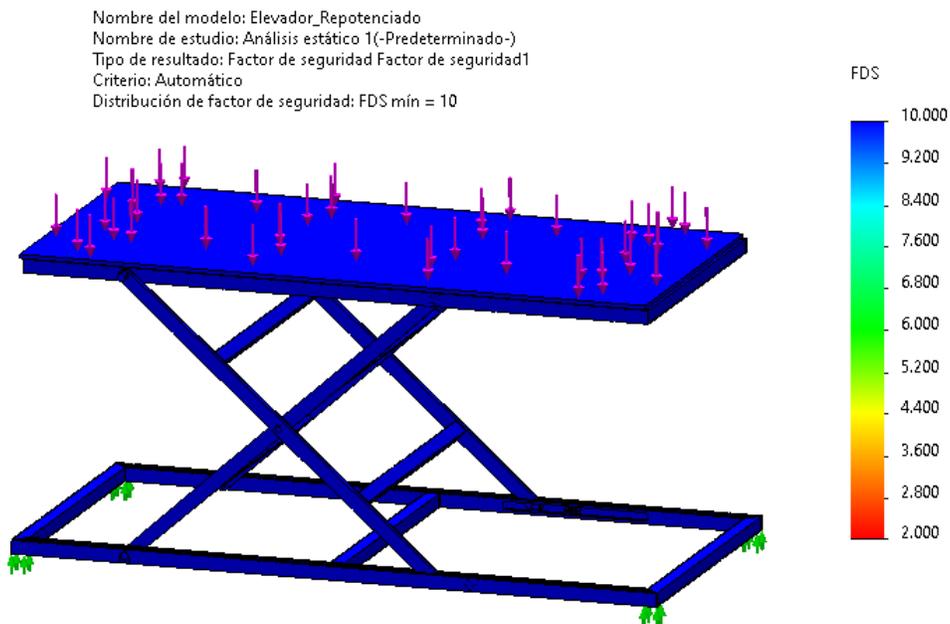


Figura 26

Análisis del factor de seguridad del mecanismo de tijeras repotenciado



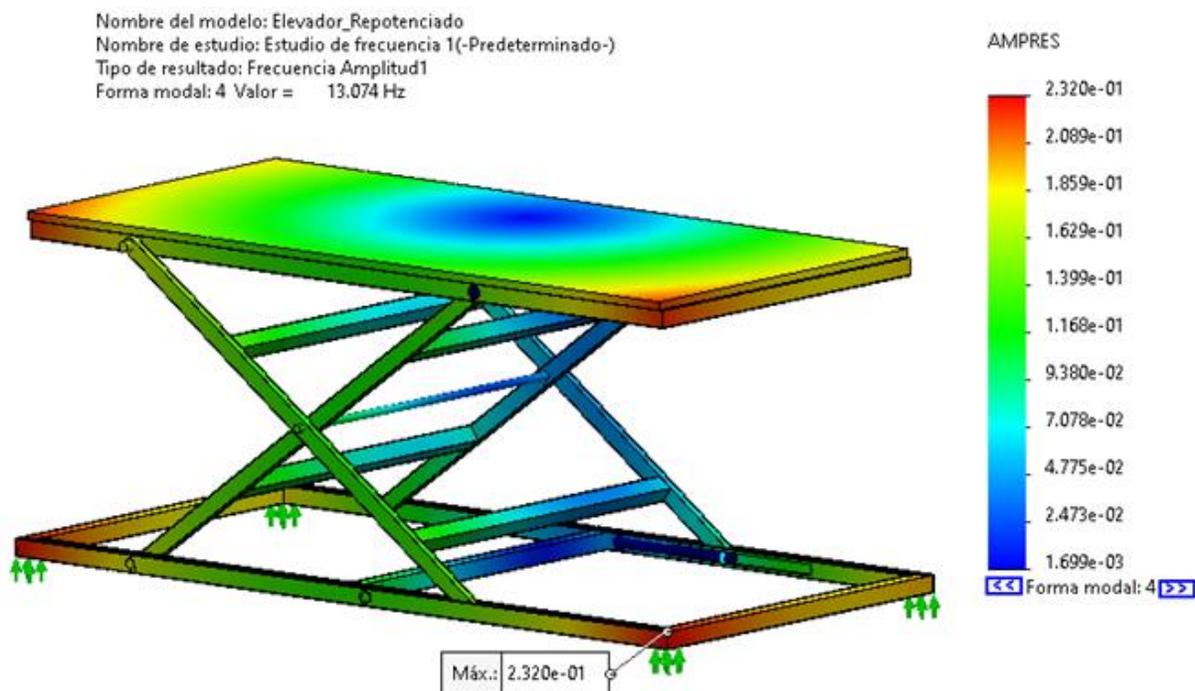
Como se puede ver en la Figura 24, la estructura no presenta ningún problema para soportar la carga máxima de 50kg, obteniendo una tensión máxima de 9.894 MPa. Al analizar la Figura 25 se puede notar que la deformación unitaria equivalente máxima que se genera es de 0.00018 cm/cm, inferior a la obtenida en la Figura 18. Finalmente, en la Figura 26 se obtiene un factor de seguridad de 10, el cual se encuentra dentro del rango permitido, lo que significa que ya no se encuentra sobredimensionada la estructura.

Análisis de Frecuencia. Se realizaron las simulaciones del mecanismo de tijeras repotenciado, verificando y analizando los cambios que presenta al aplicarle una frecuencia.

Hay que mencionar que se generó la simulación con una frecuencia similar a la frecuencia de la Figura 20.

Figura 27

Análisis de frecuencias del mecanismo de tijeras repotenciado con $f = 13.074\text{Hz}$



Como se puede ver en la Figura 27, la plataforma presenta una amplitud máxima de 0.232 frente a una frecuencia de 13.074 Hz en la parte superior (mesa de la plataforma) siendo

menor respecto a la obtenida en la Figura 20. Lo cual implica que es más segura para los movimientos de los Robots, ya que se reducen las vibraciones de la estructura.

Robot KERO

El robot que se integró al teatro se denomina KERO, el cual fue creado como un Kit Lúdico diseñado e implementado como herramienta de apoyo en el desarrollo de habilidades comunicativas no verbales de niños con TEA de niveles 1 y 2 entre 4 a 7 años.

Su apariencia es amigable para los niños y, gracias a los mecanismos de 2 y 3 grados de libertad en la cabeza y extremidades superiores, el robot logra realizar movimientos parecidos a los de un humano. El Kit Lúdico completo se puede ver en la Figura 28.

Figura 28

Kit Lúdico completo del Robot KERO



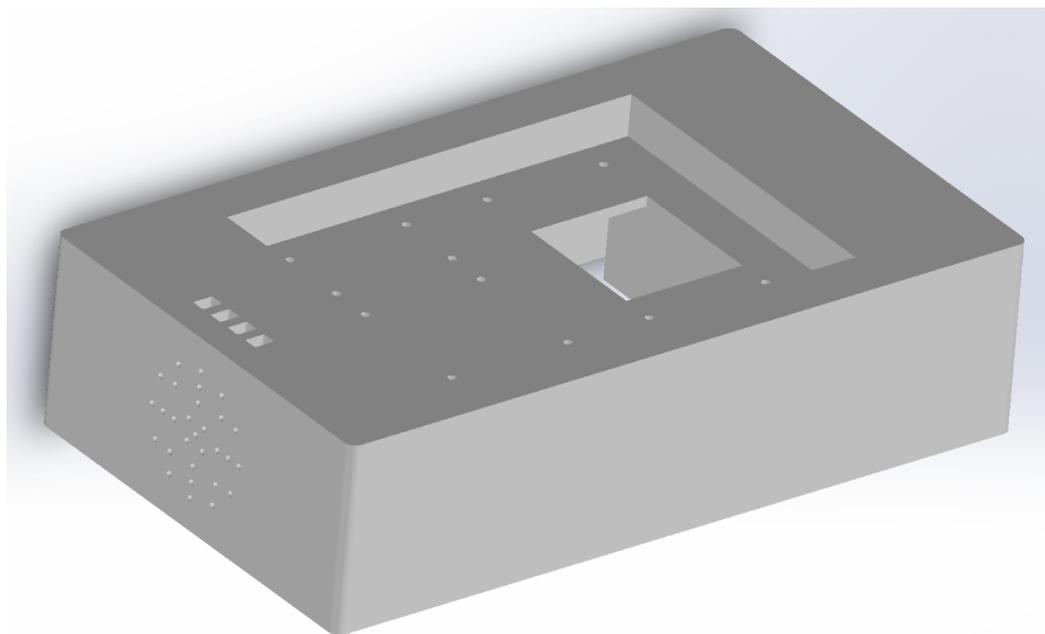
Nota. Tomado de KERO-Playable Robotic Platform to Contribute to Non-verbal Communication Teaching in Children with Autism Spectrum Disorder, por Miranda et al., 2021.

La función del Robot KERO dentro del tetro robótico es la del narrador, es por eso que fue necesario sacar al robot del Kit Lúdico. Para que no quede abierto en la parte inferior del robot se diseñó una nueva base en la cual se lo puede colocar y fijarlo en una parte dentro del escenario durante la obra.

Diseño de la base. Para diseñar la nueva base del robot se empleó el modelo la forma que tiene la base del Kit Lúdico, realizando los cambios correspondientes para incluir un parlante, las salidas para cargar las baterías lipo que alimentan al Robot KERO y los dos switches para encender/apagar los motores y la pantalla. El bosquejo del diseño para base se puede ver en la *Figura 29*.

Figura 29

Diseño final de la base para el robot KERO



Selección del material. Los materiales con los que fue construido el robot son PLA y acrílico, como se requiere mantener la estética del robot, el material para la nueva base debe ser alguno de esos materiales. La comparación para elegir cuál de los 2 es mejor, se indican en la Tabla 14.

Tabla 14

Selección del material para la base del Robot KERO

Especificaciones	PLA	Acrílico
Precio	3	5
Peso	5	5
Resistencia a la flexión	3	5
Elongación a la rotura	5	4

Nota. La escala de valoración de la tabla está representada con 5 como mejor opción y 0 como peor opción.

Por lo tanto, se seleccionó el acrílico para la base del Robot KERO debido a su precio en el mercado.

Diseño e implementación del sistema electrónico

Telón

El teatro robótico cuenta con un tablero de control el cual tiene conexión de 110 voltios para la alimentación de luces y cámara de humo, controlados mediante una ESP8266 la cual funciona con una fuente de 5VDC instalada dentro del tablero. El circuito de control del telón está integrado al sistema actual para encendido de luces y cámara de humo del teatro, se diseñará una nueva placa de control que integre los elementos antes mencionados.

En el diseño mecánico del telón se calcularon las RPM y la potencia teórica que necesita el motor del telón para la apertura y cierre en un tiempo de 15 segundos, el rendimiento del motor es de un 98% según datos del fabricante, con lo cual se puede calcular la potencia real.

$$N_e = \frac{\text{Potencia teórica}}{r} \quad (49)$$

$$P = \frac{10.36}{0.98} = 10.54[\text{Watts}] \quad (50)$$

Al necesitar 189RPM para el correcto funcionamiento el torque se calcula mediante la siguiente expresión.

$$T = \frac{10.54}{189} = 0.05[\text{Nm}] \quad (51)$$

El motor HC785LP-012 que se utiliza en el sistema del telón trabaja con una alimentación de 12VDC, debe ser acoplado a una caja reductora que disminuya su velocidad y aumente el torque de salida para la transmisión de movimiento. El microcontrolador que se usa es el Node MCU ESP32, el cual incluye conexión mediante TCP/IP necesarios para el control del teatro.

Para lograr la velocidad de 189RPM se implementó un PWM (Modulación por ancho de pulso) mediante el módulo “Monster moto Vnh2sp30” que complementa a la caja reductora acoplada al motor. El sistema del telón contiene guías que permiten un movimiento controlado, al inicio y final de las mismas se instalarán fines de carrera, que sirven como sensores de posición. Los fines de carrera son sensores de presión que tienen dos tipos de interruptores, un normalmente abierto y un normalmente cerrado, los cuales se utilizarán dependiendo de la aplicación.

El módulo que controla el motor es alimentado con 12VDC, por lo que es necesario una fuente que genere esa tensión, por eso se conectó todo el sistema mediante un cable AWG14 que permite la intensidad máxima de 25 A. El módulo acoplado al controlador permite cambiar el sentido de giro del motor y evitar corrientes pico en su arranque. Las especificaciones técnicas de los elementos empleados se detallan en la Tabla 15.

El módulo Node MCU ESP32 cuenta con 34GPIO programables para su conexión con los diferentes dispositivos que conforman el telón y el teatro, en la Tabla 16 se detalla la asignación de los pines a los elementos electrónicos que permiten el funcionamiento.

Tabla 15

Lista de elementos electrónicos empleados

Elemento	Especificaciones	Cant.	Gráfico
Motor HC785LP-012	<p>Diámetro del eje: 5mm</p> <p>Rango de voltaje de funcionamiento: 10 a 18V</p> <p>Corriente de vacío: 2.85A</p> <p>Velocidad de vacío: 20950RPM</p> <p>Temperaturas de trabajo: -10 a 60 °C</p>	1	
Node MCU ESP32	<p>Procesador principal: Tensilica Xtensa LX6 de 32 bits.</p> <p>Frecuencia de Clock: Programable, hasta 240MHz.</p> <p>SAR ADC de 12 bits hasta 18 canales</p> <p>34 x GPIO programables</p> <p>Tensión de alimentación: 3.8 a 5V</p>	1	
Monster moto Vnh2sp30	<p>Voltaje máximo de salida 16VDC</p> <p>Corriente máxima: 30^a</p> <p>Frecuencia de PWM: Programable, hasta 20kHz.</p> <p>Tensión de alimentación: 5v</p>	1	

Elemento	Especificaciones	Cant.	Gráfico
Fin de carrera	Voltaje máximo de entrada: 30VDC	2	
	Corriente máxima: 20A		
	Terminales: 3 (NC, NA y Común)		
	Tipo: Rodillo		
Fuente	Tensión Nominal: 5V Amperaje Nominal: 5A	1	

Nota. Datos tomados de las hojas técnicas de cada elemento.

Tabla 16

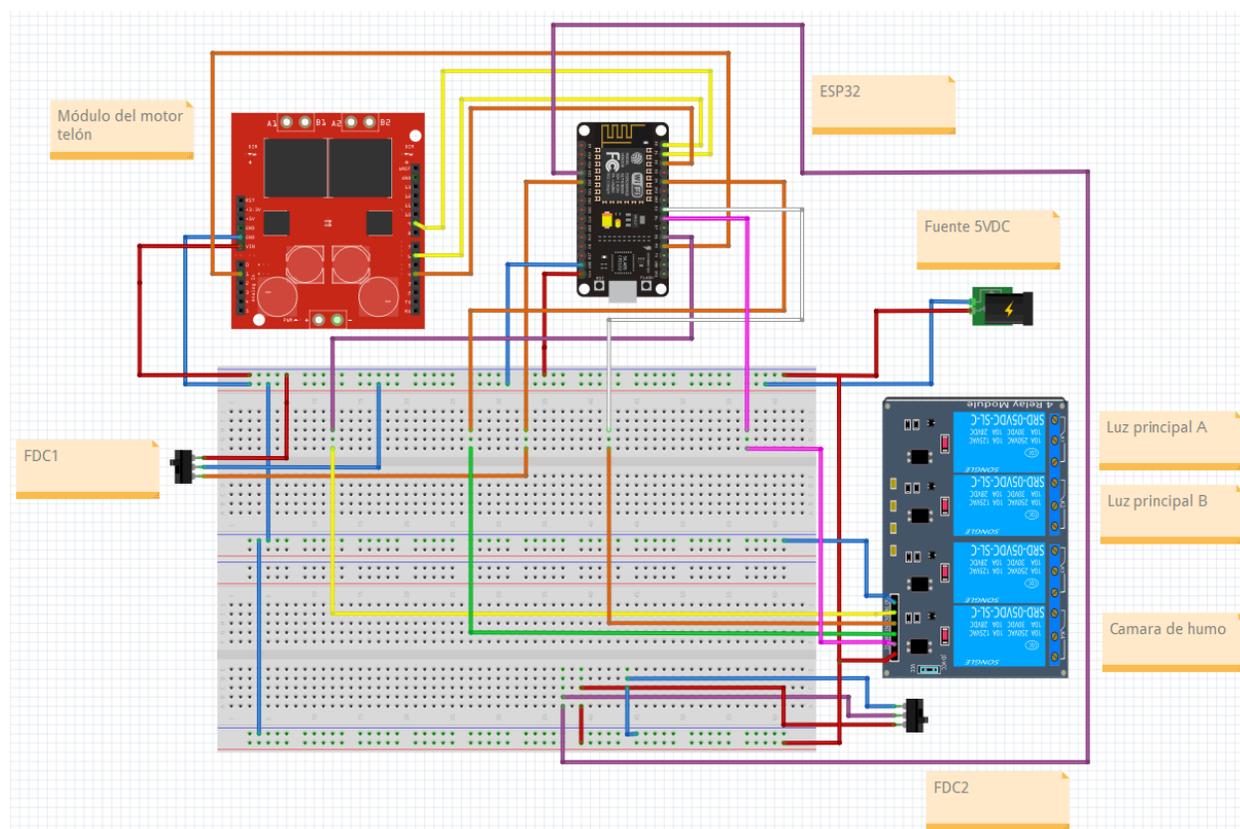
Detalle de comunicación pines ESP32

ESP32	GPIO	ELEMENTO	OBSERVACIÓN
D0	0	Motor	PWM 2
D1	1	Motor	A2
D2	2	Motor	B2
D4	4	Motor	EN
D5	5	Luz A	Relé
D6	6	Luz B	Relé
D7	7	Cámara de humo	Relé
D8	8	Fin de carrera	-
RX	3	Fin de carrera	-

Los diagramas de control y potencia del sistema de telón se muestran en la Figura 30. El relé de cuatro entradas en la derecha controla las luces y la máquina de humo que se encuentran en el teatro robótico, a la izquierda se encuentran los fines de carrera y el módulo driver del motor DC. Para evitar el uso de protoboard o galletas de soldadura se diseñó una placa PCB en Proteus para su simulación y posterior implementación en el teatro robótico, la PCB diseñada se puede ver en la Figura 32.

Figura 30

Diagrama esquemático de control y potencia del teatro robótico



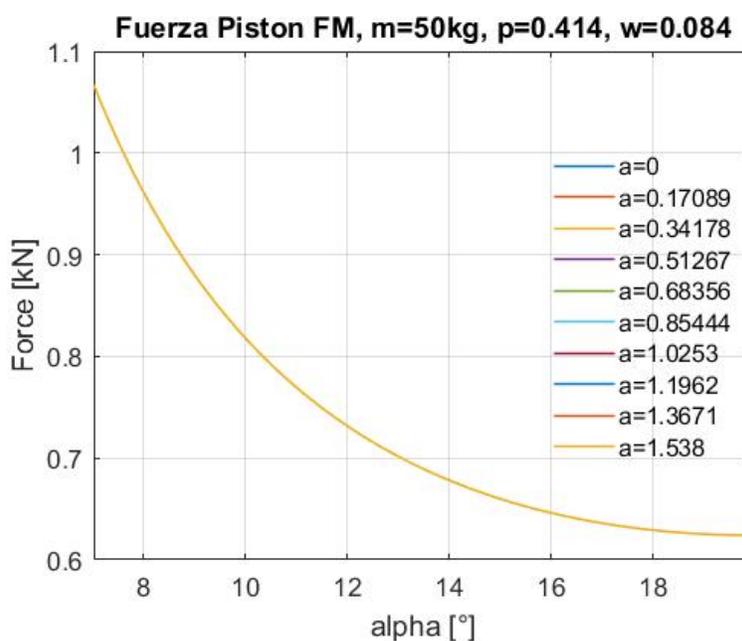
Plataforma de elevación repotenciada

La plataforma cuenta con un tablero de control, el cual tiene conexión de 110 voltios para su alimentación y la de los motores de los cilindros, los cuales están controlados mediante una ESP32 que funciona con una fuente de 5VDC, obtenidos con la ayuda de un regulador.

En el diseño mecánico se identificó la fórmula para la obtención de la fuerza necesaria para elevar la carga requerida, esta fuerza es entonces la que se necesita para elegir el pistón correspondiente. Para realizar la gráfica de la fuerza del pistón se emplea Matlab, se genera el código correspondiente, en el cual se introducen los valores que se detallan en la Tabla 17, obteniendo así la gráfica de la Fuerza del pistón (FM) en función del ángulo de inclinación (Alpha) que se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Gráfica de la fuerza del pistón



Nota. Teniendo en cuenta que Alpha es el ángulo de inclinación de las vigas y FM la fuerza necesaria para elevar la carga requerida.

Tabla 17

Definición de los valores de las variables para la fórmula de la fuerza del pistón

Nombre	Variable	Valor
Masa	m	50Kg
Longitud de la barra	L	1.71m
Longitud inferior de separación	p	0.414m
Longitud superior de separación	w	0.084m
Gravedad	g	9.81m/s

Es por eso que se emplean dos pistones electrónicos ECO-WORTHY, ya que son actuadores lineales muy resistentes relativamente económicos a comparación de los pistones hidráulicos o neumáticos. Estos pistones se utilizan en numerosos sectores, como el de la energía eléctrica, maquinaria, metalurgia, minería, industria petrolífera, química, transporte, maquinaria elevadora, construcción, procesamiento de alimentos y más. Los pistones electrónicos elegidos se pueden ver en la Figura 34 y las especificaciones de los mismos se detallan en la Tabla 18.

Figura 34

Actuadores lineales ECO-WORTHY



Nota. Tomado de Amazon, por ECO LLC, 2014.

Tabla 18

Especificaciones de los pistones electrónicos ECO-WORTHY

Características del Pistón ECO-WORTHY

Alimentación de 12V

Accionamiento lineal de alta resistencia

Capacidad de carga: 300lb

Tamaño: 10" (250mm)

Material: Aluminio

Nota. Tomado de Amazon, por ECO LLC, 2014.

Para el cambio del sentido de giro de los motores y lograr que la plataforma suba y baje se emplea el módulo "Monster moto Vnh2sp30". El microcontrolador con el que se trabajó es el módulo Node MCU ESP32, el cual incluye conexión mediante TCP/IP necesarios para el control de los motores de los pistones. El módulo que controla el motor de los pistones es alimentado con 12VDC, para lo cual es necesaria una fuente que genere esa tensión. Se conectó todo el sistema mediante un cable AWG14 que permite una intensidad máxima de 25A.

El regulador de voltaje que se empleó para la alimentación del microcontrolador es un Step-Down de 2A de 12V-5V. El sistema de la plataforma contiene rodamientos que permiten un movimiento controlado, se instaló un fin de carrera que servirá como sensor de posición para controlar la altura máxima a la que debe subir la plataforma. Las especificaciones de los elementos electrónicos se detallan en la Tabla 15.

El módulo Node MCU ESP32 cuenta con 34GPIO programables para su conexión con los motores de los pistones, en la Tabla 19 se detalla la asignación de los pines que permiten el funcionamiento.

Tabla 19

Asignación de los pines de la ESP32 para el funcionamiento de la plataforma

ESP32	GPIO	ELEMENTO	OBSERVACIÓN
D12	12	Motor Pistón	AIN1
D13	13	Motor Pistón	AIN2
VIN	VIN	Alimentación	5V
GND	GND	Tierra	GND

Los diagramas de control y potencia del sistema de la plataforma se muestran en la Figura 35. Para evitar el uso de protoboard o galletas de soldadura se diseñó una placa PCB en un software electrónico para su simulación y posterior implementación en el tablero de control de la plataforma.

Figura 35

Diagrama de control y potencia de la plataforma repotenciada

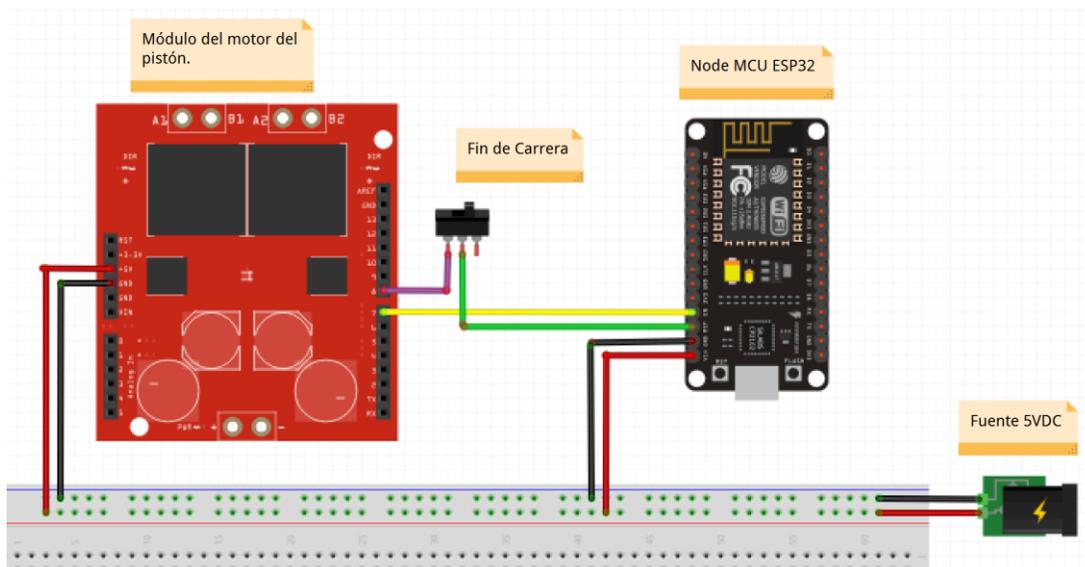
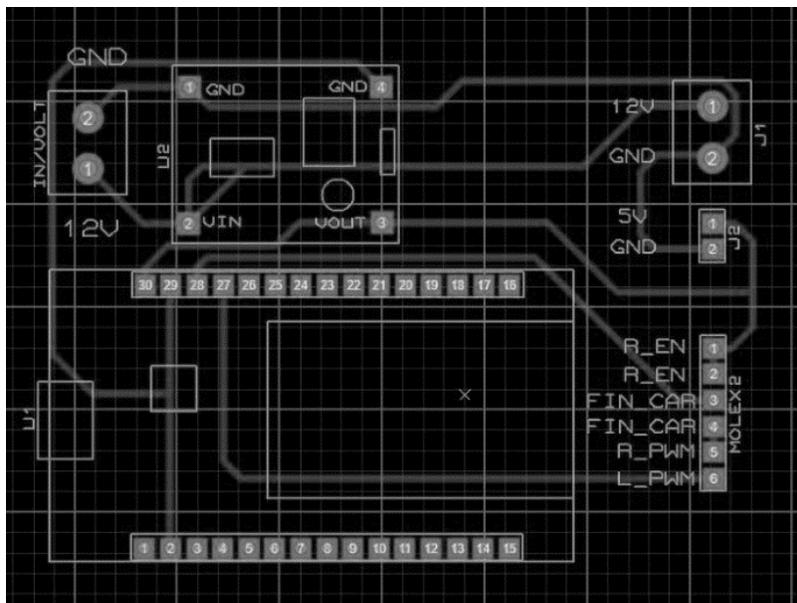


Figura 36

Diseño de la PCB para la plataforma repotenciada



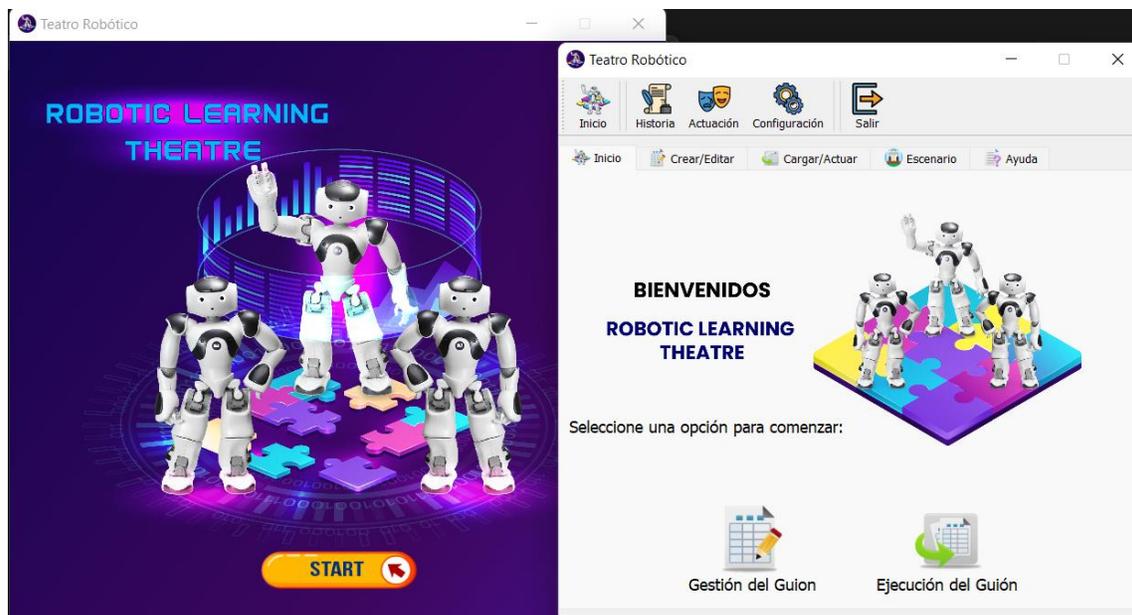
Robot KERO

El sistema eléctrico del robot KERO cuenta con una placa Raspberry para el control general, es inalámbrico, alimenta los diferentes dispositivos mediante dos baterías lipo de 7.4VDC y 2.2A. A la placa de control se conecta una pantalla LCD de 5 pulgadas y mediante el driver PCA9685 los 8 servos que sirven para el movimiento de la cabeza y las extremidades.

El voltaje de alimentación de la placa de control y del driver es de 5VDC, por lo que se utilizan reguladores de voltaje XL4015 para acondicionar las entradas de tensión de los dispositivos electrónicos. En la Figura 37 se muestra el diagrama del circuito electrónico del robot KERO.

Figura 38

Páginas principales de la HMI

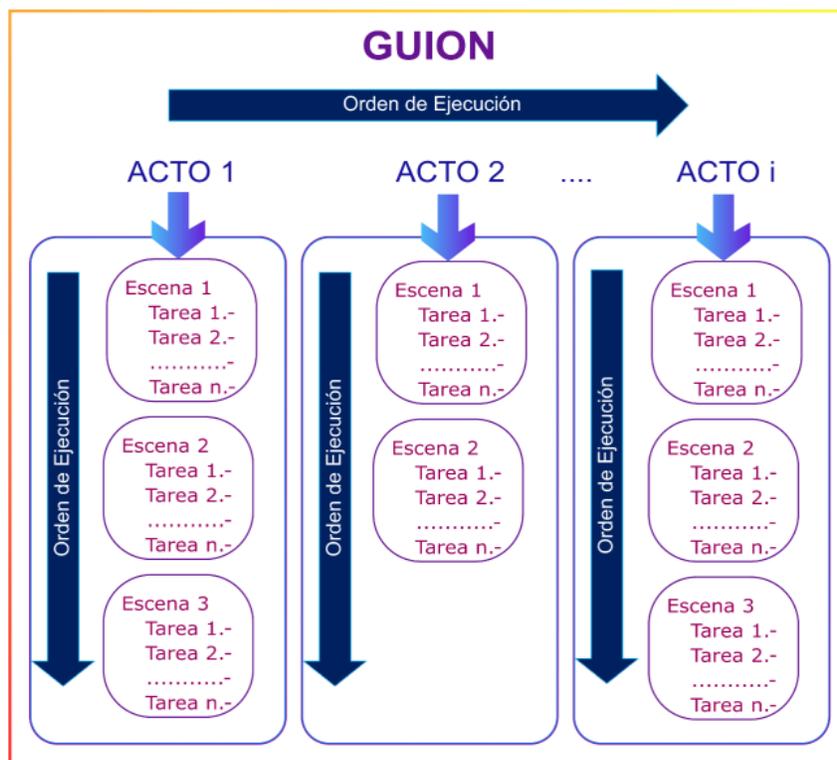


Para el funcionamiento de las obras teatrales se divide el guion en acciones, las cuales son representadas por un elemento del teatro a la vez o por más elementos según la narrativa. El guion se conforma de tareas, escenas y actos, interpretando así la estructura de una obra de teatro clásica. El orden de ejecución se realizará acto por acto, dentro de cada acto se ejecuta escena por escena y dentro de cada escena se ejecutan las tareas paralelamente (Tobar et al., 2021).

Las tareas son las acciones que realizan los diferentes elementos que componen el teatro robótico (Luces, Cámara de humo, Nao, KERO, Telón y plataforma). Las escenas están constituidas por una o más tareas que se ejecutarán por los actores en paralelo, es decir, cada escena ejecuta las tareas que se encuentran dentro de la misma. Los actos son conjuntos de escenas y se encargan de narrar e interpretar el guion, separándolo en historias específicas. En la Figura 39 se presenta la estructura del guion.

Figura 39

Estructura del guion del teatro robótico



Nota. Tomado de Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños, por Almeida & Balladares, 2021.

Telón

La HMI utiliza una red local para comunicarse con la ESP32 del sistema del telón mediante el protocolo MQTT en el laboratorio de instrumentación y sistemas dinámicos por medio de tópicos y un sistema de publicadores y suscriptores. La estructura MQTT del telón se la detalla en la Figura 40.

Para el control del telón en el modo automático, se agregó a la HMI en el escenario una función para programar la apertura y cierre del mecanismo. La nueva función envía a través de MQTT mediante un tópico específico el mensaje al módulo ESP32 el cual se encargará de

enviar las señales al driver del motor para su funcionamiento. En la Figura 41 se puede ver el control automático del telón en la HMI.

Figura 40

Estructura MQTT del telón

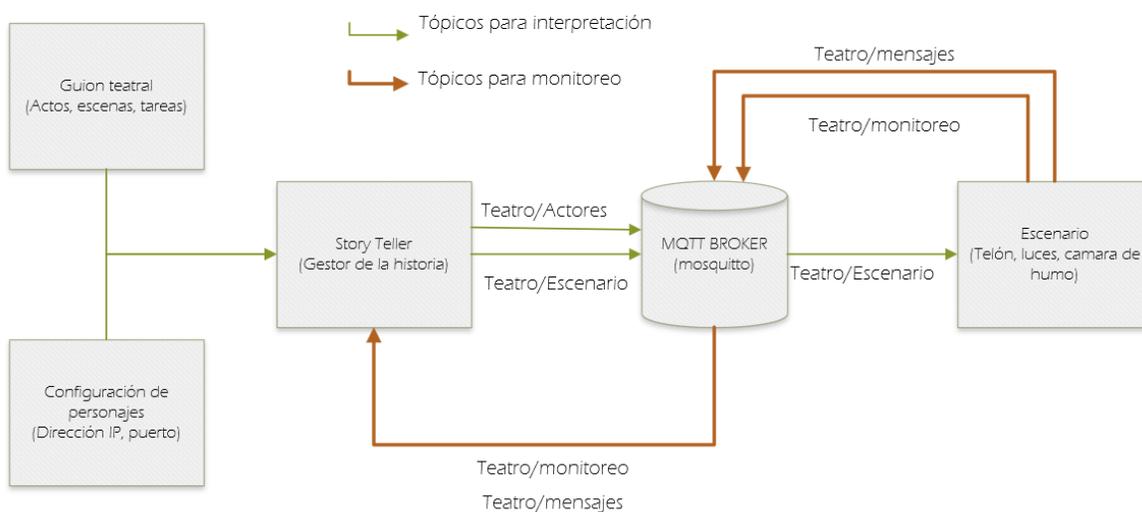


Figura 41

Control del telón mediante actos en la HMI

La interfaz de usuario 'Gestión de Actos' muestra un formulario para configurar un acto. El formulario contiene los siguientes campos:

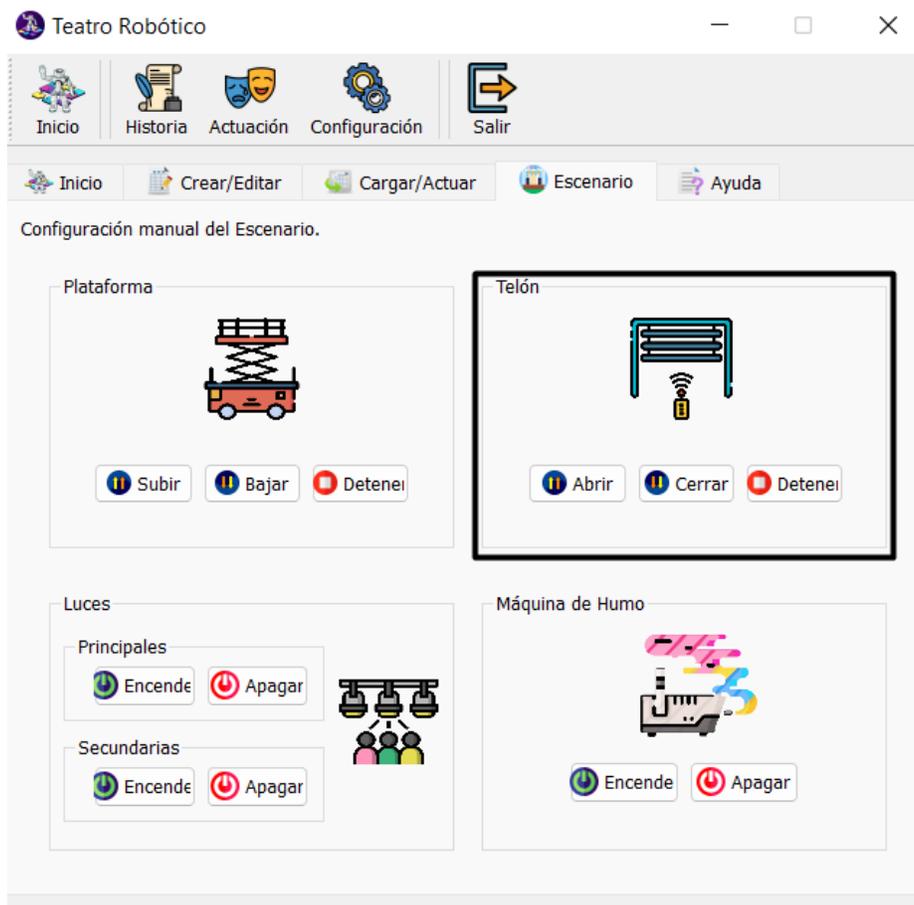
- Selección de personaje:** Un menú desplegable con 'Escenario' seleccionado.
- Selección de acción:** Un menú desplegable con 'Telón' seleccionado.
- Selección de acción:** Un menú desplegable con '---Seleccione una acción---' seleccionado, mostrando una lista de opciones: '---Seleccione una acción---', 'Abrir' y 'Cerrar'.
- Establezca el tiempo de duración de la #:** Un campo de entrada de texto con el valor '[s]'.

En la parte inferior del formulario, hay dos botones: 'Guardar Acto' y 'Cancelar'.

La HMI implementa un control manual de los diferentes sistemas audiovisuales (Luces y cámara de humo), para el telón se implementó la apertura, cierre y la detención del mecanismo. La comunicación de este subsistema con la ESP32 será por MQTT. En la Figura 42 se muestra el control manual del telón en la HMI.

Figura 42

Control del telón manual en la HMI



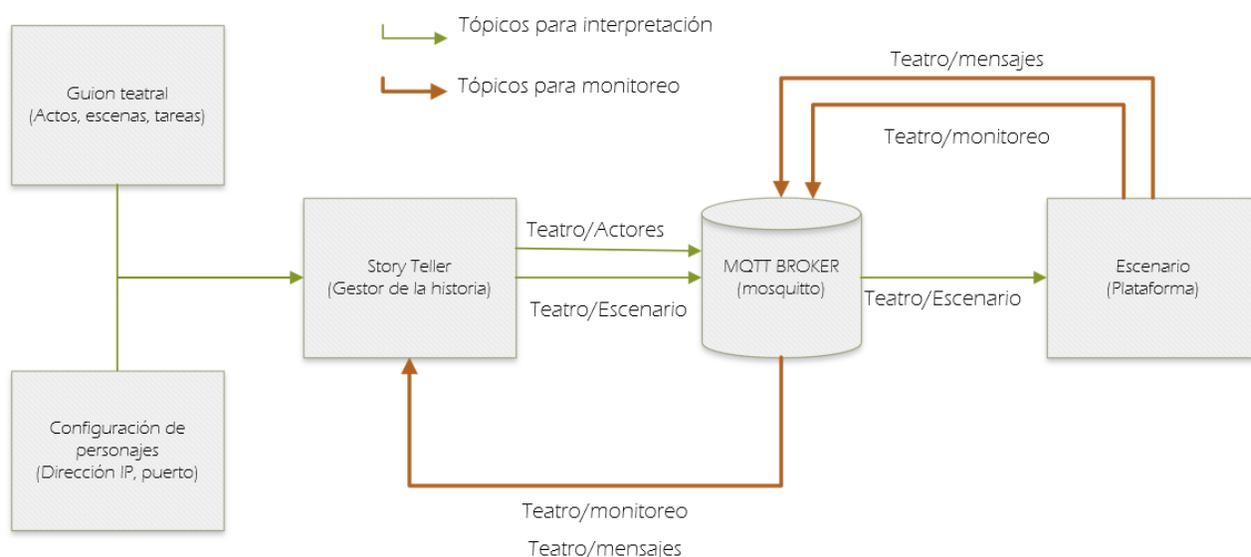
Plataforma de elevación

El sistema de control actual de la plataforma del teatro robótico comunica la HMI con un microcontrolador ESP8266 mediante el protocolo MQTT. El control de la plataforma repotenciada cambia el microcontrolador por uno más robusto el Node MCU ESP32, el cual se

conecta por el mismo protocolo MQTT al HMI del teatro robótico, utilizando los tópicos que se presentan en la Figura 43.

Figura 43

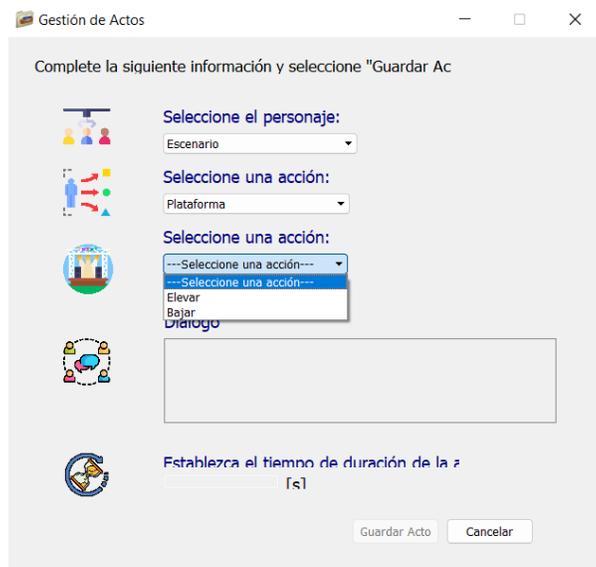
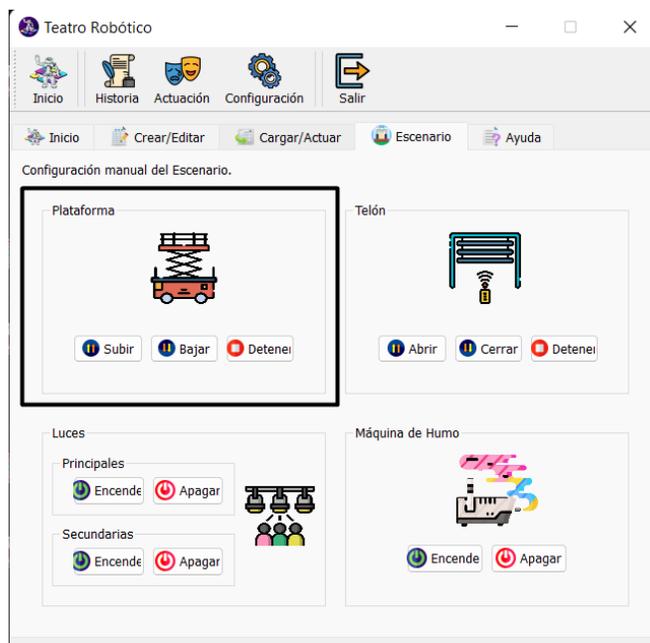
Estructura MQTT de la plataforma



El control de la plataforma automático por escenas permite elevar y bajar el mecanismo según el guion. La HMI envía mediante MQTT un mensaje específico a la esp32, que al recibirlo envía la señal al driver de los pistones para su activación en el sentido especificado.

La HMI realiza un control manual de la plataforma enviando un mensaje específico al microcontrolador del mecanismo mediante MQTT, permitiéndole al usuario subir, bajar o detener la plataforma en cualquier momento.

En la Figura 44 se muestra el control automático de la plataforma y en la Figura 45 se muestra el control manual de la plataforma en la HMI.

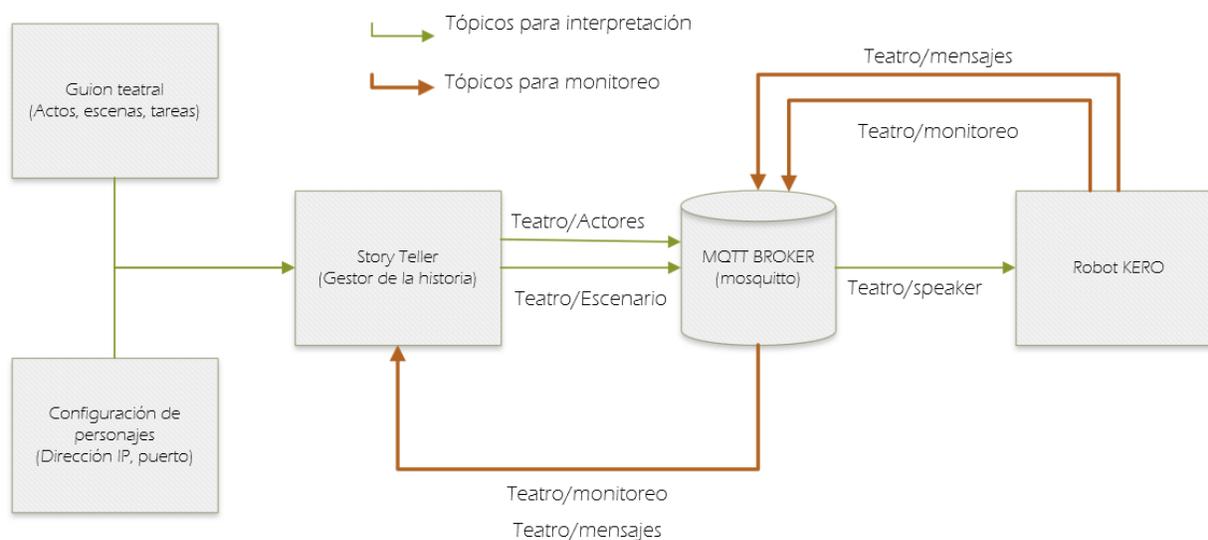
Figura 44*Control automático de la plataforma***Figura 45***Control manual de la plataforma*

Robot KERO

La HMI actual no cuenta con una programación específica para este tipo de robots, sin embargo, al ser reprogramable se modificó su interfaz para añadir las opciones necesarias para el funcionamiento del narrador mediante el protocolo MQTT. El robot KERO cuenta con una Raspberry pi como tarjeta de control, la cual es programable y permite la comunicación MQTT. Es por eso que se la programó para que se suscriba a los tópicos necesarios para el control del movimiento de brazos, cabeza y narración a través de la HMI. En la Figura 46 se muestra la estructura MQTT para el robot KERO.

Figura 46

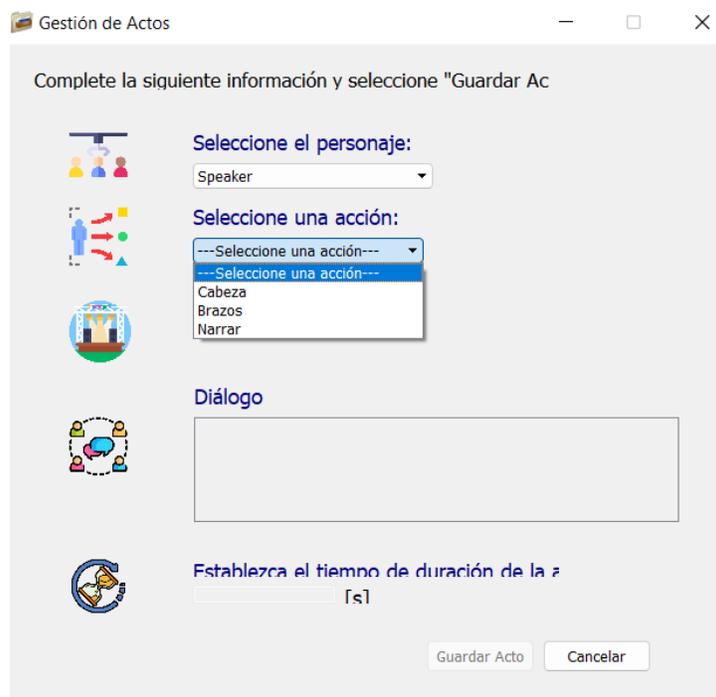
Estructura MQTT del robot KERO



Para el control automático del robot KERO se agregó a la HMI en la selección del personaje un nuevo ítem con el nombre de "Speaker" que permite realizar el movimiento de cabeza, manos y la narración de un texto específico, tal y como se indica en la Figura 47.

Figura 47

Control automático del robot KERO

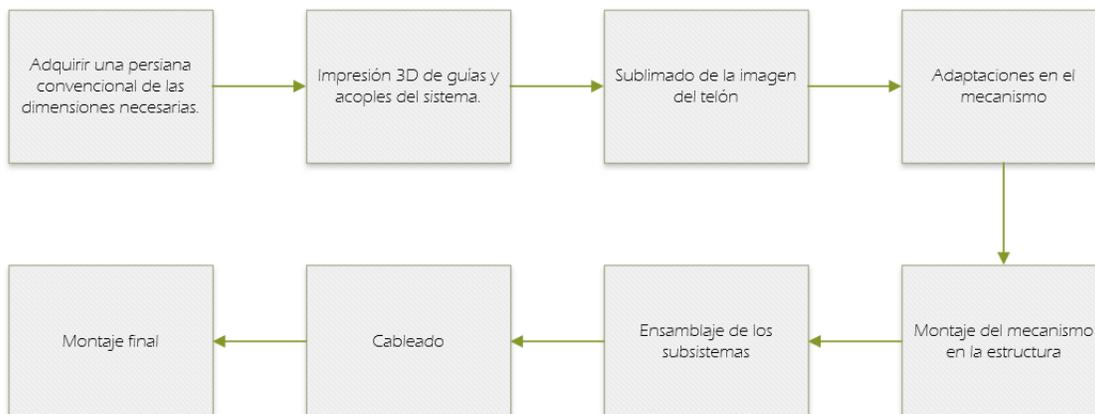


Construcción

Telón

Con base en el diseño mecánico, eléctrico y de control del telón realizado en las etapas anteriores para su implementación, es necesario la adaptación de un mecanismo convencional de persianas, se requiere la impresión 3D para algunos elementos del sistema como las guías y acoples de las ruedas conducida y conductora.

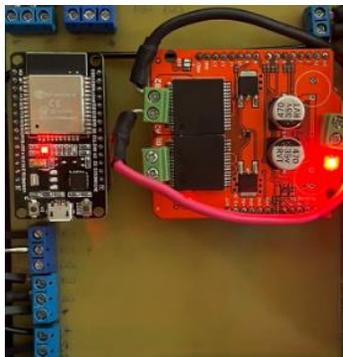
Es por eso que se necesita identificar el proceso o lista de pasos que se deben realizar para la construcción del telón y de esa forma evitar problemas de funcionamiento mecánico o electrónico. Dicho proceso se encuentra detallado en la Figura 48. Las evidencias de la construcción del telón y la elaboración de la PCB se muestran en la Figura 49 y Figura 50.

Figura 48*Proceso de construcción del telón***Figura 49***Imágenes de la construcción del telón*

Nota. (a) Ensamble en el teatro robótico, (b) Guías, (c) Impresión 3d, (d) Acople y rueda dentada.

Figura 50

Imagen de la PCB del circuito



Plataforma

Con base en el diseño mecánico, eléctrico y de control para la repotenciación de la plataforma especificado en las etapas anteriores para la realizar las modificaciones correspondientes es necesario seguir una serie de pasos que se detallan en la Figura 51. Las evidencias de las modificaciones realizadas en la plataforma se muestran en la Figura 52 y Figura 53.

Figura 51

Proceso de repotenciación de la plataforma

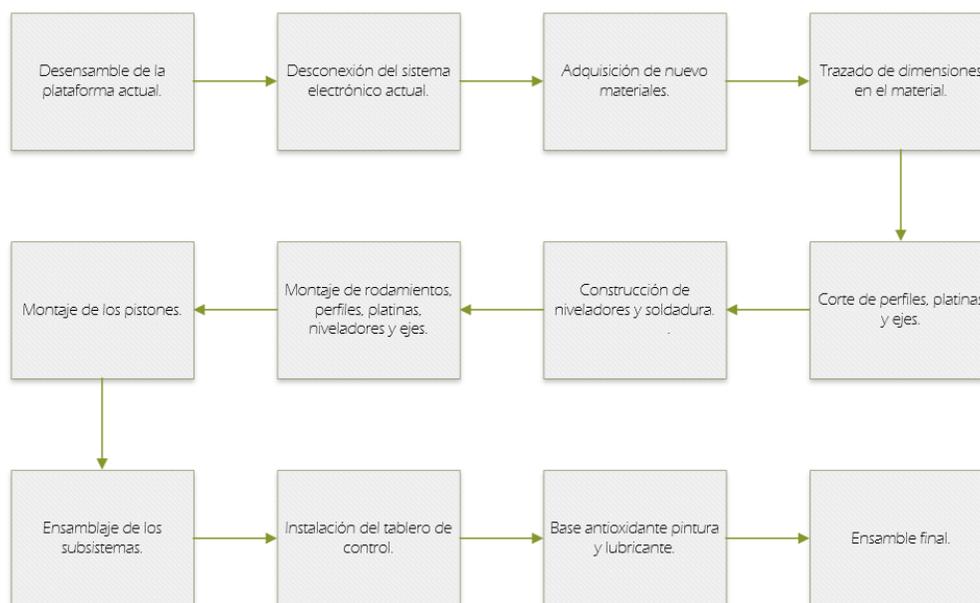
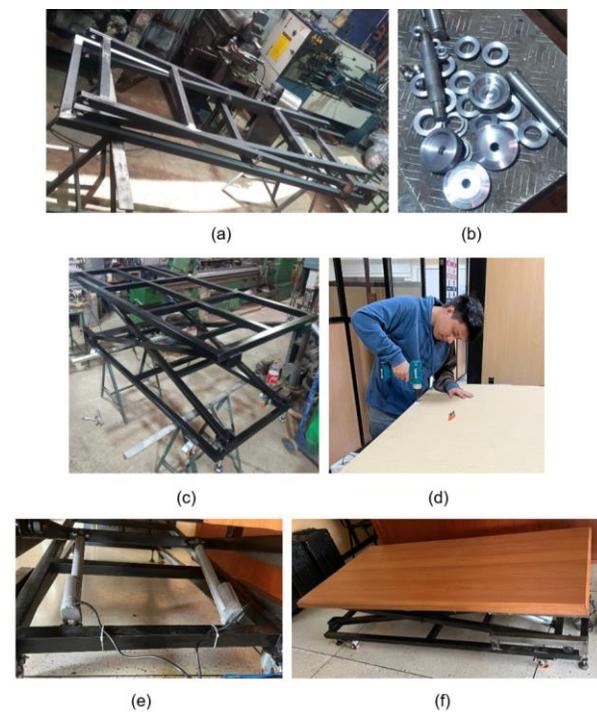


Figura 52

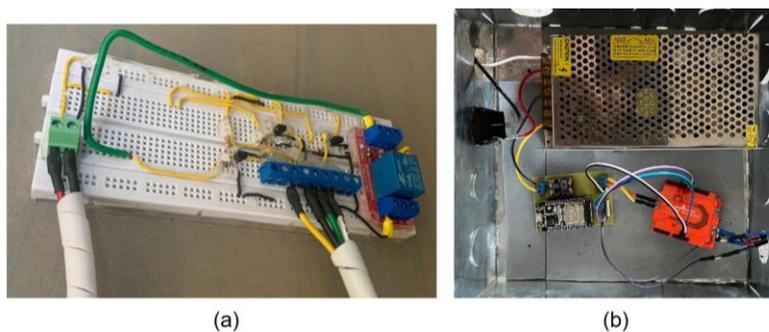
Imágenes de la repotenciación de la plataforma



Nota. (a) Desmontaje de plataforma. (b) Adquisición de los materiales. (c) Montaje de los perfiles, niveladores, platinas y ejes. (d) Ensamble de los subsistemas. (e) Montaje de los pistones. (f) Ensamble final de la plataforma.

Figura 53

Imágenes del sistema electrónico de la plataforma



Nota. (a) Protoboard plataforma anterior. (b) Tablero de control de la plataforma repotenciada.

KERO

Con base en el diseño mecánico, eléctrico y de control del KERO realizado en las etapas anteriores para su implementación, es necesario realizar el proceso de construcción que se indica en la Figura 54. Las evidencias se muestran en la Figura 55.

Figura 54

Proceso de construcción del KERO

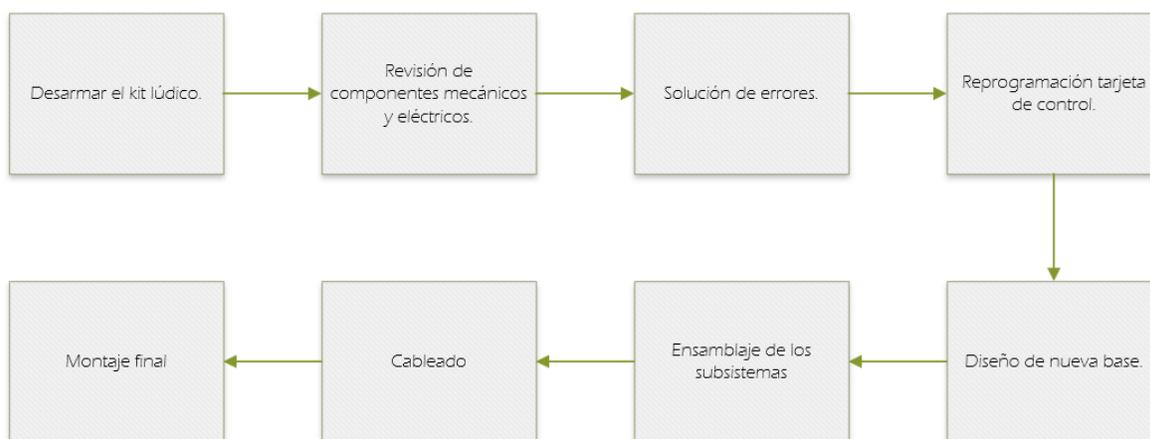
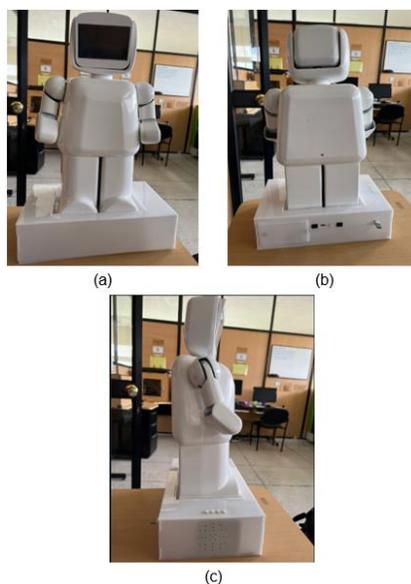


Figura 55

Imágenes de la construcción del KERO



Nota. (a) Ensamble vista frontal, (b) Ensamble vista posterior, (c) Ensamble vista lateral.

Diseño e implementación del servidor en la nube

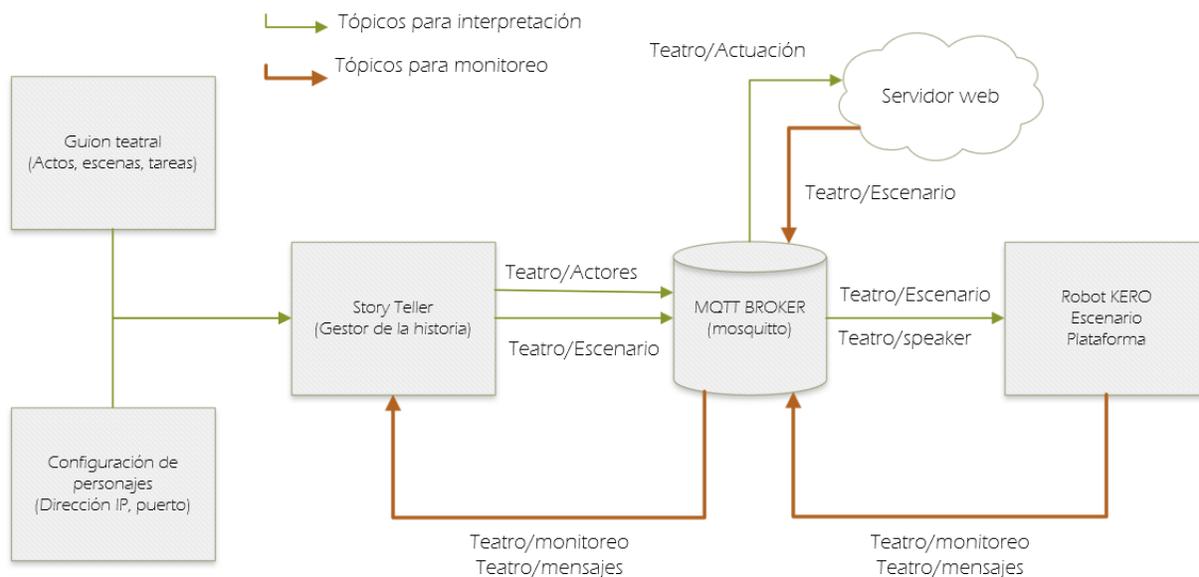
Se desarrolló una interfaz web que cumple con las siguientes funciones:

- Conectarse mediante el protocolo MQTT con la HMI del teatro robótico y presentar los datos de interés a través del protocolo HTTP, garantizando así su acceso desde cualquier dispositivo con conexión a internet.
- Permitir al usuario monitorear los elementos del teatro que están en línea con la HMI, el acto y el actor en tiempo real.
- Permitir al usuario el control de los diferentes elementos del teatro en tiempo real.

La interfaz web cuenta con una ventana de monitoreo y una de control conectadas con la HMI mediante el protocolo MQTT alojada en el dominio <https://teatorrobotico.social/index.html>. En la Figura 56 se muestra la estructura MQTT del servidor web creado.

Figura 56

Estructura MQTT del servidor web



La ventana de monitoreo se encarga de mostrar en tiempo real los integrantes del teatro que están en la obra, el actor que está ejecutando el guion y su acción correspondiente, también contiene un botón que redirecciona a la ventana de control. El esquema de la ventana de monitoreo del servidor web se detallan en la Figura 57 y la Figura 58.

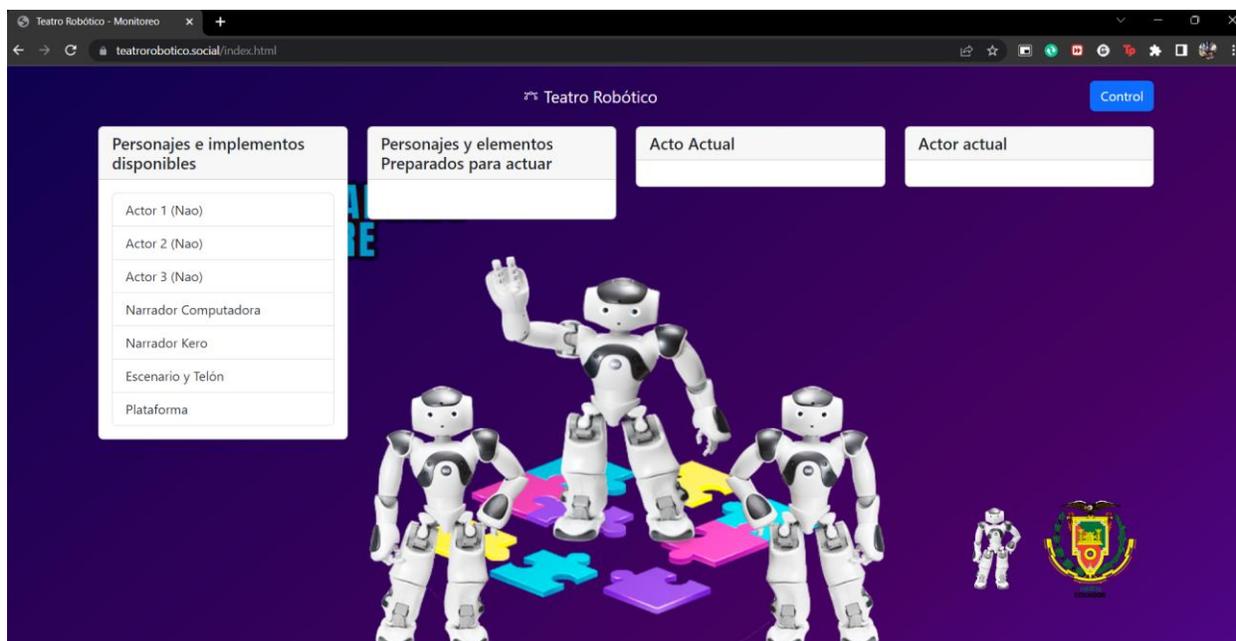
Figura 57

Esquema de la ventana de monitoreo del servidor web



Figura 58

Ventana de monitoreo del servidor web



La ventana de control permite al usuario modificar los estados de los diferentes dispositivos que integran el teatro (Luces, telón, máquina de humo y plataforma). Contiene un botón que redirecciona a la ventana de monitoreo. El esquema de la ventana de control del servidor web se detallan en la Figura 59 y la Figura 60.

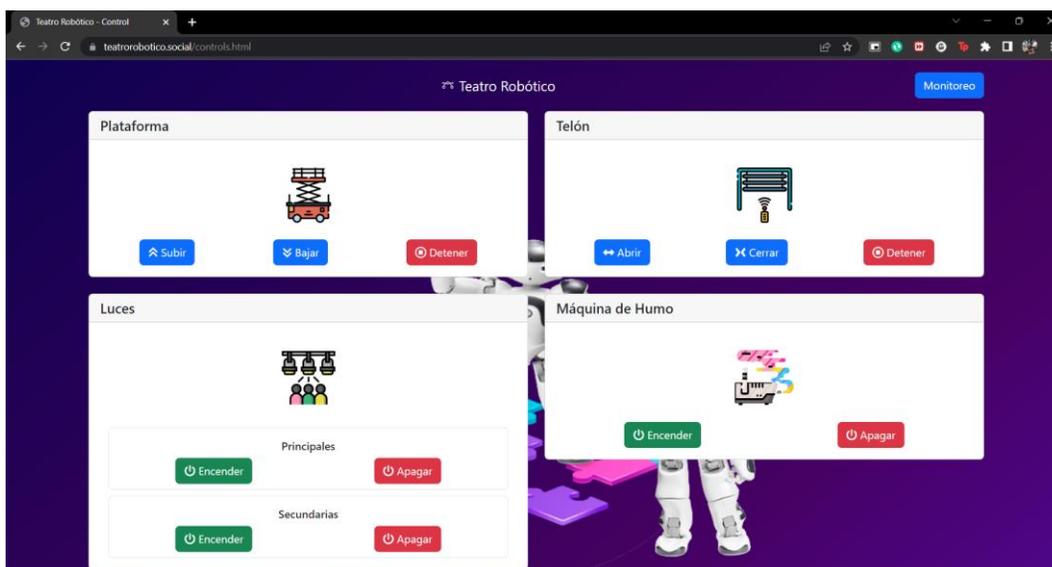
Figura 59

Esquema de la ventana de control del servidor web



Figura 60

Ventana de control del servidor web



Conclusión del capítulo 3

En el capítulo 3 se implementó el modelo V de norma VDI 2206 que contiene la “Metodología de diseño y desarrollo de productos” para la integración de los nuevos elementos al teatro robótico (Gausemeier & Moehringer, 2002). El desarrollo de las etapas propuestas en esta metodología: Planeación, Desarrollo del concepto, Diseño a nivel sistema, Diseño a nivel detalle, Pruebas y refinamiento y construcción, permitieron el diseño e implementación de los sistemas mecánicos, eléctricos y de control del telón, la plataforma, el robot narrador KERO y el servidor en la nube en un solo proyecto IOT.

Para cada elemento, sus componentes mecánicos y eléctricos se dimensionaron de tal forma que se genere un correcto funcionamiento e integración en la estructura actual del escenario robótico. Para la repotenciación de la plataforma se realizaron cambios estructurales y de control a partir del análisis de esfuerzos, factor de seguridad y vibraciones realizados mediante un software de simulación.

Se diseñó e implementó un servidor web mediante el protocolo MQTT, en la que se realizó el envío y recepción de datos desde la HMI a un dominio específico para el control y monitoreo de las acciones de los elementos que componen el teatro robótico heterogéneo.

Capítulo IV

Validación y Análisis de Resultados

En este capítulo se detallarán las validaciones y resultados obtenidos durante la elaboración del proyecto.

Validaciones previas

En proyectos anteriores se realizaron análisis estadísticos mediante encuestas para la validación de la herramienta tecnológica. Las encuestas fueron enfocadas a tres grupos con diferentes especialidades y experiencias. El primer grupo conformado por ingenieros de la universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE con experiencia en tecnologías de asistencia social, el segundo grupo por ingenieros de la universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE sin experiencia en tecnologías de asistencia social, y el tercer grupo por neuropsicólogos especialistas en trastornos de desarrollo infantil, para un total de 10 encuestados.

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 (Almeida & Balladares, 2021).

Para que los evaluadores tengan un mejor conocimiento del funcionamiento del teatro robótico se realizaron presentaciones virtuales y presenciales, se hizo una demostración de la forma de programar la HMI y se mostraron los diferentes elementos que conformaban el teatro y sus capacidades. Posterior a esto se realizaron las encuestas con el fin de evaluar la funcionalidad, flexibilidad, facilidad de programación y la capacidad de utilizar el teatro y sus obras para enseñanza y terapia.

Los resultados obtenidos en las encuestas fueron muy favorables para el teatro robótico. Según la mayoría de encuestados, esta herramienta tecnológica es innovadora y de gran impacto, la HMI es amigable con el usuario, fácil de entender y consideran que el sistema

en su conjunto es funcional y que sirve como herramienta de aprendizaje y terapia (Almeida & Balladares, 2021).

Validación del teatro robótico heterogéneo como herramienta de terapia

El teatro robótico en su conjunto está diseñado como un instrumento tecnológico de apoyo en la educación y como una herramienta de asistencia para la terapia. Para poder validar que puede ser una herramienta de terapia se realizó una encuesta a 3 psicopedagogos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Para que los evaluadores tengan un mejor conocimiento del funcionamiento del teatro robótico se elaboró un guion corto, en el cual los robots iniciaban con una breve introducción y explicación del propósito que tiene el teatro robótico heterogéneo, seguido de esto se presentó una corta obra enfocada al Trastorno del Espectro Autista (TEA). Por sugerencia de los evaluadores se realizó un guion en ese momento para comprobar la versatilidad del teatro. Posterior a esto se realizaron las encuestas con el fin de evaluar la funcionalidad y capacidad de utilizar las obras del teatro para terapia. Las preguntas realizadas se enlistan en la Tabla 20.

Tabla 20

Lista de las preguntas de la encuesta realizada

N°	Pregunta
1	¿Considera usted que el teatro robótico heterogéneo es llamativo y despierta el interés de la audiencia?
2	¿Considera usted que el teatro heterogéneo es funcional y apto para ser una herramienta de terapia?
3	¿Considera usted que es fácil entender lo que dice el narrador del teatro (robot KERO)?
4	¿Considera usted que el tiempo de funcionamiento del telón y la plataforma puede desviar la concentración de la audiencia?
5	¿Considera usted que el ruido generado por los motores es tolerable?

La ponderación de cada pregunta va del 1 al 4 en base a la escala "Likert" que se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21

Escala de ponderación de "Likert"

Descripción	Valor
Muy en desacuerdo	1
Algo en desacuerdo	2
Algo de acuerdo	3
Muy de acuerdo	4

Resultados

Los resultados obtenidos en las encuestas se detallan en la *Tabla 22*.

Tabla 22

Resultados obtenidos de las encuestas

N°	Muy en desacuerdo	Algo en desacuerdo	Algo de acuerdo	Muy de acuerdo
1	-	-	1	2
2	-	-	1	2
3	-	-	3	-
4	-	2	1	-
5	-	-	2	1

A partir de la información obtenida se procedió a realizar un análisis estadístico y la tabulación respectiva para cada una de las preguntas.

Pregunta 1: ¿Considera usted que el teatro robótico heterogéneo es llamativo y despierta el interés de la audiencia?

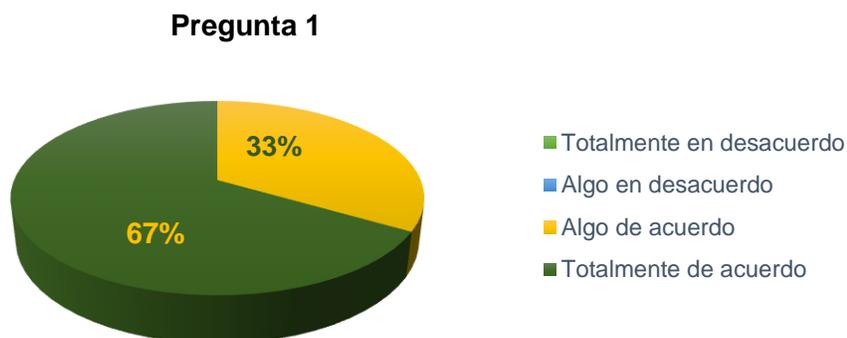
Tabla 23

Resultados de la pregunta 1

Opciones	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Algo en desacuerdo	0	0%
Algo de acuerdo	1	33%
Totalmente de acuerdo	2	67%
Total	3	100%

Figura 61

Gráfica estadística de la pregunta 1



De las 3 personas encuestadas, el 67% están totalmente de acuerdo con que el teatro es llamativo y despierta el interés de la audiencia y el 33% están algo de acuerdo con este aspecto. Concluyendo entonces que la apariencia del teatro es muy buena y atractiva para los espectadores.

Pregunta 2: ¿Considera usted que el teatro heterogéneo es funcional y apto para ser una herramienta de terapia?

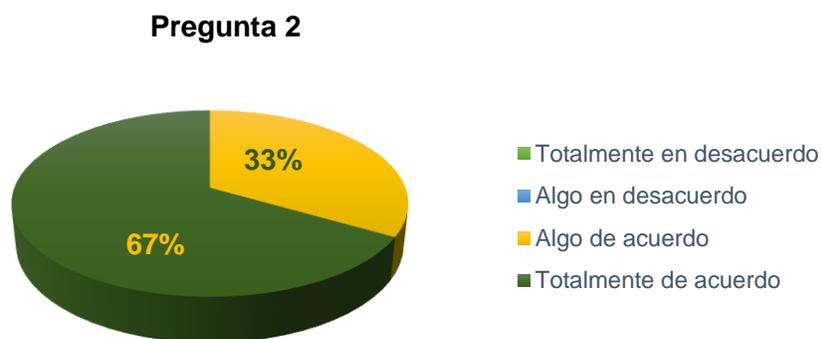
Tabla 24

Resultados de la pregunta 2

Opciones	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Algo en desacuerdo	0	0%
Algo de acuerdo	1	33%
Totalmente de acuerdo	2	67%
Total	3	100%

Figura 62

Gráfica estadística de la pregunta 2



De las 3 personas encuestadas, el 67% están totalmente de acuerdo con que el teatro es funcional y apto para ser una herramienta de terapia. Y el 33% están algo de acuerdo con este aspecto. Concluyendo entonces que el teatro robótico heterogéneo es funcional y sí puede ser considerado una herramienta para terapia, teniendo en cuenta que siempre se trabaje en conjunto con un profesional o especialista que sepa del tema que se requiera tratar.

Pregunta 3: ¿Considera usted que es fácil entender lo que dice el narrador del teatro (robot KERO)?

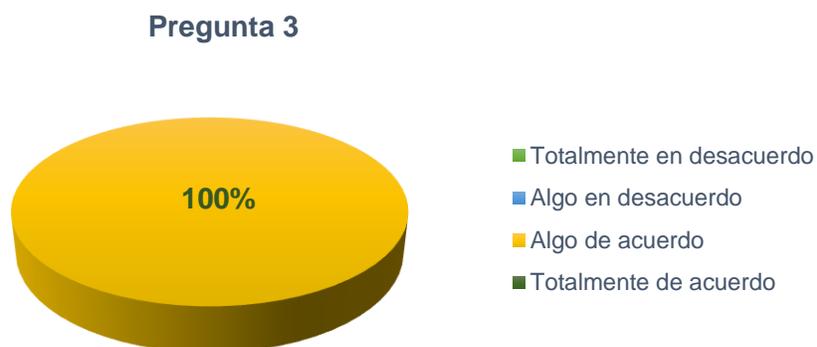
Tabla 25

Resultados de la pregunta 3

Opciones	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Algo en desacuerdo	0	0%
Algo de acuerdo	3	100%
Totalmente de acuerdo	0	0%
Total	3	100%

Figura 63

Gráfica estadística de la pregunta 3



El 100% de los encuestados están algo de acuerdo en que se entiende lo que dice el robot KERO durante la obra de teatro. Es un buen resultado, pero se concluye que se necesita mejorar un poco la voz del robot.

Pregunta 4: ¿Considera usted que el tiempo de funcionamiento del telón y la plataforma puede desviar la concentración de la audiencia?

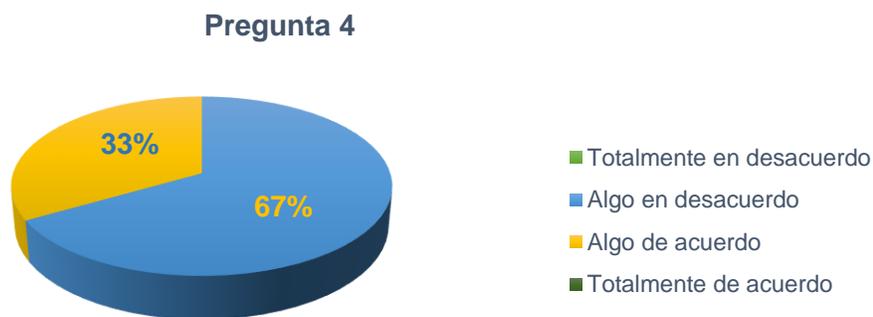
Tabla 26

Resultados de la pregunta 4

Opciones	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Algo en desacuerdo	2	67%
Algo de acuerdo	1	33%
Totalmente de acuerdo	0	0%
Total	3	100%

Figura 64

Gráfica estadística de la pregunta 4



De las 3 personas encuestadas, el 67% están en desacuerdo con que el tiempo de funcionamiento del telón y la plataforma desvíe la atención de la audiencia. Y el 33% están algo de acuerdo con este aspecto. Por lo cual, se puede concluir que al subir y bajar el telón o la plataforma los espectadores no se aburrirán ni perderán el interés en la presentación del teatro.

Pregunta 5: ¿Considera usted que el ruido generado por los motores es tolerable?

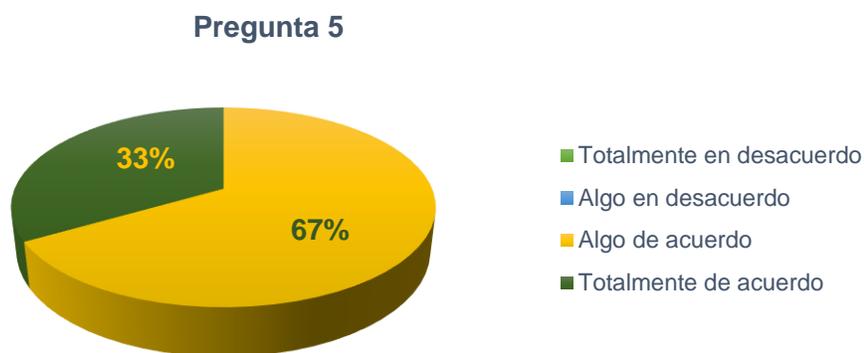
Tabla 27

Resultados de la pregunta 5

Opciones	Frecuencia	Porcentaje
Totalmente en desacuerdo	0	0%
Algo en desacuerdo	0	0%
Algo de acuerdo	2	67%
Totalmente de acuerdo	1	33%
Total	3	100%

Figura 65

Gráfica estadística de la pregunta 5



De las 3 personas encuestadas, el 67% están algo de acuerdo con que el ruido de los motores es tolerable, el 33% están totalmente de acuerdo con este aspecto. Esto quiere decir que el ruido de los motores no afecta en la presentación del teatro, pero es prudente intentar reducir este ruido debido a que es un factor que en ciertos casos de autismo puede llegar a desviar su atención.

Evaluación de la herramienta tecnológica

Telón

Para asegurar el correcto funcionamiento del telón mecatrónico se elaboraron pruebas que ayudan a identificar el tiempo de subida y el tiempo de bajada aproximado del mismo, ya que no solo se necesita que abra y cierre sin problemas, sino que también es necesario que no le tome mucho tiempo en ejecutar las acciones para que los espectadores del teatro no se aburran esperando a que se abra el telón. En la Tabla 28 se indican los resultados obtenidos en las pruebas. Se tiene entonces que el telón se demora en subir un aproximado de 23 segundos y se demora en bajar un aproximado de 21 segundos. Otro factor importante es el ruido que genera el mecanismo al momento en el que se abre o se cierra el telón. En el caso del telón implementado, al ser un sistema que funciona por medio del accionamiento de un motor, existe un ruido mientras está encendido el motor, pero es relativamente aceptable.

Tabla 28

Pruebas del tiempo de subida y tiempo de bajada del telón

Prueba	Tiempo Bajada (s)	Tiempo Subida (s)
1	20.77	23.28
2	20.63	23.95
3	19.27	22.87
4	19.66	22.75
5	19.97	23.15
6	20.53	23.45
7	20.01	23.18
8	19.71	23.12
9	20.15	22.96
10	20.53	23.64

Plataforma de elevación

Para asegurar el correcto funcionamiento de la plataforma con la ayuda de pruebas se identificó el tiempo de subida y el tiempo de bajada aproximado del mismo, debido a que al igual que con el telón, no solo se necesita que suba y baje sin problemas, sino que también es necesario que no le tome mucho tiempo en ejecutar las acciones, todo con el fin de no ser aburrido para los espectadores el tener que estar esperando a que suban los robots. En la Tabla 29 se indican los resultados obtenidos en las pruebas. Se tiene que la plataforma se demora en subir un aproximado de 31 segundos y se demora en bajar un aproximado de 24 segundos. Con respecto al ruido que genera el mecanismo, al momento en el que se sube o baja la plataforma, al ser un sistema que funciona por medio del accionamiento del motor de los pistones existe un ruido, mientras están encendidos los motores, este ruido es un poco más fuerte al del telón, pero de igual forma es relativamente aceptable.

Tabla 29

Pruebas del tiempo de subida y tiempo de bajada de la plataforma

Prueba	Tiempo Bajada (s)	Tiempo Subida (s)
1	23.05	30.31
2	23.41	30.81
3	23.03	30.63
4	23.43	30.45
5	23.1	30.5
6	22.96	30.7
7	22.87	30.25
8	23.35	30.17
9	23.43	30.45
10	23.38	30.53

Para verificar que la plataforma repotenciada no presenta problemas de vibración se creó una serie de rutinas de movimientos con los robots Nao haciendo que caminen de forma vertical y horizontal encima de la plataforma. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30

Pruebas de movimientos de los Robots Nao encima de la plataforma de elevación

Prueba	Movimiento Vertical	Movimiento Horizontal	Observaciones
1	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
2	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
3	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
4	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
5	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
6	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
7	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
8	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
9	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente
10	Exitoso	Exitoso	Funciona correctamente

Con estas pruebas queda comprobado que la plataforma soporta los movimientos de los robots Nao, analizando el movimiento más brusco de los robots “Caminar”. Las evidencias de la prueba realizada se muestran en la Figura 66.

Figura 66

Pruebas de los robots Nao caminando encima de la plataforma.



Las especificaciones técnicas de la plataforma están detalladas en la Tabla 31.

Tabla 31

Especificaciones técnicas de la plataforma

Parámetro	Descripción
Carga máxima	50kg
Altura máxima	98 cm
Tiempo de subida	31s
Tiempo de bajada	24s
	Estructura: Acero de transmisión
Materiales	Niveladores: Acero Galvanizado
	Mesa: Madera
Ruido pistones	50DB

Robot KERO

Para validar el funcionamiento del narrador KERO se programaron rutinas de movimientos y narrativas en la HMI del teatro robótico, posterior a esto se enviaron las rutinas al robot mediante el protocolo MQTT con el fin de comprobar su funcionamiento. En la Tabla 32 se presentan los resultados de las pruebas y en la Figura 67 se muestra la rutina creada para la validación.

Estas pruebas de funcionamiento se realizaron en un lapso de 90 minutos, al cabo del mismo se empieza a notar en la pantalla el desgaste de la batería de la Raspberry pi, por lo tanto, una hora y media es el tiempo de autonomía del robot bajo una carga completa. El funcionamiento correcto del narrador depende también de la congestión de la red.

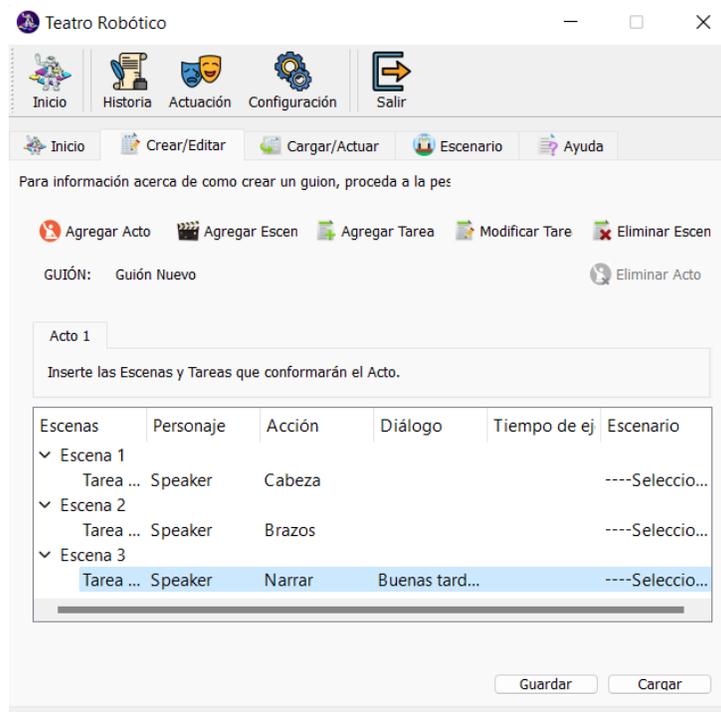
Tabla 32

Pruebas del funcionamiento del KERO

Prueba	Funcionamiento	Observaciones
1	Exitoso	Funciona correctamente.
2	Exitoso	Funciona correctamente.
3	Exitoso	Funciona correctamente.
4	Exitoso	Funciona correctamente.
5	Exitoso	Funciona correctamente.
6	Exitoso	Funciona correctamente.
7	Exitoso	Funciona correctamente.
8	Exitoso	Se demora en llegar el mensaje.
9	Exitoso	Funciona correctamente.
10	Exitoso	Se empieza a notar el desgaste de la batería.

Figura 67

Rutina programada para la validación del KERO



Servidor en la nube

Se verificó que la página web del servidor funcione en diferentes dispositivos y sin importar el tipo de conexión a internet que disponga el usuario en la Tabla 33 se muestran los resultados.

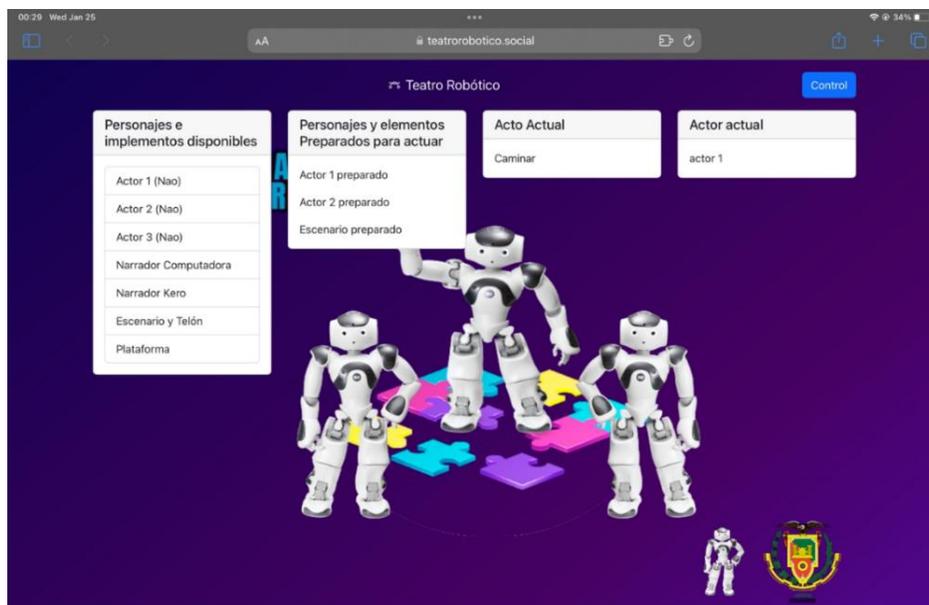
Tabla 33

Diferentes conexiones a la página web para el monitoreo y control del teatro

Dispositivo	Conexión Internet	Resultado
Computadora	Cable de red	Positivo
Celular	Datos Móviles de Movistar	Positivo
Tablet	Wifi	Positivo

Figura 68

Conexión a la página web desde un iPad conectado a una red wifi

**Figura 69**

Conexión a la página web desde un celular con datos móviles de Movistar

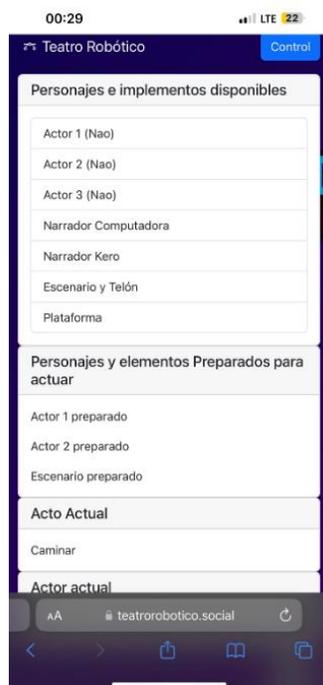
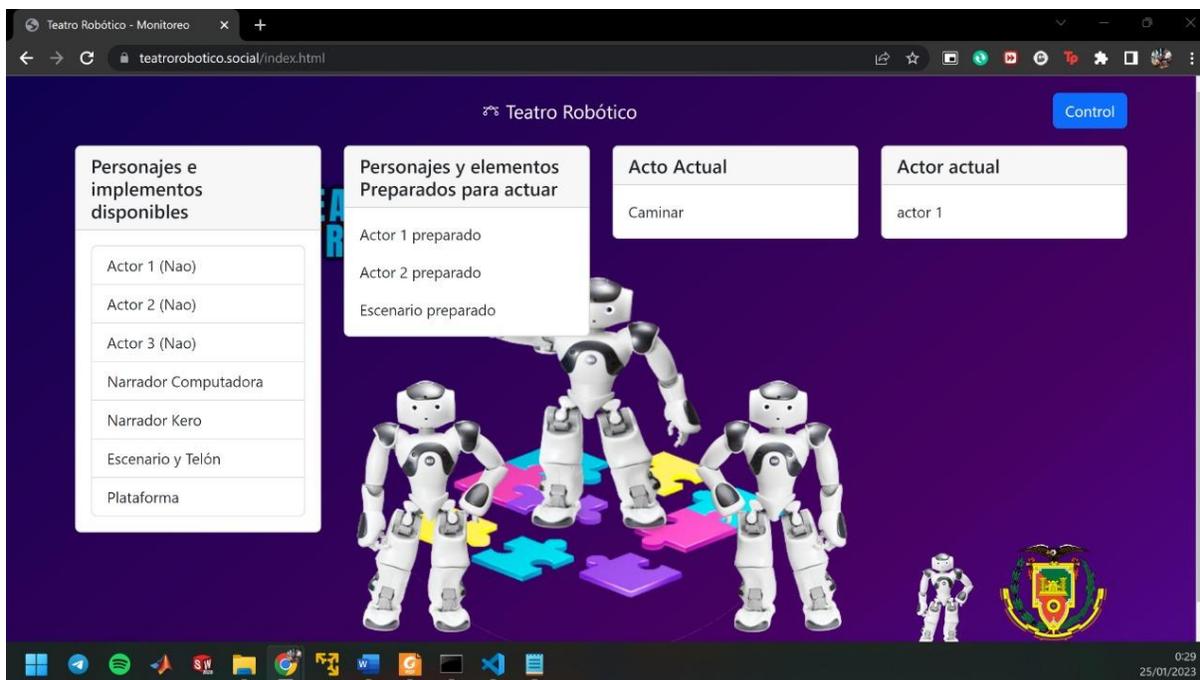


Figura 70

Conexión a la página web desde una computadora de escritorio.



Integración del teatro robótico

Al finalizar las validaciones individuales del telón, la plataforma, el narrador KERO y el servidor en la nube es necesario que todos estos funcionen en conjunto con el escenario del teatro robótico y los robots NAO. Para ello se planificó un guion completo con todos los elementos del teatro (Luces, Telón, Plataforma, NAO, KERO) y se realizó la prueba de funcionamiento repitiendo el guion 10 veces y monitoreando la obra desde el servidor web.

El guion implementado consta de:

- Encendido de luz principal
- Apertura del telón
- Elevación de la plataforma
- Narración KERO
- Saludo NAO

- Descenso de la plataforma
- Cierre del telón
- Apagado de la luz principal

Figura 71

Guion creado en la HMI del teatro robótico

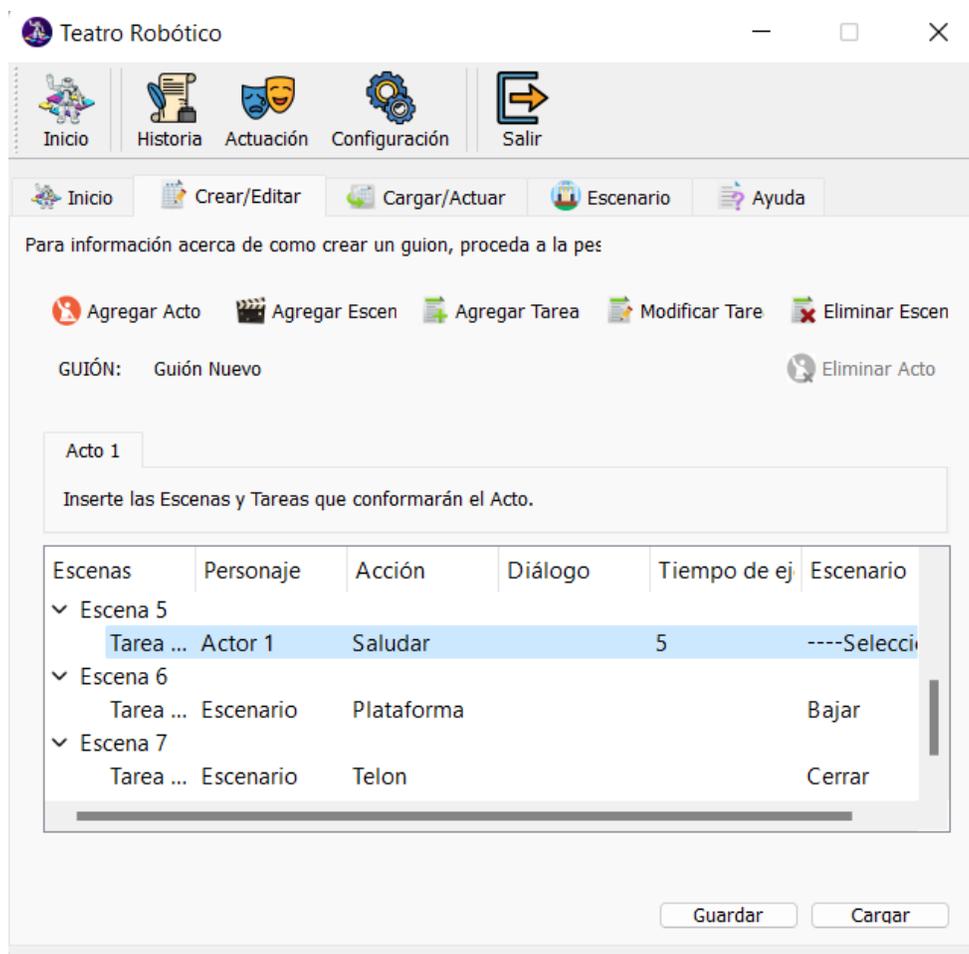


Figura 72*Secuencia del guion de prueba*

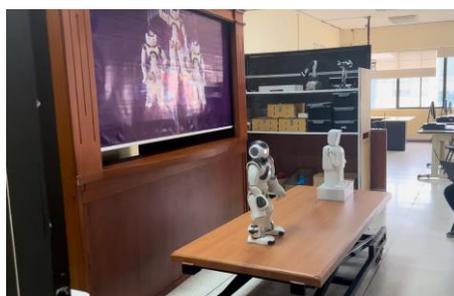
(a)



(b)



(c)



(d)

Nota. (a) Luz principal encendida, telón abriendo y plataforma abajo, (b) Telón abierto, plataforma arriba y Kero narrando, (c) NAO saludando, (d) Luces apagadas, telón cerrado, plataforma abajo.

A partir del guion de prueba se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 34

Pruebas del funcionamiento del teatro robótico

Prueba	Funcionamiento	Observaciones
1	Exitoso	Funciona correctamente
2	Exitoso	Funciona correctamente
3	Exitoso	Funciona correctamente
4	Exitoso	Funciona correctamente
5	Exitoso	Funciona correctamente
6	Exitoso	Funciona correctamente
7	Exitoso	Funciona correctamente
8	Exitoso	La plataforma sube en 35sg
9	Exitoso	La plataforma sube en 35sg
10	Exitoso	La plataforma sube en 35sg

Los datos anteriores nos indican que a partir de las 16 interacciones con la plataforma seguidas los motores se empiezan a calentar, por lo que comienza a existir un pequeño retraso el cual es aceptable. Para prevenir esta situación es necesario un mantenimiento preventivo cada dos meses, el cual consiste en la lubricación del sistema.

Conclusión del capítulo 4

El teatro robótico como una herramienta de terapia fue validado previamente mediante encuestas a diferentes grupos con y sin relación a la robótica social. Los nuevos elementos como el narrador KERO y el telón fueron validados realizando una encuesta a 3 psicopedagogos. Los resultados obtenidos en las encuestas son convenientes para considerar al teatro robótico como una herramienta de terapia y aprendizaje. Todos los encuestados

concuerdan en que esta herramienta tecnológica es innovadora y beneficiosa para las personas que necesitan este tipo de terapias. Consideran que sería bueno hacer que esta herramienta tenga más exposición y llegue a incluirse dentro de las instalaciones que se enfocan plenamente en terapias, haciendo mucho énfasis en los casos de TEA que se tienen tanto dentro de la universidad como en el país.

Se realizaron pruebas de funcionamiento individuales y en conjunto de los elementos implementados en el teatro robótico, obteniendo resultados positivos, en el narrador se encontró como una amenaza la congestión y velocidad de la red Wifi a la que se conecta el teatro y en la plataforma se pudo determinar que es necesario un mantenimiento preventivo dependiendo de su uso cada tres meses, el cual consiste en lubricar las uniones y rodamientos del sistema.

Conclusiones

Se desarrolló el teatro robótico heterogéneo gracias a la inclusión del Robot KERO dentro de la HMI del teatro, obteniendo así una obra que consta de 3 actores (Robots Nao) y un narrador (Robot KERO). Se vuelve heterogéneo ya que el robot KERO no está programado de la misma forma que los robots Nao porque es un robot creado por estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas con un microcontrolador muy diferente al que poseen los Robots Nao. Esto quiere decir que, para configurarlo dentro de la HMI a pesar de hacerlo por medio del mismo lenguaje de programación, se codifican de forma diferente.

Un teatro sin un telón no es un teatro, es por eso que se diseñó, construyó e implementó un telón mecatrónico en el escenario del teatro robótico. El mecanismo del telón es de persiana enrollable con un deslizamiento vertical, ya que el espacio asignado para el telón es muy reducido, la transmisión del movimiento está basado en la transmisión de cadenas. Para automatizarlo se incluye un motor en el eje de rotación que ayude a generar el torque necesario para lograr la apertura (sube la persiana) y cierre del telón (baja la persiana). El control manual y automático del telón se encuentran incluidos en la HMI del teatro robótico.

Los problemas mecánicos que tenía la plataforma fueron solucionados luego de identificarlos con la ayuda de un software CAD realizando la simulación del análisis estático y el análisis de frecuencias del cual se obtuvo un factor de seguridad de 19, lo cual implica que la máquina se encuentra sobredimensionada, presenta una tensión máxima de Von Mises de 11.66 MPa al aplicar la carga máxima de 50 kg es por eso que soporta sin problemas ese peso, pero al producirse una vibración de 13 Hz aproximadamente la mesa de la plataforma vibra demasiado. Se concluye así que, para solucionar las vibraciones de la máquina era necesario repotenciar la estructura de la plataforma haciendo que sea más robusta, añadir más fijación de la máquina al suelo y cambiar el sistema electrónico que generaba la fuerza para elevar la plataforma, ya que no era óptimo para la reducción de vibraciones. Para los mecanismos de tijeras lo recomendable es utilizar cilindros lineales (Sistema Hidráulico o Neumático) pero no

se quería cambiar el actuador para la parte de control manteniendo el motor. Por eso se cambió por un sistema híbrido con la ayuda de los cilindros electrónicos, además se incluyeron vigas transversales, soportes y niveladores en la estructura de la plataforma. Teniendo como resultado un factor de seguridad de 10 y mayor firmeza de la máquina para soportar las vibraciones producidas con los movimientos de los robots.

Se ha creado un servidor en la nube que está diseñado para el monitoreo y control del teatro robótico. La página web contiene 2 pestañas, una para el monitoreo y otra para el control. La pestaña del monitoreo es bastante sencilla de comprender ya que se muestran 4 recuadros que abarcan: los personajes o implementos disponibles, los personajes y elementos preparados para actuar, la actuación que se está ejecutando y el actor actual que está haciendo el acto. Por otro lado, la pestaña del control muestra la misma imagen que aparece en la HMI en el control manual del escenario, en el cual se puede controlar el telón, la plataforma, las luces y la cámara de humo. La página web no presenta ninguna restricción por lo cual se puede ingresar a ella desde cualquier dispositivo y con cualquier conexión a internet.

Para poder denominar al teatro robótico heterogéneo como una herramienta de terapia se creó una breve presentación del teatro junto con una corta obra, sobre el TEA, a un grupo de psicopedagogos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE a los quienes se les realizó una encuesta obteniendo un resultado positivo en cuanto a la funcionalidad del proyecto enfocado en la robótica social. Al evaluar la integración del nuevo robot todos los evaluadores coincidieron en que se entendió lo que dice el robot, concluyendo así que el robot KERO no interfiere en el propósito del teatro robótico, sino que lo complementa favorablemente.

Recomendaciones

En el proceso del diseño mecánico de un mecanismo hay que tener en cuenta varios parámetros físicos del material de los elementos que lo conforman, y algunos de esos parámetros suelen llegar a ser muy complicados de calcular, ya que muchas de las veces se excluyen esos cálculos tomando valores obtenidos en libros o páginas del internet. Es por eso que se recomendó realizar simulaciones de los elementos en un software de diseño asistido por computador (CAD) previo a la construcción del mecanismo, de esa forma se adquiere el valor de las propiedades físicas del material de los elementos que conforman el mecanismo, facilitando así su diseño. Incluso dentro del software CAD se puede simular todo el mecanismo y verificar su funcionamiento antes de construirlo.

Se recomienda realizar pruebas de funcionalidad de los elementos por separado, empezando por el control manual seguido del control automático, para luego validar el funcionamiento en la página web. Suele ser muy tedioso, pero seguir este orden ayuda a identificar los problemas que puedan ir surgiendo y asegura un funcionamiento correcto.

Para el diseño electrónico siempre se recomienda generar una placa PCB del circuito para evitar tener cables sueltos, que muchas de las veces se desconectan y hacen que falle el funcionamiento de los elementos que se están controlando. Y en caso de que exista algún elemento electrónico que no pueda ser incluido en la placa PCB, se optará por soldar los cables para la conexión.

Trabajos Futuros

En cuanto a los trabajos futuros que se pueden realizar con respecto a este proyecto se mencionarán tres posibles ideas innovativas. La primera es lograr el control de los Robots Nao y el Robot KERO desde la pestaña de control de la página web. La dificultad se presenta con los Robots Nao, ya que por el momento solo responden a señales enviadas a través del servidor local y se necesitaría investigar la forma para que recepte señales conectándose a un servidor en la nube.

La segunda idea es el actualizar la versión de los programas utilizados para la programación del control del teatro robótico heterogéneo, ya que su instalación se vuelve bastante complicada por las librerías y la versión de Python. Es por eso que toma bastante tiempo lograr instalar y hacer que funcione todo el programa en una nueva computadora.

La última idea es modificar la estructura del escenario en la parte trasera, facilitando el ingreso y la ubicación de los actores cuando el telón está cerrado.

Bibliografía

- Almeida, J., & Balladares, D. (2021). Diseño e implementación de un escenario mecatrónico interactivo con el uso de robots Nao como herramienta tecnológica de apoyo a la enseñanza en niños. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25455>
- Barnes, J., Fakhrhosseini, S., Vasey, E., Park, C., & Jeon, M. (2020). Child-Robot Theater: Engaging Elementary Students in Informal STEAM Education Using Robots. *IEEE Pervasive Computing*, 19(1), 22–31. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2019.2940181>
- Bonarini, A. (2019). Design and implementation of an actor robot for a theatrical play. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/174079?mode=simple>
- Bonarini, A. (2020). Design and implementation of a multi-modal framework for scenic actions classification in autonomous actor-robot theatre improvisations. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/186325>
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2015). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGraw-Hill Interamericana.
- Casas, S., Portalés, C., Vidal-González, M., García-Pereira, I., & Fernández, M. (2017). Romot: A robotic 3D-movie theater allowing interaction and multimodal experiences. *Love and Sex with Robots: Second International Conference, LSR 2016, London, UK, December 19-20, 2016, Revised Selected Papers 2*, 50–63.
- Casillas, M., & Estacio, S. (2013). Diseño de un elevador limpia ventanas con capacidad para dos personas y altura máxima de 12 m para uso en terminales terrestres y aéreas a nivel nacional. Repositorio EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5737>

- Celis, K., Cervantes, N., & Escobar, P. (2020). COBOT: teatro robótico educativo orientado a las emociones y el realismo.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/52588#.Y8bcSd1Surg.mendeley>
- Chikaraishi, T., Yoshikawa, Y., Ogawa, K., Hirata, O., & Ishiguro, H. (2017). Creation and Staging of Android Theatre “Sayonara” towards Developing Highly Human-Like Robots. *Future Internet*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/fi9040075>
- Collado, H. (2013). Situación Mundial de la discapacidad. Organización Panamericana de la Salud. Honduras.
- Crovo, D. (2018). Interfaz RoboAct-pantalla multitáctil para interacción con el usuario en la creación de dramatizaciones de teatro robótico.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/38786#.Y8IWW4KFgtw.mendeley>
- Díaz, I. (2017). Desarrollo de actividades basadas en robótica social para pacientes con TEA.
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/28821>
- ECO LLC, 2014. Amazon. Recuperado de: https://www.amazon.com//es/dp/B00NM8H5U A/ref=twister_B08DX9JDMY?encoding=UTF8&th=1
- Eppinger S, & Ulrich K. (2013). Diseño y desarrollo de productos (5ta ed.). McGraw Hill.
- Gausemeier, J., & Moehring, S. (2002). VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(2), 785–790.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34035-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34035-1)
- Guasch, J., & Calleja, M. (2019). Monitorización de sensores con Arduino utilizando el protocolo MQTT. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/134193#.Y8IYnwh2FN0.mendeley>
- INEC. (2010). La población del Ecuador. Instituto nacional de estadística y censos.

- Jeong, J., Yang, J., & Baltes, J. (2022). Robot magic show as testbed for humanoid robot interaction. *Entertainment Computing*, 40, 100456.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.entcom.2021.100456>
- Jochum, E., Vlachos, E., Nielsen, S., Hameed, I., Tan, Z.-H., & Christoffersen, A. (2016). Using Theatre to Study Interaction with Care Robots. *International Journal of Social Robotics*.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12369-016-0370-y>
- Katevas, K., Healey, P., & Harris, M. (2014). Robot stand-up: engineering a comic performance. *Proceedings of the workshop on humanoid robots and creativity at the IEEE-RAS international conference on humanoid robots humanoids (Madrid)*.
- Kumar, A., & Panda, Supriya. P. (2019). A Survey: How Python Pitches in IT-World. 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon), 248–251. <https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862251>
- Lekić, M., & Gardašević, G. (2018). IoT sensor integration to Node-RED platform. 2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), 1–5.
<https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2018.8345544>
- Lin, C.-Y., Tseng, C.-K., Teng, W.-C., Lee, W.-C., Kuo, C.-H., Gu, H.-Y., Chung, K.-L., & Fahn, C.-S. (2009). The realization of robot theater: Humanoid robots and theatric performance. 2009 International Conference on Advanced Robotics, 1–6.
- Lytridis, C., Bazinas, C., Kaburlasos, V. G., Vassileva, V., Youssfi, M., Mestari, M., Ferelis, V., & Jaki, A. (2019). Social Robots as Cyber-Physical Actors in Entertainment and Education. 2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 1–6. <https://doi.org/10.23919/SOFTCOM.2019.8903630>

- Miranda, C., Zaldumbide, A., Tobar, J., Bacca, B., & Caicedo, E. (2021). KERO-Playable Robotic Platform to Contribute to Non-verbal Communication Teaching in Children with Autism Spectrum Disorder. *International journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 11(4).
- OMS. (2011). Informe mundial sobre la discapacidad 2011. Organización Mundial de la Salud.
- Pareto, J. (2021). Prolegómenos a una ética para la robótica social. En *Dilemata*.
- Peng, Y., Feng, Y.-L., Wang, N., & Mi, H. (2020). How children interpret robots' contextual behaviors in live theatre: Gaining insights for multi-robot theatre design. 2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 327–334. <https://doi.org/10.1109/RO-MAN47096.2020.9223560>
- Pérez, A., Castro, Á., Alonso, F., Castillo, J., & Salichs, M. (2017). Evolución de la robótica social y nuevas tendencias. *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*. https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/46926/ActasJA2017_APerezetaI.pdf?sequence=1
- Petrović, D., Kićinbaći, L., Petric, F., & Kovačić, Z. (2019). Autonomous Robots as Actors in Robotics Theatre - Tribute to the Centenary of R.U.R. 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR), 1–7. <https://doi.org/10.1109/ECMR.2019.8870908>
- Pinel, V., Rendón, L. A., & Adrover-Roig, D. (2018). Los robots sociales como promotores de la comunicación en los Trastornos del Espectro Autista (TEA). *Letras de Hoje*, 53(1), 39. <https://doi.org/10.15448/1984-7726.2018.1.28920>
- Pluta, I. (2016). Theater and Robotics: Hiroshi Ishiguro's Androids as Staged by Oriza Hirata. *Art Research Journal*, 3(1), 65–79.

- Quiroga, L. P. (2018). La robótica: otra forma de aprender. *Revista Educación y Pensamiento*, 25(25).<http://educacionypensamiento.colegiohispano.edu.co/index.php/revistaeyp/article/view/89#.Y8bUecUa2GE.mendeley>
- Robaczewski, A., Bouchard, J., Bouchard, K., & Gaboury, S. (2021). Socially Assistive Robots: The Specific Case of the NAO. *International Journal of Social Robotics*, 13(4), 795–831. <https://doi.org/10.1007/s12369-020-00664-7>
- Rus, D. (2015). How technological breakthroughs will transform everyday life. *Foreign Affairs*.
- Tobar, J. B., Prócel, A., Loza, D., Caicedo, E., & Bacca, B. (2021). Autism Robotic Theater: a technological tool to contribute to the social interaction of children diagnosed with autism spectrum disorder. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 9(3), 548. <https://doi.org/10.21533/pen.v9i3.2187>
- Valverde-Castro, B. I. (2020). La importancia de la Robótica como eje en el desarrollo de la sociedad. *Polo del Conocimiento*, 5(8).
- Vives Parra, S. (2020). Desarrollo de una aplicación IoT con almacenamiento y procesamiento de datos en la nube mediante el protocolo MQTT. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/152352>

Apéndices