



**Diseño y construcción de un prototipo robótico para la enseñanza y juego del ajedrez
con potencial aplicación a la mejora del estado anímico en pacientes oncológicos
pediátricos**

Becerra Romero, David Nicolás y León Vázquez, Víctor Freddy

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Tobar Quevedo, Johanna Belén

11 de julio de 2023

Reporte de verificación de contenido

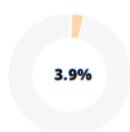


Tesis Final 13-07-2023 caps1.docx

Scan details

Scan time: July 13th, 2023 at 20:18 UTC Total Pages: 132 Total Words: 32802

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.4%	115
Minor Changes	0.2%	62
Paraphrased	3%	981
Omitted Words	8.9%	2903

AI Content Detection



Text coverage
 AI text
 Human text

Plagiarism Results: (23)

T-ESPE-052442.pdf 0.6%

<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/32101/1/t-e...>

Maritza Alban;Pablo Navarrete

1 Diseño y construcción de un prototipo de brazo robótico de 6 GDL con movimiento restringido por planos, activado mediante señales EEG-...

Diseño y construcción de un robot social interactiv... 0.4%

<https://docplayer.es/225481132-diseño-y-construcción-de-u...>

Iniciar la sesión ...

CD 9565.pdf 0.3%

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20125/1/cd%2...>

JONATHAN

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL SERVOVISUAL...



JOHANNA BELEN TOBAR
QUEVEDO



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un prototipo robótico para la enseñanza y juego del ajedrez con potencial aplicación a la mejora del estado anímico en pacientes oncológicos pediátricos”** fue realizado por los señores **Becerra Romero David Nicolás** y **León Vázquez Víctor Freddy**; 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 analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de Julio del 2023

Firma:



Firmado electrónicamente por:
JOHANNA BELEN TOBAR
QUEVEDO

.....
Ing. Tobar Quevedo, Johanna Belén

C.C.: 1717171241



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Becerra Romero David Nicolás** y **León Vázquez Víctor Freddy**, con cédulas de ciudadanía N° 2300268790 y N° 1401230303, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un prototipo robótico para la enseñanza y juego del ajedrez con potencial aplicación a la mejora del estado anímico en pacientes oncológicos pediátricos** 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, 21 de Julio del 2023

Firmas:

Becerra Romero David Nicolás

C.C.: 2300268790

León Vázquez Víctor Freddy

C.C.:1401230303



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

Autorización de Publicación

Nosotros, **Becerra Romero David Nicolás** y **León Vázquez Víctor Freddy**, con cédulas de ciudadanía N° 2300268790 y N° 1401230303, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño y construcción de un prototipo robótico para la enseñanza y juego del ajedrez con potencial aplicación a la mejora del estado anímico en pacientes oncológicos pediátricos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 21 de Julio del 2023

Firmas:

Becerra Romero David Nicolás

C.C.: 2300268790

León Vázquez Víctor Freddy

C.C.:1401230303

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres Enrique y Carmen, a mi hermano Santiago, mi novia Alejandra y cada persona que me brindó su apoyo y motivación a lo largo de este camino hacia el cumplimiento de mis metas.

David Nicolás Becerra Romero

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que han sido esenciales en mi camino hacia la culminación de este proyecto, en especial a mis padres Víctor y Carmita, a mi hermana Jimena y a mi novia Valeria.

Víctor Freddy León Vázquez

Agradecimiento

Agradezco a mis padres Enrique y Carmen, que me brindaron oportunidades para cumplir mis sueños, apoyo en cada noche de desvelo y motivación para sobrellevar cada dificultad que se presentaba en mi etapa universitaria.

Agradezco a mi hermano Santiago que siempre me brindó su consejo en aspectos de vida y educación, poniendo en perspectiva cuán importante es la familia.

Agradezco a Alejandra por depositar su amor y empatía de manera incondicional y por su ayuda en cada una de las situaciones difíciles que se me presentaban en este período de vida.

Agradezco a mi mejor amigo Sebastián que me ha demostrado el valor de la lealtad a lo largo de los años, brindándome experiencias de vida y demostrándome que siempre es posible enfrentar las dificultades con una perspectiva positiva.

Agradezco a mis compañeros Diego y Freddy que estuvieron desde el inicio de mi etapa universitaria conmigo, completando proyectos juntos.

Agradezco a mis amigos Andrés, Alessandro, Carlos, Diego, Eloy, Mateo, Santiago, Sebastián y Víctor por brindarme esa calidez y jovialidad en cada una de mis experiencias y proyectos universitarios, provocando recuerdos inolvidables.

Agradezco a mi compañero Víctor por su trabajo en conjunto conmigo, en proyectos universitarios y la presente tesis con unos resultados que no serían posibles sin su ayuda.

Agradezco a nuestra tutora Ing. Johanna Tobar por el apoyo, confianza y consejo a lo largo del presente proyecto y a cada docente universitario que contribuyó con conocimientos en las diversas áreas dentro de mi carrera.

David Nicolás Becerra Romero

Agradezco a Dios por permitirme completar este camino.

A mis padres Víctor y Carmita, por su amor incondicional, paciencia y apoyo constante. Gracias por brindarme la oportunidad de cumplir mis objetivos.

A Valeria por acompañarme durante todo este camino, tu presencia y palabras de aliento fueron fundamentales.

A mis amigos Sebastián, Alessandro, Mateo, David, Santiago, Andrés, Eloy, Carlos, Diego y Vladimir por estar presentes y ser una gran ayuda en cada proyecto y experiencia durante este tiempo.

A mi compañero David cuya colaboración estrecha en este proyecto ha sido fundamental para obtener excelentes resultados.

A la ESPE y a nuestra tutora Ing. Johana Tobar por permitir realizar este proyecto.

Víctor Freddy León Vázquez

Índice de Contenido

Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen	21
Abstract.....	22
Capítulo I.....	23
Generalidades	23
Antecedentes.....	23
Robótica educativa	23
Automatización del ajedrez y tableros electrónicos.....	25
Reconocimiento mediante visión artificial	27
Trabajos previos.....	27
Justificación e Importancia	28
Alcance.....	32
Subsistema Mecánico	33
Subsistema Electrónico y Control	34
Subsistema de Tecnologías de la Información	35
Integración y Validación del Prototipo	36

Objetivos.....	37
Objetivo General.....	37
Objetivos Específicos	37
Estructura del Documento	37
Conclusión.....	38
Capítulo II.....	39
Investigación Bibliográfica	39
Cáncer en el Ecuador	39
Actividades lúdicas como terapia	40
Ajedrez en edades tempranas	42
Robótica educativa.....	42
Integración de robótica en instituciones.....	44
Integración en aulas hospitalarias	44
Sistemas de manipulación robótica.....	46
Interacción del sistema mecatrónico en tiempo real	50
Visión artificial.....	51
Elementos de los sistemas de visión artificial	52
Etapas de la visión artificial	54
Herramienta OpenCV.....	55
Motores de ajedrez.....	56

Interfaz Humano-Máquina.....	57
Tecnología basada en óptica	57
Tecnología basada en acústica	58
Tecnología biónica	58
Tecnología de movimiento	59
Tecnología táctil.....	59
Recomendaciones de diseño de la interfaz	60
Conclusión.....	61
Capítulo III	62
Metodología, diseño y construcción del sistema	62
Metodología de diseño	62
Identificación de requerimientos	64
Diseño del prototipo	68
Selección de tipo de movimiento	68
Modelo matemático	70
Selección de materiales para construcción	74
Diseño mecánico.....	78
Modelado asistido por computador	80
Análisis estático del brazo robótico.....	85
Espacio de trabajo	91

Análisis dinámico del brazo robótico.....	92
Selección de técnica de visión artificial	102
Diseño de algoritmo de detección de piezas.....	103
Selección de motor de ajedrez	105
Selección de componentes electrónicos necesarios	107
Diseño de circuito de control.....	120
Sistema de control	124
Programación de visión artificial	125
Integración de motor de ajedrez	131
Rutinas de movimiento y control de posición	133
Construcción del prototipo	138
Impresión 3D	138
Post procesado	144
Ensamble del prototipo	148
Interfaz gráfica humano-máquina	153
Conexión y pruebas de funcionamiento preliminares	157
Presupuesto final del proyecto	158
Descripción del proyecto final	160
Conclusión.....	162
Capítulo IV.....	164

Implementación y Resultados.....	164
Pruebas de sistema robótico	164
Norma ISO 9283.....	164
Tiempo de respuesta del robot.....	168
Pruebas de visión artificial	169
Clasificación y métricas.....	169
Medición y resultados	171
Conclusión.....	172
Capítulo V.....	173
Conclusiones y Recomendaciones	173
Conclusiones	173
Recomendaciones.....	176
Trabajos Futuros	177
Bibliografía	178

Índice de tablas

Tabla 1 Tipos de manipuladores y características principales.....	48
Tabla 2 Descripción de requerimientos identificados en investigación previa.....	65
Tabla 3 Explicación de las especificaciones técnicas requeridas.....	68
Tabla 4 Comparación entre manipuladores tipo cartesianos y tipo SCARA.....	69
Tabla 5 Parámetros DH del brazo robótico.....	72
Tabla 6 Características principales para materiales de impresión 3D.....	75
Tabla 7 Propiedades mecánicas de filamentos de impresión 3D.....	77
Tabla 8 Matriz de selección de material con ponderación.....	77
Tabla 9 Características de conceptos realizados para el brazo robótico.....	79
Tabla 10 Matriz de selección para conceptos de brazo robótico.....	80
Tabla 11 Dimensiones finales de prototipo.....	85
Tabla 12 Resultados del análisis estático de cada parte del brazo robótico.....	91
Tabla 13 Descripción de masas e inercias de cada eslabón.....	93
Tabla 14 Torque máximo requerido por eslabón.....	101
Tabla 15 Comparativa entre motores de ajedrez.....	106
Tabla 16 Comparativa de motores eléctricos.....	108
Tabla 17 Características de controladores para motores a pasos.....	112
Tabla 18 Características mínimas necesarias para la tarjeta de control del prototipo.....	115
Tabla 19 Especificaciones técnicas de tarjetas de control.....	115
Tabla 20 Características de cámaras para tarjeta de control Raspberry Pi.....	118
Tabla 21 Consumo energético de componentes eléctricos.....	120
Tabla 22 Asignación y descripción de los puertos de la tarjeta de control y su conexión con la placa de	

control.....	121
Tabla 23 Correspondencia entre coordenada en notación de ajedrez y coordenadas cartesianas.....	135
Tabla 24 Características cinemáticas de los eslabones y sus actuadores.....	137
Tabla 25 Parámetros de impresión utilizados.	139
Tabla 26 Presupuesto de sistema electrónico.	158
Tabla 27 Presupuesto de sistema mecánico.....	158
Tabla 28 Presupuesto de proyecto.....	159
Tabla 29 Parámetros de exactitud, precisión y repetibilidad para la posición y trayectoria.	166
Tabla 30 Resultados obtenidos en medición de sistema de visión artificial.	171

Índice de figuras

Figura 1 Trabajos que utilizan robótica educativa con niños.	24
Figura 2 Comparativa del número de emociones antes y después del proyecto clasificadas por categorías simples.....	25
Figura 3 Prototipos de automatización en tableros de ajedrez.....	26
Figura 4 Trabajos existentes relacionados con el tema del presente proyecto.	28
Figura 5 Niveles de depresión clasificados por género.	29
Figura 6 Aceptación de integración de juegos a hospitalización. Previo a estudio (izquierda), posterior a estudio (derecha).	30
Figura 7 Comparación de niveles de ansiedad antes y después de la a integración de juegos.	31
Figura 8 Diagrama de bloques de funcionamiento.....	33
Figura 9 Diagrama de sistema integrado.	35
Figura 10 Porcentajes de frecuencia y adherencia en actividades realizadas por pacientes.....	41
Figura 11 Robot usado para actividades lúdicas en niños y niñas.....	43
Figura 12 Resultados de evaluación de emociones presesión y postsesión.	45
Figura 13 Kit de robótica KIBO.....	46
Figura 14 Esquema del sistema mecánico de un robot PUMA.....	47
Figura 15 Esquema robot cartesiano (Saha, 2014).....	48
Figura 16 Esquema robot cilíndrico (Saha, 2014).	48
Figura 17 Esquema robot polar (Saha, 2014).	49
Figura 18 Esquema robot articulado (Saha, 2014).	49
Figura 19 Esquema robot SCARA (Saha, 2014).....	49
Figura 20 Robot Baxter Arm jugando una partida de ajedrez, ampliación en el manipulador y la cámara	

para la detección.....	51
Figura 21 Tipos de iluminación usados para visión artificial. (a) Iluminación posterior, (b), iluminación frontal (c) iluminación direccional, (d) iluminación estructurada.	53
Figura 22 Componentes de la ergonomía.....	57
Figura 23 Reconocimiento de gestos mediante visión artificial, realizados con la mano para controlar un sistema.	58
Figura 24 Ejemplo de HMI que usa un panel táctil, marca Siemens.....	60
Figura 25 Requerimientos ordenados de mayor a menor importancia.	66
Figura 26 Matriz QFD.....	67
Figura 27 Simbología de la Matriz QFD.....	67
Figura 28 Diagrama de cinemática directa. A) movimientos articulares y b) colocación de los ejes.	71
Figura 29 Diagrama de cinemática inversa.....	73
Figura 30 Eslabón inicial modificado en brazo robótico.....	82
Figura 31 Eslabón final de brazo robótico. a) Primer concepto b) Segundo concepto.	82
Figura 32 Opciones presentadas para la estructura del prototipo.....	83
Figura 33 Concepto final de la estructura con estética modificada.	84
Figura 34 Modelo final renderizado del prototipo.	84
Figura 35 Análisis estático del eslabón 3: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad	86
Figura 36 Análisis estático del eslabón 2: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad	87
Figura 37 Posición extendida del brazo robótico, con todos sus componentes. Centro de masa mostrado de color rosa.	88

Figura 38 Diagrama de desplazamiento. Valores de las reacciones en los soportes de una de las barras.	88
Figura 39 Análisis estático del eslabón 1: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad	89
Figura 40 Análisis estático de la base: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad	90
Figura 41 Representación del espacio de trabajo: a) Vista superior y b) Vista lateral	92
Figura 42 Gráficas de torque con respecto al tiempo para cada uno de los eslabones.	101
Figura 43 Desglose de sistemas para obtención de mayor resolución.....	110
Figura 44 Representación visual del campo de visión (FOV).....	118
Figura 45 Placa de control con sus componentes y terminales para conexión con los dispositivos externos.	122
Figura 46 Circuito de acondicionamiento de la señal de los sensores fin de carrera para las tres articulaciones del brazo robótico.	123
Figura 47 Diagrama de conexiones desde los puertos GPIO de la Raspberry Pi 4 hasta los motores a pasos.	124
Figura 48 Comunicación entre los distintos programas que conforman el sistema de control.....	125
Figura 49 Algoritmo de reconocimiento inicial del tablero de ajedrez.	128
Figura 50 Secuencia de pasos para detección de movimientos realizados en tablero de ajedrez.	129
Figura 51 Elementos utilizados para pruebas preliminares de visión artificial.	130
Figura 52 Resultados preliminares de detección de movimientos. Comprobación de movimiento de un peón.	130
Figura 53 Secuencia de pasos para comunicación de movimientos del usuario hacia motor de ajedrez.	132

Figura 54 Algoritmo para solicitud de movimiento de ajedrez a Stockfish.	133
Figura 55 Proceso de movimiento de piezas con brazo robótico.	135
Figura 56 Diagrama del retraso entre cada paso de un motor Nema 17 en función del número de pasos	138
Figura 57 Pieza base de sujeción para todo el brazo robótico.	140
Figura 58 Acople para rodamiento de base.	141
Figura 59 Eslabón final de brazo robótico.	142
Figura 60 Pieza que forma parte de la carcasa externa del prototipo.	143
Figura 61 Elemento de soporte inferior.	144
Figura 62 Piezas con resina epoxi en proceso de secado.	146
Figura 63 Piezas con resina epoxi en proceso de lijado.	147
Figura 64 Componentes pintados en proceso de secado.	148
Figura 65 Ensamble inicial de piezas.	149
Figura 66 Instalación de cableado interno en prototipo.	150
Figura 67 Ensamble de piezas internas del brazo robótico para pruebas preliminares.	151
Figura 68 Ensamble de carcasas de eslabones y piezas de soporte de pantalla.	152
Figura 69 Ensamble final con piezas estructurales, componentes electrónicas y elementos decorativos.	153
Figura 70 Pantalla de selección de lección de movimiento, ilustrando la distribución de objetos y acciones que siguen como norma general todas las pantallas.	155
Figura 71 Pantalla de ajustes.	155
Figura 72 Pantalla emergente de salir de partida, exige confirmación.	156
Figura 73 Diagrama de interacción entre pantallas.	157

Figura 74 Esquema del sistema creado.	161
Figura 75 Modos de funcionamiento en sistema con HMI.....	162
Figura 76 Definición de los planos para la ubicación de las trayectorias de ensayo según la norma ISO 9283.	167
Figura 77 Trayectorias recomendadas para los ensayos según la norma ISO 9283.....	168
Figura 78 Ciclos propuestos por la norma ISO 9283 para los ensayos.	168
Figura 79 Matriz de confusión del sistema de visión artificial.....	171

Resumen

Se diseñó y construyó un prototipo de brazo robótico con 3 GDL integrado en un sistema de enseñanza y juego en tiempo real de ajedrez con potencial aplicación en la mejora del estado anímico en pacientes oncológicos pediátricos. Considerando las necesidades del público objetivo en cuanto a diseño, estabilidad y facilidad de uso para el prototipo. Se modeló el proyecto iniciando con la cinemática directa e inversa. Posteriormente, se diseñó la geometría especificada, eligiendo el concepto optimizado en parámetros de resistencia, peso y modularidad para finalmente calcular los torques necesarios con el modelo dinámico e identificar el espacio de trabajo. Los componentes electrónicos fueron seleccionados mediante matrices comparando opciones adecuadas con respecto a la presente aplicación. Los diversos sistemas se integran mediante una tarjeta Raspberry Pi 4, que procesa la acción realizada por el usuario detectada mediante visión artificial para enviarla al motor de ajedrez, el cual responde con un movimiento coherente. Este movimiento finalmente se realiza mediante el brazo robótico. Fue integrada una pantalla táctil de 7" IPS para la muestra de datos y navegación mediante una HMI orientada hacia el público pediátrico. Adicionalmente, se añadieron respuestas sonoras y luces decorativas para estimular la atención en el usuario. El sistema de manipulación en conjunto con el control electrónico y digital fueron analizados mediante la norma ISO9283 obteniendo resultados para posición y trayectoria. Los parámetros de posición presentaron valores de: exactitud con ± 2.41 [mm], precisión en ± 0.37 [mm] y repetibilidad de ± 3.52 [mm]. Para la detección de movimientos fueron integrados filtros y procesamiento de imágenes, tomando en cuenta las posiciones de cada casilla de ajedrez y las diversas piezas en el juego. Este sistema se evaluó, obteniendo un 95,7 % de precisión.

Palabras Clave: robótica, actividades lúdicas como terapia, visión artificial, pacientes oncológicos pediátricos.

Abstract

A robotic arm prototype was designed and built with 3 DOF, integrated in a chess teaching and real-time game system with potential application in the improvement of mood in pediatric oncology patients. The model was made considering the needs of the target audience in terms of design, stability, and ease of use for the prototype. The project was modeled starting with the direct and inverse kinematics. Subsequently, the specified geometry was designed, choosing the optimized concept in parameters of strength, weight, and modularity to finally calculate the necessary torques with the dynamic model and identify the workspace. The electronic components were selected by means of matrices comparing suitable options with respect to the present application. The various systems were integrated through a Raspberry Pi 4 card, which processes the action performed by the user detected by artificial vision to send it to the chess engine, which responds with a coherent movement. This movement is finally performed by the robotic arm. A 7" IPS touch screen was integrated for data display and navigation through a pediatric oriented HMI. Additionally, sound feedback and decorative lights were added to stimulate the user's attention. The manipulation system together with the electronic and digital control were analyzed using the ISO9283 standard, obtaining results for position and trajectory. The position parameters showed values of accuracy with ± 2.41 [mm], precision of ± 0.37 [mm] and repeatability with ± 3.52 [mm]. For the detection of movements, filters and image processing were integrated, considering the positions of each chess square and the various pieces in the game. This system was evaluated, obtaining 95.7% accuracy.

Keywords: robotics, recreational activities as therapy, artificial vision, pediatric oncology patients.

Capítulo I

Generalidades

El presente capítulo expone la información previa, tomando trabajos realizados con un enfoque similar al proyecto y colocando sus características. Se detalla la justificación e importancia explicando la situación con respecto al cáncer y sus consecuencias emocionales en los individuos que lo padecen. Se describe el alcance caracterizando cada uno de los subsistemas del prototipo, además de los objetivos generales y específicos.

Antecedentes

Este trabajo inicia a partir de las necesidades encontradas dentro del sistema médico pediátrico, tomando en cuenta la capacidad de presentar un avance tecnológico enfocado al servicio de los pacientes, de manera que se proyecte la robótica como un generador de situaciones favorables en el ámbito social. Se propone el uso de un brazo robótico para el juego en tiempo real y el aprendizaje de ajedrez, usando software computacional automatizado que responda de forma autónoma y acorde a la situación, esto con interacción mediante una pantalla táctil y retroalimentación auditiva.

Robótica educativa

La creación de la robótica marcó un hito en la historia de la humanidad, sus usos no fueron solamente atribuidos a la industria, con el avance del tiempo, se han generado invenciones en diversos campos. Dos de ellos siendo el de educación y el de desarrollo de interacciones sociales en las personas con capacidades especiales. Con estas posibilidades se ha provocado un nuevo planteamiento de enseñanza originando métodos más eficaces, óptimos e innovadores, a tal grado que varias instituciones a lo largo del mundo han incluido en sus planes educativos la interacción humano-máquina (Sánchez Sánchez, 2019) (Salinas Gaona, 2020).

Los robots educativos, en primera instancia se utilizaron para fomentar las habilidades motoras

y cognitivas de los estudiantes, generando un ambiente más práctico y didáctico, debido a que se observó un aumento de atención en ciertos temas de estudios dentro de diversas situaciones (Gómez Bustamante & Martínez Cogollo, 2018). Algunos de los proyectos se describen en la Figura 1.

Figura 1

Trabajos que utilizan robótica educativa con niños.

<p>PUSAHQ (Salinas Salinas et al., 2019)</p>	<p>Enfocado a niños de entre 2 y 7 años. Incluye reconocimiento facial, para responder de acuerdo con las expresiones del niño. Mediante una interfaz gráfica se puede acceder a funciones como canciones, cuentos y enseñanza. Incluye visión artificial para reconocimiento de figuras.</p>	
<p>YACHASÚN (Luna Marín, 2018)</p>	<p>Enfocado a niños de entre 3 a 7 años. Dedicado a la enseñanza mediante minijuegos especificados por un tutor académico. Los juegos son accesibles mediante una interfaz gráfica y la interacción es complementada con el asistente robótico</p>	
<p>Realidad aumentada con asistente robótico (Constante et al., 2019)</p>	<p>Enfocado a niños de entre 3 a 8 años. Utiliza la visión artificial para reconocer la posición de las manos del usuario mientras se realizan juegos de enseñanza, el robot genera gestos básicos a través de un panel en su cabeza y luces llamativas.</p>	

Nota. Se describen tres trabajos con su público objetivo y características relevantes.

Con respecto a las áreas hospitalarias pediátricas, se posee un alto margen de mejoras para la educación de los pacientes en tratamiento. En los proyectos que han introducido plataformas o kits de

robótica como KIBO (González-González et al., 2021), LEGO, NAO (Nuncira et al., 2019), entre otros; se ha evidenciado progreso en la respuesta emocional de los pacientes, como se observa en la

Figura 2 resaltando la cantidad de emociones antes y después de la interacción robótica, además de menores niveles de estrés y mayor aceptación en tratamientos, cabe recalcar que no solamente se incluye la interacción de las manos, también se evidencian rutinas de baile, ejercicio y/o preparación de talleres especializados en áreas de conocimiento como programación.

Figura 2

Comparativa del número de emociones antes y después del proyecto clasificadas por categorías simples.



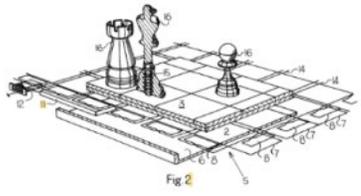
Nota. Tomado de “Robótica educativa en contextos inclusivos: el caso de las aulas hospitalarias”, por C. González-González et al, 2021, *Educación XX1*, 24 (1).

Automatización del ajedrez y tableros electrónicos

La automatización del juego ajedrez es una idea que apareció desde tiempos remotos, concretamente en el siglo XVIII, donde ya se realizaban intentos, uno de los más famosos “El Turco”, que derrotó a gran cantidad de personas, resultó un engaño (Portillo Raya, 2019). Desde allí personas e instituciones han intentado crear sistemas de respuesta automática y programada para los movimientos de ajedrez. Finalmente, para la década de los 50 al crearse los computadores electrónicos, aparecieron los primeros motores programados para jugar ajedrez, siendo capaces de realizar estrategias y deducciones lógicas en base a juegos previos de expertos en el campo, como se observa en (Shannon, 1950), siendo este uno de los primeros trabajos sirviendo de guía para posteriores desarrolladores.

Figura 3

Prototipos de automatización en tableros de ajedrez.

<p>CHESS CHALLENGER (Kopec, 1988)</p>	<p>Primer tablero de ajedrez electrónico, desarrollado en 1977. Posee una comunicación mediante pulsación de botones para indicar el movimiento realizado. Incluía un microprocesador, pantalla y botones para el juego.</p>	
<p>Dispositivo para detectar piezas de juego en un tablero. (Bulsink, 1998)</p>	<p>En el año 1998 se patenta un dispositivo compuesto de 8 filas y 8 columnas de bobinas por debajo de una carcasa de madera. Estas bobinas permiten la detección de la posición de las piezas en un tablero de ajedrez.</p>	
<p>Prototipo de tablero de ajedrez con reconocimiento de tipo y posición de piezas en tiempo real. (Guarín, 2009)</p>	<p>Utiliza sensores de efecto Hall e imanes en cada una de las piezas, la variación de señales en una posición determinada de columna y fila, especifican un movimiento en una casilla del tablero.</p>	
<p>Integración de IA y visión artificial para jugar ajedrez con el robot Baxter. (Asiain, 2018; Portillo, 2019)</p>	<p>En esta investigación se evidencia el uso del aprendizaje continuo en el juego de ajedrez, de manera que se produce un aumento en el porcentaje de victoria del robot. El tablero se analiza mediante una cámara para los movimientos del juego.</p>	

Nota. Cada uno de los prototipos posee su referencia bibliográfica y sus características relevantes.

De la misma forma en que las personas han deseado realizar automatización en este tipo de juego, se han realizado avances con respecto a la forma de jugarlo, un elemento principal del ajedrez es su tablero, el cual consta de 64 espacios cuadrados en donde se mueve cada una de las piezas, por lo

cual constituye uno de los elementos seleccionados al añadir funcionalidades. Estos tableros han variado en diseño, optimización, características, ventajas y funcionalidades. Varios trabajos se han realizado a lo largo del tiempo (Figura 3).

Reconocimiento mediante visión artificial

Desde los inicios de la computación, la cual permitió un avance en el procesamiento lógico de actividades, se ha intentado emular las capacidades humanas, la visión artificial es un producto de ello. Esta se basa en el análisis del espacio tridimensional en base a capturas de imágenes mediante un instrumento o sensor (cámara) del espectro de colores en la luz reflejada por los diversos materiales, estas imágenes son procesadas de acuerdo con distintos tipos de funciones, algoritmos o condiciones en base al tipo de análisis deseado (Sanabria S & Archila D, 2011).

Para una operatividad óptima en algoritmos de visión artificial se deben incluir características mínimas como: detección de partes o conjuntos, especificación de posición y orientación de objetos, obtención y ubicación de rasgos relevante en los objetos, entre otras (Sobrado, 2003).

Usada en ámbitos como (Sanabria S & Archila D, 2011):

- a) Medicina: Para localización de diversos tipos de enfermedades visibles en imágenes, distribución automática de elementos microscópicos.
- b) Industria: Detección de fallas en la manufactura
- c) Seguridad: Detección de transeúntes, reconocimiento de acciones en contra de la ley y atracadores.
- d) Robótica: Manipulación de objetos mediante su reconocimiento y ubicación dentro del espacio de trabajo.

Trabajos previos

Los robots con interacción en tiempo real y la automatización en el ajedrez son puntos

principales dentro del presente trabajo. Los proyectos relacionados incluyen estos puntos, se presentan a continuación cada uno de ellos en la siguiente figura.

Figura 4

Trabajos existentes relacionados con el tema del presente proyecto.

<p>Diseño de un sistema robótico educativo para jugar al ajedrez con robots industriales. (Jiménez, 2019) Internacional</p>	<p>Es posible realizar juegos de ajedrez en tiempo real. Se emplea un robot ABB-IRB-120 conectado a un PC mediante TCP/IP. Se utiliza Matlab para el control del robot y comunicación con un motor de ajedrez.</p>	
<p>Diseño y construcción de un robot social interactivo para la enseñanza de ajedrez a niños de 6 a 9 años. (Zúñiga, 2021) Nacional.</p>	<p>Un proyecto que incluye interacción social mediante estímulos auditivos y expresiones faciales, motivando de tal forma el aprendizaje del ajedrez. Utiliza Arduino para el control, sensor de color y sensores magnéticos para las funciones de reconocimiento de piezas.</p>	
<p>Diseño e implementación de un módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez en la empresa INVESPOL. (Carrera Chico & Morales Mosquera, 2017) Nacional.</p>	<p>Se construyó un módulo robótico capaz de ejecutar movimientos de ajedrez. El tablero está proyectado desde debajo de la mesa, el robot es de tipo cartesiano con 3GDL. Tiene una interfaz táctil para la interacción. Se utiliza una Raspberry como tarjeta de adquisición y se programó la interfaz en C++.</p>	

Nota. Se presentan 3 trabajos diferentes con su respectiva cita bibliográfica y descripción de características.

Justificación e Importancia

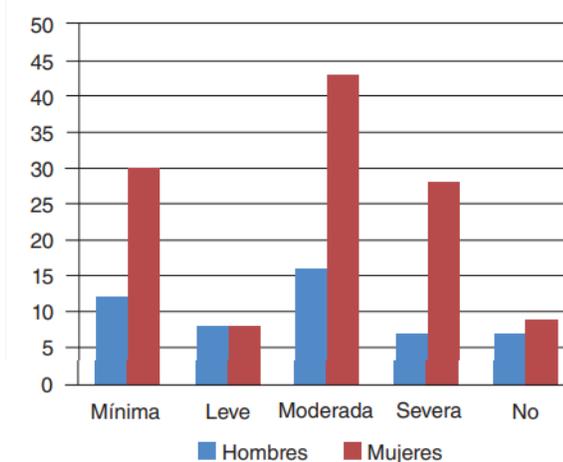
Según la Global Cancer Observatory (Globocan), agencia internacional para la investigación sobre el cáncer, cada año se presentan aproximadamente 1027 nuevos casos de cáncer infantil

(menores de 20 años) en el Ecuador, además en 2022 se estima que existen por lo menos 16.1 casos por cada 100 000 habitantes. Esto quiere decir que existen cerca de 3000 niños con cáncer en el país en 2022 (Organización Panamericana de la Salud, 2021). La Organización Mundial de la Salud, en su informe de cáncer del Ecuador (World Health Organization, 2020), evidencia la leucemia, tumores y linfoma de Hodgkin como las tres causas más comunes de cáncer infantil. Además, informa que en el país no existen programas o guías para una detección temprana de las patologías.

Dentro de encuestas realizadas para el *Journal of Cancerology*, (Villacrés-Montesdeoca et al., 2018), se evidencia una alta manifestación de depresión en pacientes oncológicos, solamente el 9.52% no la presenta, un 35% evidencia depresión moderada y el 21% de los encuestados posee depresión severa, estas condiciones involucran a pacientes hospitalizados y/o en cuidados intensivos. Los resultados se evidencian en la Figura 5.

Figura 5

Niveles de depresión clasificados por género.



Nota. Tomado de “Depresión en el paciente oncológico en Quito, Ecuador” (p. 115), por L. Villacrés-Montesdeoca et al, 2018, *Journal of Cancerology*.

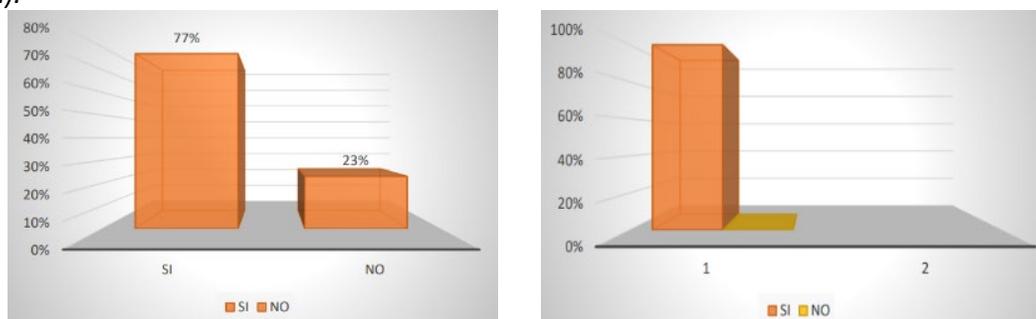
Estudios realizados dentro del hospital SOLCA, en su matriz Guayaquil, recogen datos con respecto al uso de juegos en pacientes oncológicos pediátricos durante la hospitalización (Monge

Yasbek, 2020). Este trabajo evidencia resultados positivos en el desarrollo de habilidades sensoriales, motoras, cognitivas, sociales y de regulación emocional. En la Figura 6 se puede evidenciar que, previo a la aplicación de los juegos, se mostraba un 23% de rechazo por parte de los representantes de cada paciente, sin embargo, posterior a la inclusión de juegos en la rutina terapéutica, se genera un 100% de aceptación, sugiriendo mantener esta modalidad durante la fase de hospitalización.

De la misma forma, en el estudio realizado por Noboa Parreño (2015), se evidencia una reducción de hasta el 61% de la ansiedad presente en los pacientes de entre 5 a 13 años como se observa en la Figura 7, siendo el resultado de la integración de juegos interactivos durante el tratamiento hospitalario.

Figura 6

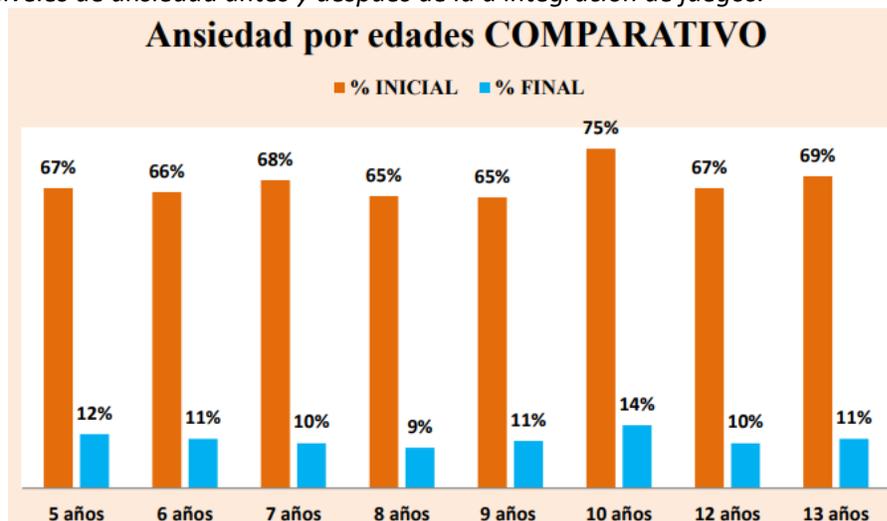
Aceptación de integración de juegos a hospitalización. Previo a estudio (izquierda), posterior a estudio (derecha).



Nota. Adaptado de "Implementación del juego como herramienta terapéutica en pacientes oncológicos preescolares hospitalizados" (p.68-69), por M. Monge, 2020, [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]

Figura 7

Comparación de niveles de ansiedad antes y después de la integración de juegos.



Nota. Tomado de “Incidencia del juego terapéutico en la modificación del estado emocional en niños, niñas y adolescentes diagnosticados con cáncer que acuden al Hospital Pediátrico Baca Ortiz, al Programa de Aulas Hospitalarias de la Fundación Juan José Martínez de la Ciudad de Quito” (p.80), por M. Noboa, 2015, [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador]

El ajedrez por su parte está ampliamente aceptado como uno de los deportes/juegos más beneficiosos para la salud, como lo mencionan Aciego, García & Betancort en su investigación, el ajedrez sirve para mucho más que mejorar las capacidades cognitivas, beneficia también el desarrollo socio personal y ayuda a moldear las capacidades de afrontar y resolver problemas en niños y adolescentes (Aciego et al., 2011).

En varias localizaciones del planeta ya se usa el ajedrez con fines sociales y terapéuticos, como ejemplo en España, en donde la Asociación de Padres de Niños Oncológicos de Aragón (ASPANOA) en conjunto con varios entrenadores de ajedrez imparten clases de ajedrez a pacientes pediátricos oncológicos, teniendo como objetivo divertir a los niños pasando un rato agradable mientras aprenden un juego que estimula sus capacidades cognitivas y sociales (Marín, 2015). Estudios de psicología como el desarrollado por Parrales (2018) describen al ajedrez como aptos para incentivar la adaptación

muscular, desarrollo y fortalecimiento de la creatividad en pacientes en fase de tratamiento para leucemia, en conjunto con juegos como rompecabezas, mémoris o *Legos*.

Como se evidencia, la integración de actividades o juegos interactivos mientras el paciente se encuentra en un tratamiento hospitalario permite la reducción de los niveles de ansiedad, estrés, depresión y demás emociones que inciden en un estado psicológico negativo. El ajedrez considerado como un juego o actividad lúdica puede ser añadido al tratamiento de pacientes oncológicos pediátricos en el Ecuador, que como se mencionó anteriormente protagonizan un número alto y creciente dentro del territorio ecuatoriano.

El proyecto que se propone en el presente documento tiene como fin crear una potencial forma de apoyo a la mejora del estado anímico en los pacientes oncológicos pediátricos, mediante el diseño y construcción de un prototipo que incluya un tablero de ajedrez con interacción en tiempo real, para la enseñanza del juego y para realizar partidas humano máquina, este tablero tendrá una interfaz amigable para niños y adolescentes, de manera que su interacción sea intuitiva y rápida de aprender.

Alcance

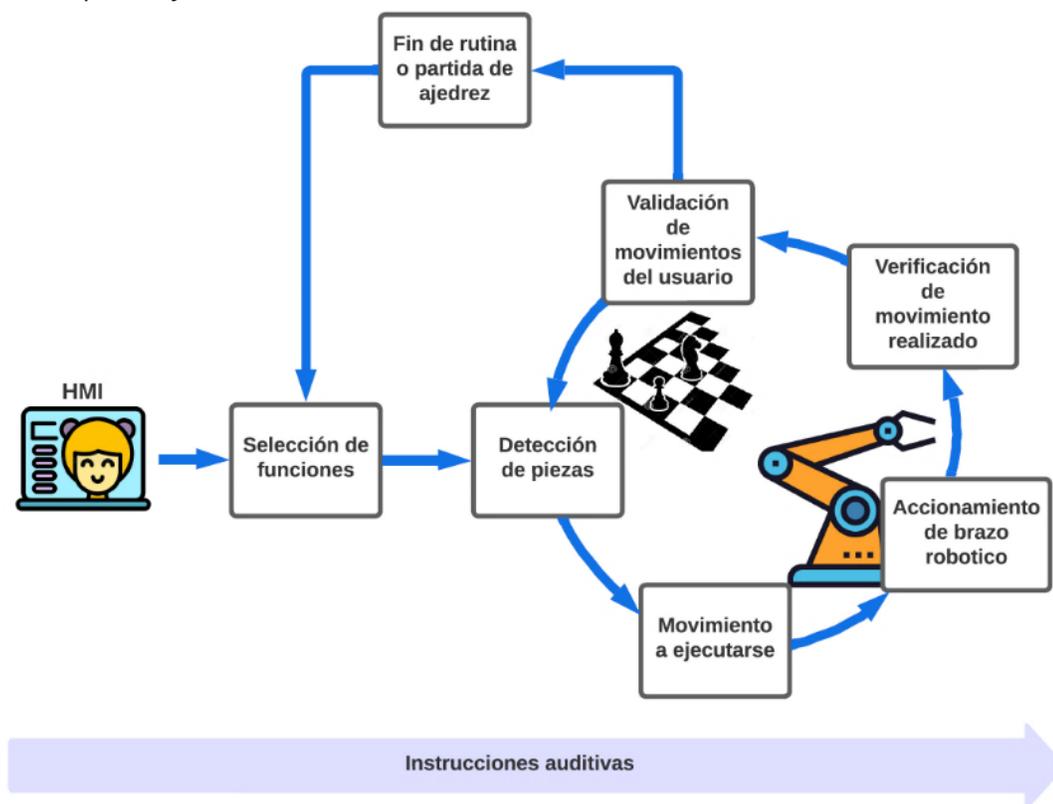
El proyecto consiste en la construcción de un sistema de interacción en tiempo real adecuado para la enseñanza y juego de ajedrez, este poseerá una interfaz humano-máquina que permitirá seleccionar los diversos modos de funcionamiento. Así mismo, cada una de las fases en el curso de aprendizaje para el ajedrez, desde un nivel bajo hasta avanzado. La interacción y movimientos serán realizados mediante un brazo robótico con capacidad de posicionamiento y rotación en el espacio tridimensional, las diversas rutas de este serán decretadas mediante el análisis de la ubicación de las piezas en cada uno de los casilleros del tablero. Adicionalmente, incluirá instrucciones auditivas para el usuario. El proceso de funcionamiento se simplifica en el diagrama de bloques que se muestra en la

Figura 8.

Para su diseño y construcción será necesaria la investigación pertinente en estado del arte reconociendo la información esencial. En los siguientes puntos se dividen los diversos subsistemas en el proyecto para un mayor detalle.

Figura 8

Diagrama de bloques de funcionamiento.



Subsistema Mecánico

Dentro del diseño mecánico se tomará en cuenta la estructura del brazo robótico con cada una de sus partes, siendo este un SCARA realizando el respectivo análisis de cinemática directa e inversa para sus 3 GDL, incluyendo así conceptos como Denavit-Hartenberg, desacople cinemático, jacobiano y, por ende, matrices homogéneas. Esto permitirá un correcto movimiento a través del espacio tridimensional.

Además, se incluirá el análisis estático para el tipo de aplicación del presente proyecto, ayudando a la validación de los materiales utilizados en la construcción. Las fuerzas presentes en el movimiento del brazo robótico deben ser calculadas mediante la dinámica, esto será realizado para un dimensionamiento correcto de actuadores.

El espacio de trabajo del brazo robótico tomará en cuenta el alcance necesario para asegurar un buen funcionamiento y movimiento de cada una de las piezas dentro de las casillas del tablero de ajedrez. El tamaño de tablero recomendado es de aproximadamente 30 cm x 30 cm, por tanto, se asegurará un rango de cobertura completo, además, la carga presente para el robot se encontrará entre 4 a 12 gramos, esto varía de acuerdo con el material de las piezas de ajedrez.

Los materiales seleccionados para la construcción serán aptos para las necesidades encontradas en el tipo de aplicación del presente proyecto, tomando en cuenta una estética agradable para el usuario y comodidad de uso. Además, de garantizar la seguridad de uso.

Subsistema Electrónico y Control

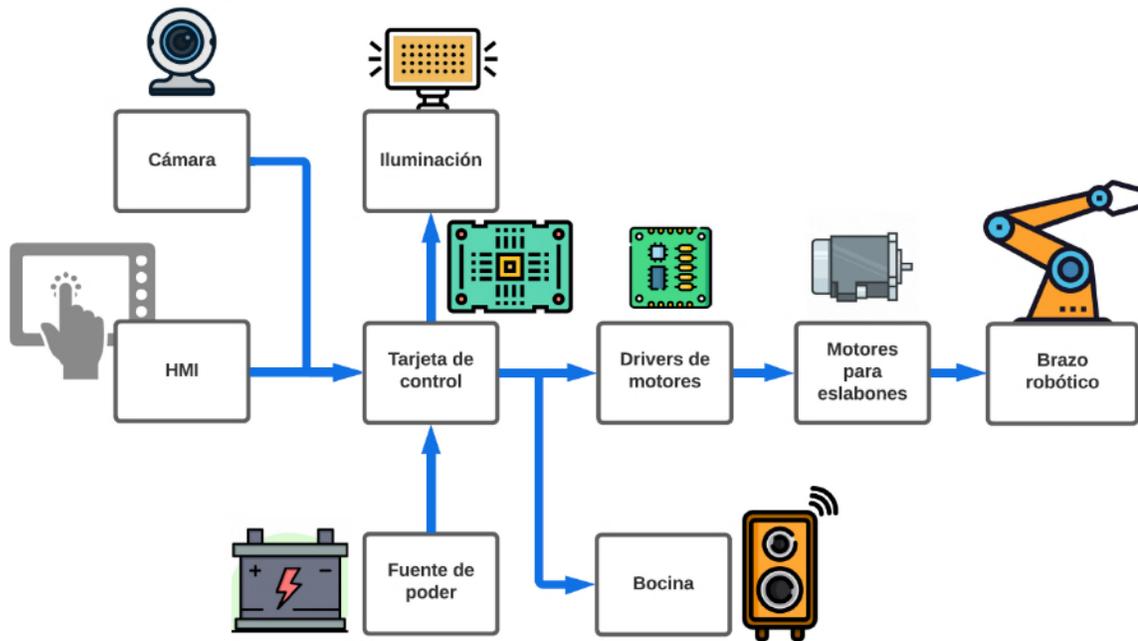
El diseño electrónico será realizado en base a las principales necesidades del proyecto, las cuales son el movimiento generado por los motores y el microprocesador que manejará las decisiones de traslación y rotación, así como los modos de funcionamiento en el sistema. Para ello, primeramente, se necesitarán drivers para un direccionamiento de corriente correcto, la cual variará en magnitud de acuerdo con el torque efectuado en el movimiento de articulaciones. La conexión hacia la tarjeta de control también tomará en cuenta el uso que poseerá, optimizando las necesidades para la cantidad de entradas y salidas, velocidad de procesamiento, espacio en memoria volátil y no volátil, además de la precisión numérica necesaria.

La interacción con el usuario se posiciona de igual manera como un punto principal para la

construcción del prototipo, este contará con una pantalla para visualizar los diversos tipos de funcionamiento del sistema, permitir seleccionar el tema de aprendizaje y especificar una partida de juego en tiempo real con dificultad a criterio del usuario. Esta pantalla se conectará a la tarjeta de control para la obtención y envío de datos pertinentes conforme el usuario interactúa, finalmente, se incluirá un sistema de sonido que permitirá una comunicación mucho más natural y fluida con el paciente. Todo el sistema integrado se puede observar en la Figura 9.

Figura 9

Diagrama de sistema integrado.



Subsistema de Tecnologías de la Información

En este punto se programará todo lo necesario para el correcto funcionamiento del dispositivo. Se usará Python como lenguaje de programación principal debido a dos motivos, el primero es la mayor viabilidad de implementación de la visión artificial, esta se aprovechará para las funciones de reconocimiento de las fichas de ajedrez en las distintas posiciones a lo largo de una partida. También

Python es conveniente debido a que una gran cantidad de motores de juego para ajedrez han sido creados con este lenguaje, añadido a esto, existe una mayor facilidad de integración en proyectos de código abierto, el motor que más se adecúe será utilizado para la función de juego humano vs máquina.

Una tarjeta de control será la encargada de manejar el programa y sus comandos para la dinámica del robot, así como la integración de sus funciones con el tablero de ajedrez, además, también será la encargada de ejecutar la interfaz gráfica diseñada específicamente para ser intuitiva y fácil de usar por niños y adolescentes, dicha interfaz estará proyectada en una pantalla táctil de tamaño apropiado para una correcta visualización (aproximadamente 4 pulgadas).

Las dos funciones principales del dispositivo son las de enseñanza de ajedrez y la de juego humano contra máquina, estas opciones podrán ser seleccionadas directamente desde la interfaz por medio de la pantalla táctil, la función de enseñanza incluirá distintos módulos, desde el aprendizaje de las posiciones iniciales de cada pieza, pasando por los movimientos permitidos, hasta estrategias básicas de juego. Además, el juego contra la máquina permitirá elegir el nivel de dificultad.

Integración y Validación del Prototipo

Como parte final del proceso se realizará la construcción e integración de todos los componentes. La validación se realizará mediante ensayos en laboratorio, realizando mediciones de precisión y exactitud del movimiento en el brazo robótico. Además, comprobando la confiabilidad en la detección de las piezas, tiempos de respuesta y coherencia de juego de ajedrez. Con la retroalimentación de estos se podrán realizar las correcciones pertinentes. Cabe mencionar que el prototipo no será probado con pacientes oncológicos pediátricos.

Objetivos

Objetivo General

Diseño y construcción de un prototipo robótico para la enseñanza y juego del ajedrez con potencial aplicación a la mejora del estado anímico en pacientes oncológicos pediátricos.

Objetivos Específicos

- Modelar analíticamente la cinemática y dinámica directa e inversa del brazo robótico para el posicionamiento y orientación del efector final.
- Diseñar y construir los componentes del brazo robótico y añadidos del tablero de ajedrez usando herramientas CAD/CAE para validar su funcionamiento.
- Diseñar e implementar un sistema de visión artificial para el reconocimiento de las piezas de ajedrez y sus movimientos.
- Dimensionar y seleccionar los componentes electrónicos que permitan el control del brazo robótico en tiempo real.
- Implementar el motor de ajedrez al software encargado del control del brazo robótico y al programa de visión artificial.
- Diseñar una interfaz gráfica interactiva intuitiva y orientada a niños y adolescentes para la selección de las funciones del tablero.
- Integrar los distintos subsistemas para el correcto funcionamiento del tablero.
- Realizar pruebas de funcionamiento en laboratorio que permitan validar el desempeño y consecución de objetivos por parte del prototipo.

Estructura del Documento

Dentro del documento se encuentran 5 capítulos. El capítulo I, incluye información de

antecedentes, justificación e importancia del proyecto tomando en cuenta su enfoque, el alcance del proyecto, finalmente los objetivos generales y específicos. En el capítulo II, se detalla la investigación de cada uno de los conceptos relevantes y temas de importancia para la comprensión correcta del trabajo. El capítulo III describe el diseño y construcción del prototipo, incluyendo cada una de sus partes mecánicas, electrónicas y el sistema de control. Para el capítulo IV, se incluyen las pruebas, análisis y resultados finales obtenidos del sistema en conjunto. Finalmente, el capítulo V consiste en las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Conclusión

La robótica educativa funciona como una herramienta que aumenta la capacidad de retención y produce mayores niveles de atención en el ambiente que es usado, dentro de entornos hospitalarios los resultados apuntan hacia un crecimiento de emociones positivas, con aproximadamente un 200% de mejora. Con lo cual esta integración de sistemas se adecúa para el planteamiento del presente proyecto, incluyendo de la misma forma la automatización en tableros de ajedrez que ha sido evaluada desde los años 80 y que continuamente se mejora, conforme se producen mejores tecnologías. Los casos de estudio en pacientes oncológicos pediátricos muestran una alta incidencia de depresión evidenciando el alto nivel de atención que este problema requiere, proponiendo soluciones para reducir tal valor. El 90.48% de encuestados poseen depresión, llegando hasta el 35% con depresión moderada y el 21% con depresión severa de acuerdo con el Journal of Cancerology. La implementación de juegos provee resultados satisfactorios para la reducción de ansiedad en pacientes hospitalarios, con un 61% disminuido. Al describir los sistemas del presente proyecto es posible orientar el diseño, construcción y análisis hacia objetivos por cumplir y requerimientos medibles. Estos sistemas son: mecánico, electrónico y de control, además de tecnologías de la información.

Capítulo II

Investigación Bibliográfica

En este capítulo se describen los conceptos basados en una investigación bibliográfica, incluyendo datos de la enfermedad de cáncer en el Ecuador con estadísticas de organismos internacionales. El uso de actividades lúdicas como terapia, entre ellas el ajedrez enfocado a niños se incluyen con resultados y análisis en trabajos previos. La robótica se explica tomando en cuenta el contexto educativo y hospitalario, con casos de estudio previos al proyecto. Las tecnologías de sistemas mecatrónicos, visión artificial, motores de ajedrez e interfaz de comunicación humano-máquina son detalladas con cada una de sus características, contemplando las etapas de procesamiento, los tipos de tecnología y sus capacidades.

Cáncer en el Ecuador

Según la Organización Panamericana de la Salud (2021) las cifras de casos de cáncer emergentes ascienden hasta 20 millones en todo el mundo y para el año 2020 las muertes llegan hasta 10 millones de personas. Es una de las enfermedades con proyecciones mayores al 50% de crecimiento en los próximos veinte años.

Se estima que en 2020 causó 1.4 millones de decesos en toda América, 4 millones de personas tuvieron cáncer ese año y para 2040 existirán al menos 6 millones de casos nuevos (Organización Panamericana de la Salud, 2020).

En el caso concreto de Ecuador, en 2020 se registraron 29273 casos nuevos de cáncer, los diez más comunes fueron, cáncer de mama, próstata, colon, estómago, tiroides, cuello uterino, linfoma no Hodgkin, leucemia, pulmón e hígado. Para el caso de niños y adolescentes.

La Organización Panamericana de la Salud (2021) declara que el 3.5% de casos actuales de toda

la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC) están presentes en el Ecuador, con una cifra de 1027 casos nuevos cada año para personas menores a 20 años. Además, señala que los tipos de cáncer más comunes son la leucemia linfoblástica aguda (26.5%), linfoma de Burkitt (1.7%), linfoma de Hodgkin (3.5%), retinoblastoma (3.8%), tumor de Wilms (4%), gliomas de bajo grado (6.9%).

Actividades lúdicas como terapia

La hospitalización y los tratamientos hospitalarios no poseen un carácter agradable para los pacientes, en especial los niños, los cuales al presentar problemas graves que requieren una presencia permanente en el hospital dejan de realizar actividades recreativas y no siguen su vida de una manera regular, presentando de esta manera depresión, soledad, ansiedad y encierro. Sienten que pierden tiempo valioso de su infancia y no son capaces de realizar actividades normales para niños de su edad. Por tanto, se requiere una alta capacidad de adaptación a todos estos cambios, así como actividades que faciliten tal adaptación. (Lopes Amaral de Souza et al., 2021)

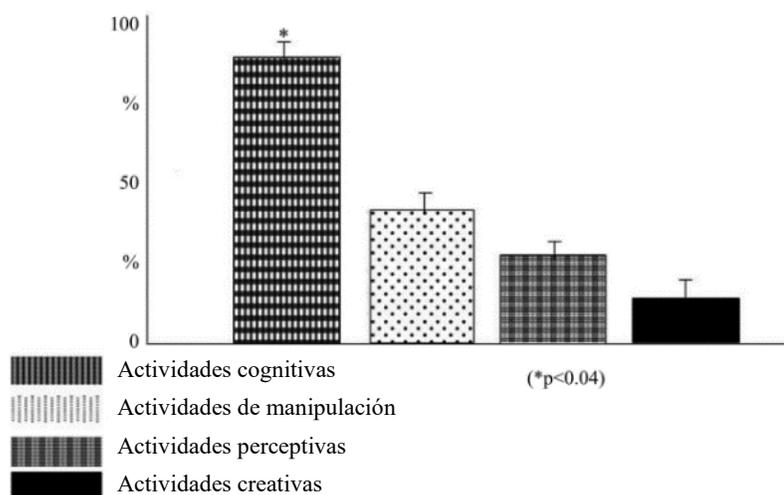
Es importante definir que para todas estas dificultades regularmente se generan soluciones y nuevas formas de complementar los tratamientos hospitalarios, sea creando experiencias inmersivas de aprendizaje con tecnología o juegos. Obteniendo resultados positivos con la introducción de juegos en la rutina de los pacientes, además, la tecnología juega un papel importante en proporcionar herramientas para producir emociones positivas y otras con relaciones interpersonales. (Marques da Rosa, y otros, 2022).

La inclusión de actividades cognitivas sea de forma cooperativa o individual son las preferidas por los pacientes para el entretenimiento dentro del ambiente hospitalario con un 40% más de frecuencia y adherencia con respecto a actividades de manipulación, perceptivas o de creatividad (Figura 10). Se validan los resultados de una mejora en el estado de ánimo percibido de los pacientes

con entrevistas a personal hospitalario y familiares produciendo resultados positivos. (Nascimento et al., 2019).

Figura 10

Porcentajes de frecuencia y adherencia en actividades realizadas por pacientes.



Nota. Adaptado de "Child Oncology and Hospital Recreation" (p.160), por C. de Maria Lima Nascimento, 2019, *Journal of Cancer Therapy*, 10.

Se han realizado más proyectos para una mejora anímica y de recepción de tratamiento en pacientes oncológicos pediátricos con un enfoque más tecnológico, incluyendo el análisis de diversos juegos enfocados en contribuir a la comprensión de los tratamientos y de las funciones biológicas del cuerpo por parte de los pacientes (de la Hera Conde-Pumpido, 2018); además, el diseño de juegos terapéuticos interactivos orientados a entretener y a la vez englobar aspectos como el estado del paciente, calidad de comunicación con sus parientes y autopercepción de los pacientes con respecto a mejorías en su enfermedad. Evidenciando dentro de la investigación la atracción de los niños hacia una alta cantidad de colores y brillo en los objetos con los cuales pueden interactuar. (H. Rodrigues, F. Conrado, & A. Neris, 2018)

Ajedrez en edades tempranas

El ajedrez es un juego de mesa para dos jugadores, originado en la India a finales del siglo VI, consta de un tablero de ocho por ocho casillas, cada jugador dispone de 16 piezas, que incluyen al rey, reina, alfiles, torres, caballos y peones. Es ampliamente conocido en todo el mundo como un juego de inteligencia, y del cual se realizan torneos y campeonatos en todos los niveles. Dado que el ajedrez es un juego de inteligencia y ayuda a desarrollar el pensamiento estratégico y las habilidades de resolución de problemas de los niños, también puede ser efectivo para mejorar las habilidades cognitivas (Ayper, 2016).

Según Adams (2012) el ajedrez es lo suficientemente versátil para ejercer un cambio dentro de otras áreas académicas con el aumento de la destreza por parte del individuo hacia tal juego.. Milat (1997) asegura que el ajedrez ayuda a las personas a enriquecer las habilidades de resolución de problemas, mejorar el pensamiento inteligente y mejorar las habilidades de pensamiento estratégico e incluso mejora la autoestima. Adicionalmente, menciona que países donde los estudiantes juegan ajedrez, estos se encuentran entre los mejores estudiantes en matemáticas y ciencias.

Pérez (2015) afirma que el ajedrez puede contribuir al desarrollo integral de un niño, especialmente si se lo practica desde las edades de 4 a 5 años, pues constituye una actividad que mejora el desarrollo intelectual, favorece la comunicación e interacción del niño con las personas que lo rodean, de esta forma desarrolla habilidades y capacidades para su posterior desempeño en la vida social.

Robótica educativa

En los últimos años la tecnología relacionada con ordenadores, inteligencia artificial, motores eléctricos, baterías, algoritmos de control, entre otras; han provocado una mejora en el campo de la robótica. Aumentando con ello la disponibilidad de los robots de diversos tipos, siendo así más atractiva

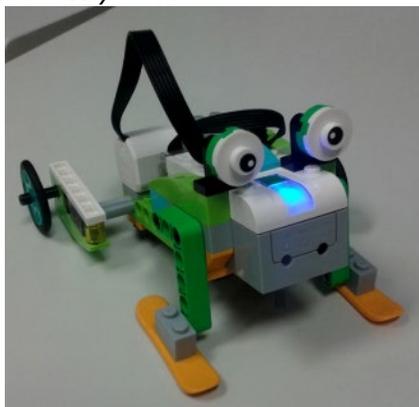
la idea de incorporarlos dentro de ambientes convencionales, como lo son las aulas.

Se produce un incremento notable en la comprensión y aumento de capacidad de concentración en los infantes al usar la denominada "Robótica Educativa" creando un ambiente diferente al habitual dentro de aulas o espacios de aprendizaje, esto puede ser usado en una amplia cantidad de áreas (IGNITE Online, 2020; Revista UNIR, 2019).

La integración de tecnologías en las aulas es esencial para producir un manejo apropiado de las herramientas digitales, así como una potenciación de la información para que esta pueda convertirse en conocimiento; dentro del desarrollo conceptual en niños y niñas es importante la manipulación de objetos con materiales atractivos para ellos (Figura 11), con lo cual la integración de robótica como herramienta pedagógica es cada vez más atractiva (Vivas Fernandez & Sáez López, 2019).

Figura 11

Robot usado para actividades lúdicas en niños y niñas.



Nota. Tomado de "Integración de la robótica educativa en Educación Primaria" (p.113), por L. Vivas & J. Sáez, 2019, *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*.

La creatividad es un factor que se involucra para esta área de la robótica, esto genera interés debido a que se produce desarrollo en habilidades cognitivas, pensamiento lógico y formal. La búsqueda de este desarrollo permitió llegar a este tipo de soluciones que tratan de incluirse cada vez más.

La integración de nuevas tecnologías permite una mayor comunicación por parte de los

docentes, y si, la enseñanza es en esencia comunicativa, aquellas herramientas que mejoren la comunicación harán lo mismo con el aprendizaje (Gómez, Antonio, & Martínez Cogollo, 2018).

Integración de robótica en instituciones

Aún no se evidencia una integración completa de estas tecnologías dentro del ámbito educativo, sin embargo, existen diversas instituciones que han permitido su análisis en diversos temas y ramas de aprendizaje dentro del sílabo estudiantil. Esta disciplina tiene una aparición reciente en comparación con métodos habituales de enseñanza lo cual promueve un enfoque distintivo con respecto a la educación (Sánchez Sánchez, 2019).

Con la integración de nuevas tecnologías en el día a día, los estudiantes piden su integración en las aulas, de manera que se genere educación mucho más creativa, haciendo que cada estudiante aprenda de manera cooperativa, interactuando con sus iguales y buscando soluciones a retos, estimulando el autoconocimiento y el pensamiento lógico. Este tipo de educación genera motivación en los estudiantes, provocando un aumento en la retención de los conocimientos y mayor tiempo de concentración en cuanto a diversas tareas (Sánchez Sánchez, 2019).

Se ha realizado la incorporación con el objetivo de mejorar la motivación en los estudiantes dentro del aula, de tal forma que la indagación y el ensayo tengan un papel protagónico dentro de las actividades, esto para temas relacionados con matemática y pensamiento computacional (Suárez Zapata et al., 2018).

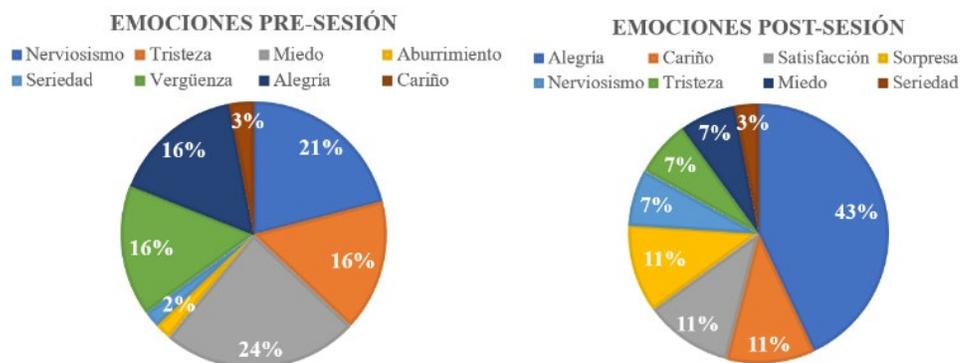
Integración en aulas hospitalarias

La tecnología con todas las ventajas que integra para diversas tareas, tales como la enseñanza, depende de su uso correcto, es decir, se vuelve necesaria la capacitación de los instrumentos

tecnológicos por parte de los docentes, así como para los estudiantes. Según (González-González et al., 2021) la integración de robótica enfocada en la educación para las aulas hospitalarias está relacionada directamente con un objetivo de mejorar las emociones de los niños y niñas, y a la vez provocar que adquieran nuevos conocimientos. En este estudio se incluyeron fases de teoría y práctica, en donde era primordial estimular el pensamiento lógico y computacional previo a realizar experimentación y práctica con los robots. Las emociones que con mayor aumento fueron alegría (22%) y cariño (8%). Aquellas con una disminución pronunciada fueron miedo (17%), tristeza (11%) y nerviosismo (9%). Se puede observar la comparativa de emociones presentes en la Figura 12.

Figura 12

Resultados de evaluación de emociones pre-sesión y post-sesión.



Nota. Adaptado de “Robótica educativa en contextos inclusivos: el caso de las aulas hospitalarias”, por C. González-González et al, 2021, *Educación XX1*, 24 (1).

Cabe recalcar que cada una de las actividades debe ser acoplada al rango de edades con el cual se va a trabajar, por lo tanto, cada uno de los instrumentos usados poseen un atractivo visual evidenciado en colores diversos, brillo en las piezas y diseños con esquinas suaves. Aquí se utilizaron kits KIBO (Figura 13), los cuales incluyen programación de forma gráfica para las acciones a realizar facilitando la comprensión de las rutinas.

Figura 13

Kit de robótica KIBO.



Nota. Tomado de “Robótica educativa en contextos inclusivos: el caso de las aulas hospitalarias”, por C. González-González et al, 2021, *Educación XX1*, 24 (1).

Sistemas de manipulación robótica

Según la Asociación Francesa de Normalización (2019) un manipulador en robótica se define como un mecanismo formado por varios eslabones generalmente en serie, conectados entre sí mediante articulaciones, con la finalidad de agarrar y desplazar objetos, controlado por un dispositivo lógico. Existen diversos tipos o configuraciones de manipuladores robóticos, pero todos estos están conformados por elementos fundamentales, como se describe a continuación:

Articulaciones: Son las uniones entre los eslabones, estas permiten la conexión y el movimiento entre eslabones. Existen dos tipos de articulaciones, las de tipo rotacional y las de tipo prismáticas. Las de tipo rotacional como su nombre indica producen un movimiento de rotación relativa entre un eslabón y el eslabón consecutivo, suelen medirse en radianes o grados sexagesimales. Las de tipo prismático producen un desplazamiento lineal de los eslabones, se utilizan unidades de longitud como el metro para su medición (Reyes Cortés, 2011).

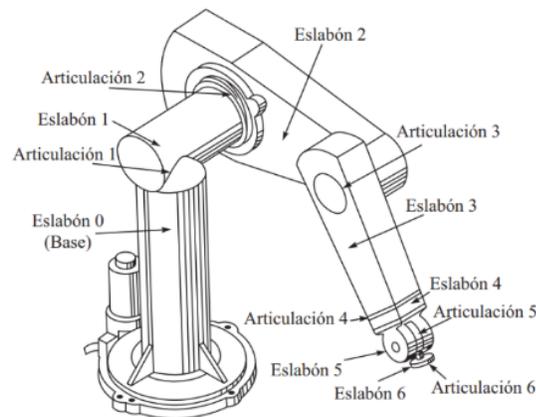
Actuadores: Producen el movimiento de los eslabones, los actuadores más comunes son servomotores, motores paso a paso, elementos neumáticos o hidráulicos (Reyes Cortés, 2011).

Sensores: Dan información del estado del manipulador, generalmente proporcionan datos de posición y velocidad de los eslabones (Reyes Cortés, 2011).

Sistema mecánico: Es la secuencia de eslabones unidos por articulaciones en cadena abierta, que forman la estructura móvil del manipulador (Reyes Cortés, 2011). Esto se puede observar en Figura 14, que cuenta con 6 articulaciones.

Figura 14

Esquema del sistema mecánico de un robot PUMA.

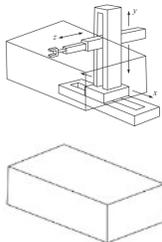
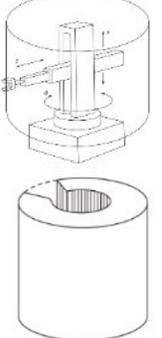


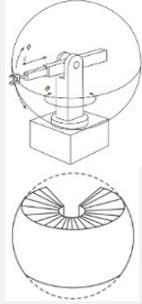
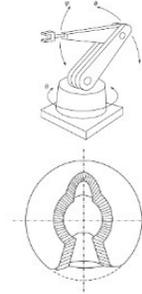
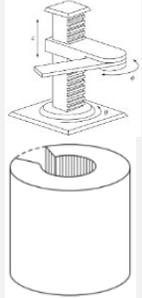
Nota. Adaptado de *Introducción a la robótica*, por S. K. Saha, 2014, McGraw Hill.

Sistema de control: Conjunto de componentes eléctricos y electrónicos, encargados de suministrar la energía y señales de control a los actuadores para producir el movimiento del manipulador, además suele incluirse una interfaz para que el usuario se comunique con el manipulador mediante instrucciones (Reyes Cortés, 2011).

En la actualidad existe una gran variedad de tipos de manipuladores robóticos en la industria, los más comunes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1*Tipos de manipuladores y características principales.*

Tipo de manipulador	Descripción	Usos comunes	Ventajas	Desventajas	Esquema del robot y su espacio de trabajo
Cartesiano	El robot se desplaza de manera rectilínea con dirección de las coordenadas x, y, z (Saha, 2014). Un esquema se observa en la Figura 15.	Pick and place. Operaciones de ensamblaje. Máquinas herramienta. Soldadura con arco eléctrico (Kantar, 2013).	Estructura rígida, posicionamiento preciso del efector final. Facilidad para realizar movimientos en línea recta. Fácil cálculo y programación (Kantar, 2013).	Ocupa un gran volumen en relación con el espacio de trabajo. Alto costo de manufactura. Las superficies de las guías son propensas a ensuciarse (Kantar, 2013).	<p data-bbox="1235 527 1406 695">Figura 15 <i>Esquema robot cartesiano (Saha, 2014).</i></p> 
Cilíndrico	La primera articulación de este robot es de revolución y las siguientes dos articulaciones son prismáticas como se muestra en la Figura 16.	Máquinas de fundición a presión. Operaciones de ensamblaje. Soldadura por puntos (Kantar, 2013).	Alcanza todo a su alrededor. Eje de rotación fácil de sellar. Programación sencilla. Suficientemente rígido (Kantar, 2013).	Dificultad para que el efector llegue al nivel del piso del robot. Movimiento horizontal circular (Kantar, 2013).	<p data-bbox="1235 995 1406 1129">Figura 16 <i>Esquema robot cilíndrico (Saha, 2014).</i></p> 

Tipo de manipulador	Descripción	Usos comunes	Ventajas	Desventajas	Esquema del robot y su espacio de trabajo
Polar	La primera y segunda articulación es de revolución y la tercera es prismática como se muestra en la Figura 17.	Aplicaciones de carga de máquinas (Kantar, 2013).	Gran espacio de trabajo. Llega debajo y arriba de obstáculos. Fácil de programar (Kantar, 2013).	Poco alcance vertical (Kantar, 2013).	<p data-bbox="1235 390 1398 520">Figura 17 Esquema robot polar (Saha, 2014).</p> 
Articulado	Sus tres articulaciones son de revolución con la configuración mostrada en la Figura 18.	Operaciones de soldadura, ensamblaje, mecanizado, pintura (Kantar, 2013).	Sencillez de fabricación y mantenimiento. Gran espacio de trabajo (Kantar, 2013).	Requieren transformaciones matemáticas más complejas para trabajar en coordenadas cartesianas. Se producen redundancias (Kantar, 2013).	<p data-bbox="1235 842 1398 1014">Figura 18 Esquema robot articulado (Saha, 2014).</p> 
SCARA	Cuenta con dos articulaciones de revolución para su alcance y con una articulación prismática para su elevación. Es un tipo de robot cilíndrico.	Pick and place. Operaciones de ensamblaje (Kantar, 2013).	Facilidad de cálculo de posiciones en coordenadas cartesianas. Pequeños en comparación con un cartesiano con el mismo espacio de trabajo. Sencillez de diseño y fabricación (Kantar, 2013).	Aplicaciones limitadas. Redundancia en las articulaciones de revolución (Kantar, 2013).	<p data-bbox="1235 1339 1398 1476">Figura 19 Esquema robot SCARA (Saha, 2014).</p> 

Interacción del sistema mecatrónico en tiempo real

Existen una multitud de formas en la que una herramienta basada en un juego de mesa puede interactuar con el usuario. Omran y Yaser (2018) proponen un sistema de tablero inteligente físico de ajedrez, en el cual al presionar la pieza en la casilla donde se encuentra, se iluminarán las posibles posiciones que dicha pieza puede tomar, de esta forma el usuario recibe la información en tiempo real y de manera exacta, a parte de lo mencionado, el tablero no interactúa de otra forma con el usuario. Este sistema usa un interruptor en cada una de las celdas del tablero, además de luces led individuales para mostrar las jugadas posibles.

Ranganathan (2020) sugiere una herramienta para jugar ajedrez contra la computadora usando un robot de 3 GDL (grados de libertad) rotacionales para la interacción en tiempo real, el diseño del robot es de software libre diseñado por Fablab RUC, en este prototipo, el usuario realiza un movimiento de una pieza, el robot espera un tiempo predefinido, reconoce la jugada realizada por el humano mediante técnicas de visión artificial y responde moviendo sus piezas de manera autónoma.

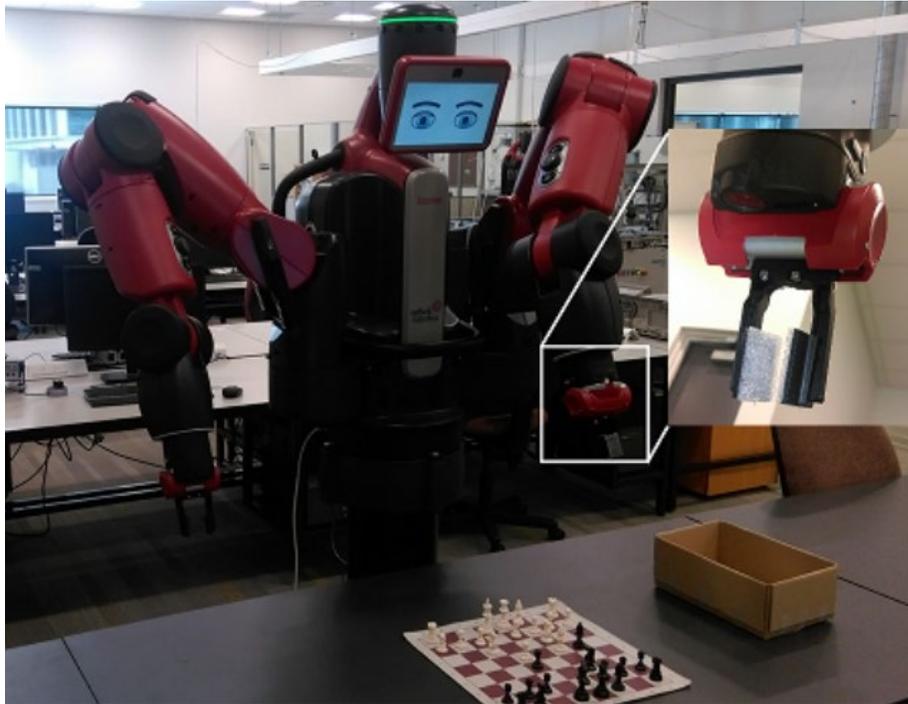
Zurange (2020) propone un concepto similar al mencionado anteriormente, utiliza un robot cartesiano de 3 GDL para realizar el movimiento de la pieza como respuesta a la jugada realizada por el humano, dicha jugada es reconocida mediante una matriz de interruptores magnéticos. En este tablero, el usuario presiona un pulsador para anunciar al robot que culminó con su movimiento.

Chen y Wang (2019) dan una solución sobredimensionada, al usar un robot industrial (Baxter Arm) de 7 GDL para la interacción (Figura 20), la detección de los movimientos se realiza mediante una cámara situada cerca del efector final, cuando es el turno del humano el robot realiza gestos como indicar con la cabeza o interpretar reacciones faciales, imitando el aburrimiento cuando el jugador se demora en realizar la jugada, cuando el humano completa la jugada el robot la detecta automáticamente y procede a realizar su movimiento. En caso de detectar un error o una jugada no

válida, el robot pide asistencia humana para continuar.

Figura 20

Robot Baxter Arm jugando una partida de ajedrez, ampliación en el manipulador y la cámara para la detección.



Nota. Tomado de “Robust computer vision chess analysis and interaction with a humanoid robot” (p. 2), por A. Chen & K. Wang, 2019, *Computers*, 8 (1).

La solución más utilizada según la bibliografía revisada para la interacción humano robot en tiempo real para una partida de ajedrez es la aplicación de un robot, de al menos 3 GDL, el cual sea capaz de realizar jugadas válidas de manera autónoma, además, es importante incorporar una manera robusta para decidir cuando el humano ha terminado su turno, de esta forma se evitarán posibles colisiones entre el robot y el humano.

Visión artificial

Los sistemas de visión artificial se han desarrollado enormemente impulsados por necesidades

industriales, específicamente procesos que requieren de detección, reconocimiento y clasificación de objetos, esto con el motivo de reemplazar la mano de obra humana en dichos procesos realizándolos de manera automática, más rápida y efectiva.

Un sistema de visión artificial permite la extracción de datos relevantes desde una imagen o video incluyendo un conjunto de algoritmos para producir un efecto de similitud al ojo humano, todo esto mediante diversos dispositivos electrónicos y sistemas de procesamiento digital (Viera, 2017).

Según González y Woods (2002) se clasifican en 3 ramas a las aplicaciones de visión artificial de acuerdo con su grado de dificultad:

Bajo nivel: Cuando la entrada y la salida de este proceso son imágenes, es decir, solo se mejoró la calidad con filtros para el ruido, o se cambiaron parámetros de contraste o nitidez.

Nivel medio: Las entradas son imágenes y las salidas son características de esta, cómo bordes, regiones, o intersecciones de líneas. Todo esto se obtiene con la segmentación de imagen.

Nivel superior: En estos procesos la interpretación de datos se efectúa con funciones o algoritmos para los objetos dentro de la imagen.

Elementos de los sistemas de visión artificial

Iluminación

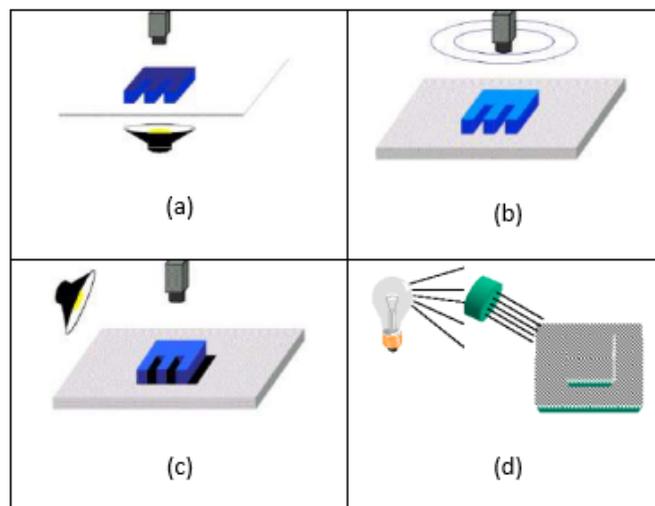
Según Viera (2017) los algoritmos que posibilitan la extracción de datos a partir de imágenes usan como característica principal a la iluminación.

Los objetivos más relevantes que se buscan con una buena iluminación son mantener constantes parámetros como la intensidad y dirección de la luz, así como contrastar de mejor manera los objetos para diferenciarlos del fondo. Una imagen capturada con iluminación adecuada va a poseer menor cantidad de procesamiento, es decir, necesitará menos correcciones mediante software.

Existen dos sistemas para clasificar las formas de iluminación, en base a la dirección y de la fuente. Según la dirección se pueden distinguir, iluminación posterior, frontal, direccional y estructurada, como se muestra en la Figura 21 (Viera, 2017).

Figura 21

Tipos de iluminación usados para visión artificial. (a) Iluminación posterior, (b) iluminación frontal (c) iluminación direccional, (d) iluminación estructurada.



Nota. Tomado de *Procesamiento de imágenes usando OpenCV aplicado en Raspberry Pi para la clasificación del cacao* (p. 36), por G. Viera-Maza, 2017, [Tesis de pregrado, Universidad de Piura].

Dependiendo del tipo de fuente se pueden mencionar: Lámpara incandescente, su ventaja es la alta variedad de potencias, sus desventajas que produce demasiado calor, tiempo de vida corto y variación de la luminosidad con el tiempo; fluorescente, produce una luz brillante sin sombras, sin embargo, tiene poca variedad de formas y suelen tener un efecto de parpadeo; LED, produce una luz difusa muy útil a una intensidad moderada sus principales ventajas son su larga vida útil, bajo consumo de energía, baja producción de calor, tamaño pequeño, barato, robustez (Viera, 2017).

Cámara

La cámara es un dispositivo que captura y almacena imágenes de manera digital, para su posterior procesamiento, existen muchos parámetros que determinan el comportamiento de una

cámara digital como lo son, el tipo de sensor, la resolución, apertura y distancia focal, esto también define su ángulo de visión (Viera, 2017).

Módulo de procesamiento y software

Es una computadora o tarjeta de procesamiento como una tarjeta electrónica Raspberry Pi, Jetson, etc. Este módulo recibe las imágenes capturadas por la cámara y las procesa mediante algoritmos previamente programados para extraer la información requerida para luego tomar decisiones en base a la información adquirida (Viera, 2017).

Etapas de la visión artificial

Adquisición

De acuerdo con Viera (2017) la etapa inicial es la obtención de la imagen, esto se realiza mediante una cámara, dicha imagen se representa a modo matemático en una matriz, los valores de esta son para tres espectros de color (rojo, verde y azul). En esta etapa, además, es donde recae toda la importancia de una adecuada iluminación. Con una etapa de adquisición eficiente se facilita el trabajo de preprocesamiento.

Preprocesamiento

Es el conjunto de métodos que modifican de alguna manera la imagen con el objetivo de mejorar la visibilidad de ciertas características importantes para la posterior adquisición de información. En esta etapa no se agrega información a la imagen, solo se resalta la existente. Algunas técnicas usadas son la disminución del ruido, mejorar el contraste, suavizar bordes corregir el enfoque y realzar contornos (Viera, 2017).

Segmentación

Las características presentes en las imágenes como intensidad, color o textura son extraídas en

este paso, tomando cada una de ellas de acuerdo a las necesidades de la aplicación; en su mayoría las regiones y bordes son resaltados (Viera, 2017).

Extracción de características

Aquí se identifican y describen las características de los objetos que conforman la imagen como el color, la textura, la superficie, su posición, estructura geométrica (Viera, 2017).

Reconocimiento e interpretación

Para este punto se asigna un significado a cada objeto reconocido. Es decir, según las características extraídas en los pasos anteriores se toma una decisión respecto a la aplicación que se le vaya a dar a dicha información (Viera, 2017).

Herramienta OpenCV

Viera (2017) señala que Open Source Computer Visión (OpenCV), fue creado originalmente por Intel para varias plataformas de programación. Adicionalmente, denota que actualmente es la biblioteca de código abierto más popular en aplicaciones de visión artificial, y procesamiento general de imágenes. Es usada en la industria para procesos de automatización y sistemas de seguridad.

OpenCV es una librería de código abierto, esto quiere decir que permite que sea utilizada libremente tanto en proyectos comerciales como de investigación. Aunque esta librería está optimizada para funcionar en procesadores Intel, puede usarse en casi cualquier otro tipo de procesadores, incluyendo los procesadores basados en ARM. Esta librería además puede instalarse en diversos sistemas operativos como Windows, Android, iOS, Mac OS X y GNU/Linux.

Esta librería está escrita y optimizada para los lenguajes de programación C y C++, sin embargo, funciona perfectamente en lenguajes como Python, Ruby, Matlab, entre otros, siendo Python el más utilizado en la actualidad (Viera, 2017).

Uno de los objetivos de OpenCV es proporcionar al usuario una infraestructura accesible y sencilla, que sus funciones puedan entenderse fácilmente e implementarse de manera eficiente a la aplicación requerida. Actualmente, esta librería contiene varios cientos de funciones relacionadas con todas las etapas de la visión artificial explicadas anteriormente.

Motores de ajedrez

El avance en la tecnología de procesamiento en los computadores permitió desarrollar nuevas aplicaciones electrónicas en varios temas de interés. El desarrollo de motores de ajedrez para juego automatizado empezó a volverse más popular alrededor de 1970 cuando se organizaban torneos buscando aquel con mejor desempeño y en 1973 derrotaba al primer gran maestro de ajedrez (Byte Magazine, 1978). En 1997, la empresa IBM desarrolló un computador denominado Deep Blue que derrotó por primera vez a un campeón mundial en ajedrez (Ivec & Vojnovic, 2022). Desde allí se han desarrollado diversos motores de ajedrez que combinan técnicas de búsqueda para los movimientos posibles y más convenientes, algunos de ellos generando los llamados árboles de decisión en donde se consideran valores ponderados para los movimientos de acuerdo al tipo de pieza que se encuentra en cada casilla y otros creados a partir de práctica con redes neuronales e inteligencia artificial, siendo mejorados año con año hasta la actualidad, entre ellos se encuentran Stockfish, Leela Chess Zero, Alpha Zero entre otros (Maharaj, Polso, & Turk, 2022). Gran cantidad de estos motores de ajedrez se han escrito en base a código fuente redactado en "Assembler" con lo cual es posible integrarlo en cualquier tipo de procesador, sea de alta o baja gama. Basado en esto, Stockfish ha sido uno de los más eficientes hasta el momento con un algoritmo de búsqueda óptimo utilizando una técnica llamada alfa-beta (Sójka, 2022).

Interfaz Humano-Máquina

El interfaz humano máquina (HMI), es un panel que permite que un usuario se comunice con una máquina o sistema (Oliveros & Mosquera, 2011). Su diseño está principalmente basado en la ergonomía, es decir, en cómo la persona se comunica con la máquina y qué tan fácil será esta comunicación. Los factores que se buscan en el diseño de una interfaz humano-máquina son principalmente los siguientes: disminuir el riesgo de lesiones, fatiga, error en la manipulación e incomodidad, así como mejorar la calidad de la interacción (Cannan & Hu, 2011). Actualmente se reconocen por lo menos, 5 categorías generales de HMI, las cuales se detallan a continuación.

Figura 22

Componentes de la ergonomía.



Nota. Adaptado de *Human-Machine Interaction (HMI): A Survey* (p. 2), por J. Cannan & H. Hu, 2011, [Reporte Técnico, Universidad de Essex].

Tecnología basada en óptica

El hardware fundamental en este tipo de interfaz generalmente es una cámara, las HMI basadas en esta tecnología, por lo general no requieren que el usuario toque físicamente el dispositivo. Se utiliza el reconocimiento de gestos realizados con las manos o gestos faciales para interactuar con la máquina (Figura 23). Debido a que no se necesita contacto físico suelen ser interfaces efectivas para aplicaciones

públicas.

Figura 23

Reconocimiento de gestos mediante visión artificial, realizados con la mano para controlar un sistema.



Nota. Adaptado de *Human-Machine Interaction (HMI): A Survey* (p. 3), por J. Cannan & H. Hu, 2011, [Reporte Técnico, Universidad de Essex].

Tecnología basada en acústica

Esta tecnología para la HMI se basa principalmente en el reconocimiento de la voz, se convierte palabras habladas que llevan un comando a texto, de esta manera se logra la comunicación del humano con la máquina. El objetivo de este método es reconocer con exactitud la voz de cada persona con un error muy pequeño. No requiere de contacto físico y su hardware principal es un micrófono (Cannan & Hu, 2011).

Tecnología biónica

En este tipo de HMI, el control de la máquina o sistema obedece a la detección y procesamiento de señales provenientes del cuerpo humano, como pueden ser, señales mioeléctricas que son impulsos eléctricos producidos en los músculos, electrocardiogramas que miden la actividad eléctrica del corazón, electro oculografía que mide los movimientos de los músculos oculares. También existe la interfaz cerebro computadora (BCI) (Cannan & Hu, 2011).

Tecnología de movimiento

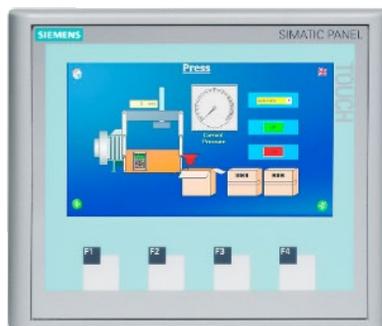
Dentro de este tipo de HMI se encuentran todos los métodos de interacción que mediante sensores pueden de alguna manera detectar movimiento, estos dispositivos suelen incluir, giroscopios, acelerómetro o ambos (Cannan & Hu, 2011).

Tecnología táctil

Esta es la única categoría de HMI de esta lista en la que para la interacción se requiere contacto físico. El dispositivo más básico de esta tecnología es el botón, como podría ser en un teclado o en un tablero de control físico. También en esta categoría se encuentran las interfaces de pantalla táctil, en esta clase de interfaz, se muestra información del proceso y de las instrucciones de funcionamiento del sistema en la pantalla generalmente de manera visual mediante una interfaz gráfica, y la forma de interactuar con ella es presionando con el dedo en el ícono o instrucción mostrada que se quiera realizar. Tiene la ventaja de ser muy intuitiva, suele estar acompañada de una retroalimentación en forma visual para mostrar al usuario que su comando se realizó, también se cuenta como ventaja que actualmente la población está familiarizada con este tipo de interfaz debido a que es la más extendida en el mundo de la informática y los teléfonos inteligentes (Cannan & Hu, 2011). Un ejemplo se muestra a continuación:

Figura 24

Ejemplo de HMI que usa un panel táctil, marca Siemens.



Nota. Tomado de 6AV6647-0AK11-3AX0 – *Industry Support Siemens*, por Siemens, 2022, Siemens

(<https://support.industry.siemens.com/cs/pd/434461?pdtd=td&dl=es&lc=es-EC>).

Recomendaciones de diseño de la interfaz

En su libro *Superar la dislexia*, Luz Rello (2018) provee las siguientes recomendaciones para beneficiar la legibilidad y la comprensión de textos en pantalla para la población en general (Rello Sanchez, 2018).

Tipografía. Se recomienda el uso de fuentes sin serifas, es decir, sin adornos. No se recomienda usar fuentes itálicas o cursivas. Las fuentes recomendadas con estas características son; Sans Serif, Arial, Courier, Helvética y Verdana.

Tamaño de fuente. Se recomienda usar tamaños grandes, estos dependerán del tamaño de la pantalla donde se va a presentar el texto. Se sugiere como referencia un tamaño mínimo de 14 puntos en un tamaño semejante al de una hoja A4.

Espacio entre caracteres y espacio entre líneas. Se recomienda usar el espaciado normal o uno ligeramente más grande.

Léxico. Si el objetivo de la aplicación no es el de aprender vocabulario nuevo, se recomienda emplear palabras de uso frecuente y ofrecer sinónimos en caso de vocablos complejos.

Expresiones numéricas. Se prefiere usar dígitos y porcentajes antes que letras y fracciones.

Conclusión

Con la investigación bibliográfica se identifica el contexto dentro del cual se realizará el prototipo. Los casos de cáncer alcanzan valores de 4 millones de personas para el 2020 con una proyección de aumento del 300% para 2030, evidenciando una mayor necesidad de atención para esta enfermedad. Dentro del ámbito hospitalario, la adherencia mayor se genera en actividades lúdicas y, tomando en cuenta el aumento de emociones positivas como alegría y cariño en un 28 y 8% respectivamente, es adecuado el uso de esta tecnología con el enfoque hacia pacientes oncológicos pediátricos. La información obtenida con respecto a sistemas de manipulación, mecatrónicos y visión artificial permite una comprensión correcta de conceptos para la posterior integración de sistemas.

Capítulo III

Metodología, diseño y construcción del sistema

Este capítulo detalla la metodología basada en objetivos para la designación de tareas y características a cumplir en el proyecto, incluyendo requerimientos de acuerdo con las necesidades del usuario y a través de la investigación previa. Esto comprende cada una de las partes mecánicas y electrónicas. Además, se describe el diseño realizado tomando en cuenta el modelo matemático, selección de materiales con matrices que contrastan las diversas opciones disponibles, el diseño mecánico que incluye modelado asistido por computador con su respectivo análisis estático y dinámico.

La selección de motor de ajedrez, técnicas de visión artificial y los componentes electrónicos son explicadas valorando los requerimientos obtenidos. Adicionalmente, es descrito el diseño de los circuitos de control, especificando cada una de sus funcionalidades; la programación de la visión artificial con cada uno de los pasos realizados dentro del algoritmo; las rutinas de movimiento y el control de posición. Finalmente, se detalla el proceso de construcción del prototipo y su integración de sistemas, con pruebas de funcionamiento preliminares.

Metodología de diseño

El presente proyecto se realizará mediante una metodología basada en objetivos, para lo cual es necesario especificar las actividades principales en torno a estos.

Objetivo 1: Modelar analíticamente la cinemática y dinámica directa e inversa del brazo robótico para el posicionamiento y orientación del efector final

Actividad 1: Analizar el tipo de movimiento en el brazo robótico.

Actividad 2: Calcular la cinemática y dinámica directa e inversa del robot.

Actividad 3: Analizar resultados y seleccionar el modelo matemático a usar.

Objetivo 2: Diseñar y construir los componentes del brazo robótico y añadidos del tablero de ajedrez usando herramientas CAD/CAE para validar su funcionamiento

Actividad 1: Diseñar el sistema mecánico.

Actividad 2: Efectuar cotizaciones de los materiales a usarse.

Actividad 3: Construir las estructuras necesarias.

Objetivo 3: Diseñar e implementar un sistema de visión artificial para el reconocimiento de las piezas de ajedrez y sus movimientos

Actividad 1: Analizar las necesidades del sistema de visión artificial.

Actividad 2: Programar las rutinas de procesamiento de imagen.

Actividad 3: Calibrar el sistema de acuerdo con pruebas realizadas.

Objetivo 4: Dimensionar y seleccionar los componentes electrónicos que permitan el control del brazo robótico en tiempo real.

Actividad 1: Diseñar el sistema electrónico.

Actividad 2: Cotizar los materiales para la conexión del sistema.

Actividad 3: Implementar los circuitos electrónicos.

Objetivo 5: Implementar el motor de ajedrez al software encargado del control del brazo robótico y al programa de visión artificial

Actividad 1: Realizar una búsqueda del motor de ajedrez apropiado.

Actividad 2: Adecuar el programa para las necesidades presentes.

Actividad 3: Implementar el código para pruebas de funcionamiento.

Objetivo 6: Diseñar una interfaz gráfica interactiva intuitiva y orientada a niños y adolescentes para la selección de las funciones del tablero

Actividad 1: Diseñar la interfaz gráfica.

Actividad 2: Realizar la conexión y comunicación con el sistema electrónico.

Objetivo 7: Integrar los distintos subsistemas para el correcto funcionamiento del tablero.

Actividad 1: Unificar los sistemas mecánico y electrónico.

Actividad 2: Integrar los sistemas físicos con el sistema computacional.

Objetivo 8: Realizar pruebas de funcionamiento en laboratorio que permitan validar el desempeño y consecución de objetivos por parte del prototipo.

Actividad 1: Toma de datos de precisión, exactitud y confiabilidad en la detección de piezas de ajedrez.

Actividad 2: Medición de repetibilidad de resultados y respuesta de movimientos durante el juego de ajedrez.

Actividad 2: Validar los resultados en términos de funcionalidad y confiabilidad general del prototipo.

Actividad 3: Efectuar corrección de errores en el sistema.

Identificación de requerimientos

Posterior a la revisión de bibliografía y estado del arte, se identifican requerimientos, estos relacionados con el tipo de productos que deben realizarse para pacientes oncológicos pediátricos, recordando que son infantes y deben poseer ciertas medidas de seguridad. Los cuales se detallan en la Tabla 2.

Algunas consideraciones a tener en cuenta son el espacio proporcionado para la interacción con el robot por parte del niño, no deben existir esquinas con filos pronunciados que puedan producir accidentes, se deben evitar geometrías que inviten a los niños a tocar o incrustar sus extremidades en mecanismos o agujeros, debe inducirse confort y tranquilidad, además, la estética es un punto importante para atraer la atención de los pacientes pediátricos (Gonçalves & Arsenio, 2015).

Adicionalmente, las figuras geométricas que crean cada una de las estructuras del robot deben ser curvas, suaves con una variedad de colores que inviten a una interactividad (Aldinhas & Silva, 2016). Tomando en cuenta estos parámetros la percepción de los niños hacia el robot mejora y crea un ambiente que les permite involucrarse de manera continua con la actividad (Sequeira, 2019).

Tabla 2

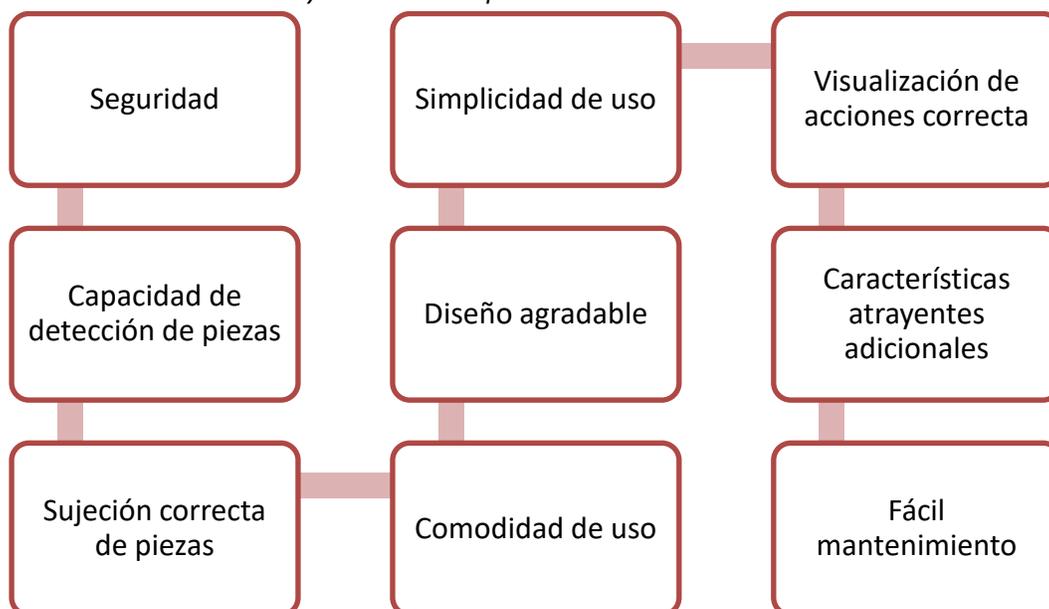
Descripción de requerimientos identificados en investigación previa.

Requerimiento	Descripción
Seguridad	El uso de cualquier tipo de dispositivo por parte de los niños no debe ser susceptible a accidentes que vulneren su integridad física o mental. Debe adecuarse una geometría para cumplir con estos objetivos, tomando en cuenta además que este es un brazo robótico, también el movimiento se somete a tales requerimientos.
Comodidad en su uso	El prototipo debe involucrar suficiente espacio para que el usuario interactúe sin ningún tipo de incomodidad física o mental.
Capacidad de detección de piezas	Involucra la correcta detección en el juego de ajedrez, sea en el apartado de lecciones o enfrentamiento en tiempo real con la máquina.
Sujeción correcta de piezas	El manipulador creado debe sostener correctamente las piezas que mueve, de tal manera que se cree un juego fluido sin interrupciones.
Simplicidad de uso	La interacción con las diversas funcionalidades debe ser simple, un uso fácil de aprender y que no provoque confusión.
Fácil mantenimiento	El brazo robótico y además la estructura del prototipo debe ser accesible para un mantenimiento sin dificultad cuando lo requiera.
Visualización de acciones correcta	En la pantalla HMI (interfaz humano-máquina), la información, además de figuras deben visualizarse sin dificultad por parte del usuario.
Características atractivas adicionales	El proyecto al ser dirigido a niños debe contar con ciertas características atractivas como colores vivos, sonidos, imágenes, luces, entre otros.
Diseño agradable	La geometría debe centrarse hacia una estética atractiva, amigable con el usuario y que considere superficies suaves para un contacto correcto con el infante.

Según la bibliografía consultada se ordenan los requerimientos mencionados en orden de mayor a menor importancia, como se representa en la Figura 25.

Figura 25

Requerimientos ordenados de mayor a menor importancia.



Luego de determinar el orden de importancia de los requerimientos se plantea la matriz QFD (Despliegue de la función de calidad) como se muestra en la *Figura 26*, la simbología se proporciona en la *Figura 27*. Esta matriz es una herramienta que permite identificar las necesidades y expectativas del usuario objetivo y transformarlas en especificaciones técnicas del producto. Se suele utilizar en el diseño y desarrollo de productos.

Figura 26
Matriz QFD

Máximo valor de relación	Peso relativo	Peso	Características de calidad	Dirección de mejora Minimizar(▼), Maximizar(▲), o Valor Objetivo (X)								
				X	▲	▲	▼	▲	▼	▼	▲	
			Requerimientos	Velocidad máxima de movimiento	Precisión visión artificial	Exactitud del movimiento	Tiempo de respuesta del robot	Interfaz de usuario atractiva e intuitiva	Peso máximo del prototipo	Volumen máximo del prototipo	Estética agradable	
9	19,6	9,0	Seguridad	⊖				▲	○	○		
9	17,4	8,0	Capacidad de detección de piezas		⊖	⊖	⊖				▲	
9	17,4	8,0	Sujeción correcta de piezas	○	⊖	⊖						
9	13	6,0	Comodidad de uso				⊖	⊖	○	○		
9	10,9	5,0	Diseño agradable					⊖	▲	▲	⊖	
9	8,7	4,0	Simplicidad de uso					⊖	▲			
3	6,5	3,0	Visualización de acciones correcta					○				
3	4,3	2,0	Características atrayentes adicionales								○	
1	2,2	1,0	Fácil mantenimiento						▲	▲		
			Valor objetivo o límite	50 mm/s	95%	10mm	10s	Subjetiva	15 kg	800x800x800	Subjetiva	
			Máximo valor de relación	9	9	9	9	9	3	3	9	
			Importancia	228,3	313	313	273,9	332,6	119,6	110,9	128,3	
			Peso relativo	12,5	17,2	17,2	15,1	18,3	6,6	6,1	7	

Figura 27
Simbología de la Matriz QFD

Simbología	
⊖	Relación fuerte
○	Relación moderada
▲	Relación débil
▼	Minimizar
▲	Maximizar
X	Llegar a un valor objetivo

Usando los resultados de la matriz QFD, se propone la Tabla 3 en la cual se presentan en orden de relevancia y se explican las especificaciones técnicas buscadas en el prototipo. Las especificaciones más relevantes serán priorizadas en el diseño, pero todas serán tomadas en cuenta con la meta de

obtener un prototipo con el mejor desempeño posible.

Tabla 3

Explicación de las especificaciones técnicas requeridas.

Especificación técnica	Explicación	Relevancia
Interfaz de usuario atractiva e intuitiva	La interfaz gráfica debe ser atractiva para el público objetivo, además debe ser fácil de usar y requerir de poco tiempo para familiarizarse.	1
Precisión visión artificial	Es la capacidad de detectar adecuadamente las jugadas realizadas en el tablero, es indispensable para poder operar con fluidez.	2
Exactitud del movimiento	Es la capacidad de realizar adecuadamente los movimientos de posicionar y retirar piezas del tablero. La exactitud en esta área también influye en la detección de las piezas. Esta especificación influye directamente en la selección de componentes.	3
Tiempo de respuesta del robot	Para lograr una interacción fluida con una persona se requieren de tiempos de respuesta cortos, ya que el público objetivo tiende a ser poco paciente y distraerse con facilidad.	4
Velocidad máxima de movimiento	La velocidad de movimiento de cada eslabón del robot se puede regular mediante la tarjeta de control. Afecta principalmente a la seguridad del usuario, por ello se proponen velocidades relativamente bajas.	5
Estética agradable	Se busca un diseño atrayente para el público objetivo. Formas redondeadas y al estilo de juguetes actuales.	6
Peso máximo del prototipo	El prototipo debe poder transportarse sin mayores dificultades, este aspecto influirá en el método de construcción.	7
Volumen máximo del prototipo	Se busca que el prototipo sea transportable y un volumen pequeño facilita tal tarea	8

Diseño del prototipo

Con cada uno de los requerimientos determinados como necesarios y ponderados con un orden de relevancia. Comienza el diseño del prototipo, en donde se describe una selección de cada una de las partes que lo conforman, esto incluye partes mecánicas, electrónicas y técnicas a usarse dentro de la programación para el sistema en conjunto.

Selección de tipo de movimiento

En este apartado se realiza el estudio y selección del tipo de robot que se va a utilizar, definiendo el número de grados de libertad (GDL) necesarios para conseguir el objetivo de realizar los

movimientos válidos de ajedrez, el tipo de articulación necesario para cada GDL y el orden de las articulaciones. De la teoría básica de la robótica conocemos que se necesitan 3 GDL para posicionar el efector final en las coordenadas requeridas, y 3 GDL adicionales para orientar el efector final en el espacio. Como se definió en los requerimientos, solo se necesita mover las piezas en el área deseada, es decir, no se toma en cuenta la orientación de dichas piezas, por lo tanto, se necesita un robot con al menos 3 GDL. Adicionalmente, se necesita un efector final capaz de agarrar las piezas, sostenerlas mientras se realiza el movimiento y soltarlas cuando sea haya finalizado la acción, para este efector se necesita de un GDL adicional.

Existen muchas configuraciones de robots de 3 GDL, como los mostrados en el capítulo 3, sin embargo, para esta aplicación se necesita movimiento en un solo plano, de esta forma evitando el problema que podría presentarse si la base de la pieza no se mantiene paralela al tablero, especialmente en el momento de soltar la pieza.

Tabla 4

Comparación entre manipuladores tipo cartesianos y tipo SCARA.

Tipo de manipulador	Cartesiano	SCARA
Ventajas	Precisión en movimientos rectilíneos. Fácil programación de los movimientos. Capacidad de manejar cargas pesadas.	Tienen una mayor velocidad y aceleración. Ocupan menor espacio para el mismo volumen de trabajo. Precisión en desplazamientos curvilíneos. Menor peso
Desventajas	Ocupan más espacio para un mismo volumen de trabajo. Limitaciones en movimientos curvilíneos. Mayor peso.	Limitaciones en carga útil. Mayor complejidad de programación.

Los tipos de robots de 3 GDL que pueden moverse en distintos planos paralelos con control de la altura se reducen a cartesianos y SCARA. En el capítulo anterior se hizo una comparación superficial del uso de estas configuraciones de movimiento, pero en este punto se van a ampliar las ventajas y

desventajas que suponen (Tabla 4).

Debido a que se requiere que el dispositivo sea fácil de transportar, se da mucha importancia a que el modelo sea lo más liviano y compacto posible, por esto, el tipo de manipulador más conveniente es el SCARA, además, sus desventajas en la comparación tienen una reducida relevancia, debido a que la carga útil va a ser de aproximadamente 12 gramos, y la programación de movimientos no necesita integrar gran cantidad de planos de trabajo.

Modelo matemático

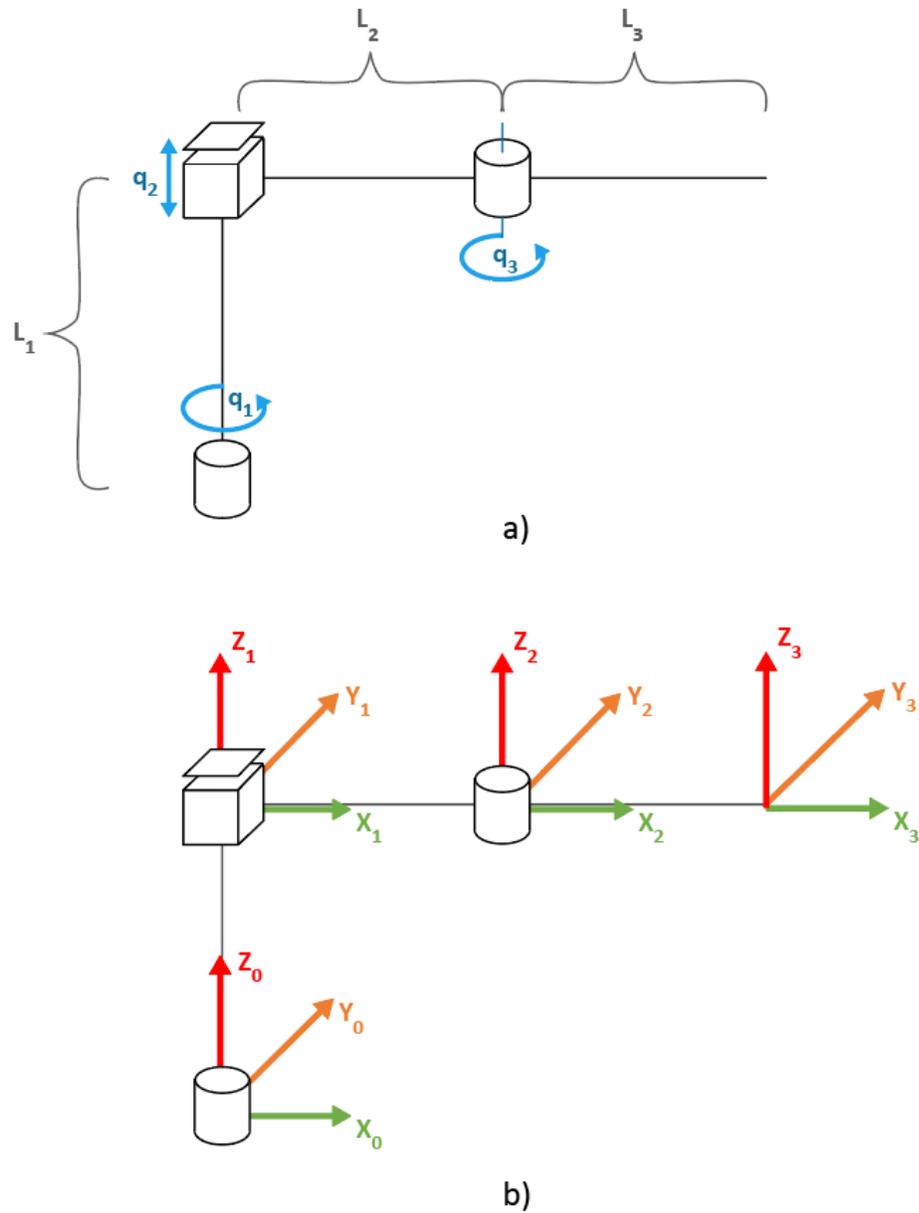
En este apartado se realiza el cálculo de las variables que permitirán el control de los eslabones mediante cinemática directa e inversa para el brazo robótico.

Cinemática directa

Utilizando el procedimiento de Denavit-Hartenberg (DH) se plantea un diagrama que servirá como base del modelamiento del robot, teniendo en cuenta la dirección y tipo de movimiento articular, además de la orientación de los ejes en cada articulación, que se aprecia en la Figura 28.

Figura 28

Diagrama de cinemática directa. A) movimientos articulares y b) colocación de los ejes.



Partiendo de la primera articulación, se establecen los parámetros DH, para de esta forma encontrar la matriz de transformación homogénea del efector final respecto de la base.

Tabla 5*Parámetros DH del brazo robótico*

	θ	d	a	α
H_0^1	q_1	L_1	0	0°
H_1^2	0°	q_2	L_2	0°
H_2^3	q_3	0	L_3	0°

Aplicando las operaciones para encontrar la matriz de transformación homogénea obtenemos:

$$H_0^3 = \begin{pmatrix} \cos(q_1 + q_3) & -\sin(q_1 + q_3) & 0 & l_2 \cdot \cos(q_1) + l_3 \cdot \cos(q_1 + q_3) \\ \sin(q_1 + q_3) & \cos(q_1 + q_3) & 0 & l_2 \cdot \sin(q_1) + l_3 \cdot \sin(q_1 + q_3) \\ 0 & 0 & 1 & l_1 + q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Despejando para las coordenadas x, y, z tenemos:

$$x = l_2 \cdot \cos(q_1) + l_3 \cdot \cos(q_1 + q_3) \quad (2)$$

$$y = l_2 \cdot \sin(q_1) + l_3 \cdot \sin(q_1 + q_3) \quad (3)$$

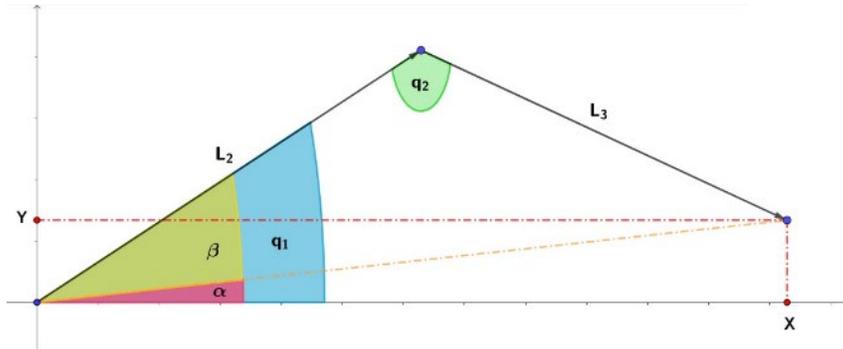
$$z = l_1 + q_2 \quad (4)$$

Cinemática inversa

La cinemática inversa se determina utilizando el método geométrico para las variables articulares q_1 y q_3 , y se despeja directamente de la matriz de transformación homogénea para la variable articular q_2 . Para las variables articulares q_1 y q_3 se considera el siguiente diagrama:

Figura 29

Diagrama de cinemática inversa.



Utilizando la ley del coseno determinamos la variable articular q_3 :

$$\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 = (L_2)^2 + (L_3)^2 - 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot \cos(q_3) \quad (5)$$

$$\cos(q_3) = \frac{(L_2)^2 + (L_3)^2 - (\sqrt{x^2 + y^2})^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_3} = D \quad (6)$$

$$\sin(q_3) = \pm\sqrt{1 - D}$$

$$q_3 = \text{atan2}(\pm\sqrt{1 - D}, D) \quad (7)$$

La configuración del robot propuesta presenta redundancia en las variables articulares q_1 y q_3 , es decir, para cada punto del plano XY existen 2 pares de ángulos que satisfacen la posición requerida. Para evitar la redundancia se limitará la variable articular q_3 entre 0 y 180°, de esta forma se puede evitar el uso de la función *atan2* para la determinación de las variables q_1 y q_3 . Se obtiene el valor de q_3 despejando la ecuación 6.

$$q_3 = \arccos\left(\frac{(L_2)^2 + (L_3)^2 - (\sqrt{x^2 + y^2})^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_3}\right)$$

Utilizamos la función *atan2* para obtener el ángulo α dado que nos interesa conocer la ubicación del punto en los 4 cuadrantes del plano. Para β utilizamos la ley del coseno. Finalizamos encontrando

q_1 , siendo la suma de α y β (Ecuación 8).

$$\alpha = \text{atan2}(y, x)$$

$$\cos(\beta) = \left(\frac{L_2^2 + (\sqrt{x^2 + y^2})^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot \sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$

$$\beta = \text{acos} \left(\frac{L_2^2 + (\sqrt{x^2 + y^2})^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot \sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$

$$q_1 = \alpha + \beta$$

$$q_1 = \text{atan2}(y, x) + \text{acos} \left(\frac{L_2^2 + (\sqrt{x^2 + y^2})^2 - L_3^2}{2 \cdot L_2 \cdot \sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (8)$$

Para obtener q_2 , despejamos directamente de la ecuación 4.

$$q_2 = z - L_1$$

Selección de materiales para construcción

Para la selección de material es necesario una separación de acuerdo con las necesidades de forma, facilidad de manufactura y resistencia necesarias.

El sistema con condiciones más críticas de diseño, que necesitan un soporte que involucre análisis estático y dinámico es el de manipulación de objetos, en concreto, el movimiento de piezas de ajedrez. Como se mencionó anteriormente se seleccionó el tipo SCARA, que cuenta con 3 grados de libertad (GDL), una estructura principal de soporte y eslabones en voladizo.

Las necesidades de la aplicación requieren una estética agradable y exactitud en las medidas para un acople correcto de las partes. Por lo cual se selecciona impresión 3D o modelado por deposición fundida como proceso de manufactura debido a que cumple correctamente con estos requisitos,

además de proporcionar diversas opciones para una resistencia correcta a los esfuerzos mecánicos presentes.

Tabla 6
Características principales para materiales de impresión 3D.

Característica	ABS	PLA	PLA+	PETG	PLA con fibra de carbono
Rigidez	5/10	7,5/10	6/10	5/10	10/10
Durabilidad	8/10	4/10	6/10	8/10	3/10
Máxima temperatura de uso [°C]	98	52	53	73	52
Precio por kilo [\$]	10 - 40	10 - 40	25-45	20 - 60	30 - 80
Resistencia a impactos	Alta	Baja	Media	Media	Alta
Biodegradable	No	Si	Si	No	No
Soluble	Acetona	No	No	No	No
Facilidad de impresión	8/10	9/10	9/10	9/10	8/10
Temperatura de extrusión [°C]	220 - 250	190 - 220	210 - 230	230 - 250	200 - 230
Temperatura de cama de impresión [°C]	95 - 110	45 - 60	45 - 60	75 - 90	45 - 60
Requiere de cama caliente	Si	No	-	No	No
Requiere de espacio de impresión hermético	Si	No	No	No	No
Adhesión de capas	Baja	Media	Media	Media	Alta
Libera gases tóxicos al imprimir	Si	No	No	No	No
Coefficiente de expansión térmica [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$]	90	68	-	60	57,5

Nota. Adaptado de *Ultimate 3D Printing Material Properties Table*, por Simplify3D, 2019

(<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>); *16 Types of 3D Printer Filaments*, por 3D Insider, 2017 (<https://3dinsider.com/3d-printing-materials/>); *What's the ideal filament for FDM 3d printing?*, por HUBS, 2022 (<https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>) y *PLA+*, por eSUN, 2021 (https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf).

Dentro de la impresión 3D los materiales disponibles y con mayor accesibilidad son ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PLA (ácido poliláctico), TPU (poliuretano termoplástico), PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol), además de esto existen modificaciones con materiales compuestos como el PLA+ que consta de ácido poliláctico con TPU añadido en un porcentaje bajo, y otros como filamentos de impresión con fibra de carbono o metales como cobre, bronce, latón y acero

inoxidable. (Simplify3D, 2019). Se realiza una comparativa de características para los materiales más accesibles en el país (Tabla 6). La mayor durabilidad (combinación de resistencia al calor, fatiga, rayos UV, agua y químicos) se encuentra en el ABS y PETG, estos dos materiales poseen la misma cantidad de rigidez. La mayor facilidad de impresión la posee el PLA y PLA+. El PLA con fibra de carbono tiene alta rigidez y resistencia a impactos, sin embargo, es descartado como opción debido a su alto coste y necesidad de boquillas de extrusión especiales para su impresión.

Además de esto también es importante añadir las propiedades mecánicas de los materiales con mejores propiedades de impresión que posteriormente permitirán realizar el análisis de esfuerzos en el brazo robótico. Dentro de la Tabla 7 se analizan elementos como resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, alargamiento, dureza y punto de fusión, estos ayudarán a seleccionar de manera correcta el material más conveniente de acuerdo con la aplicación.

Con esta información es posible realizar una matriz de selección (Tabla 8) tomando en cuenta la ponderación correspondiente para cada una de las características a evaluar como son adhesión de capas, resistencia a tracción y flexión, resistencia a impactos, biodegradabilidad, entre otros. Considerando que, como factores principales se tomará el costo de manufactura, facilidad de impresión y resistencia a esfuerzos externos. Dando así resultados de puntaje de acuerdo con la ponderación especificada para la aplicación del presente proyecto, además, se da una importancia alta a la facilidad de impresión, resistencia a la tracción, flexión e impactos y el costo de manufactura. Los materiales de PLA+ y PETG alcanzan la segunda y primera puntuaciones más altas. Sin embargo, de acuerdo con costos de manufactura y disponibilidad de material el PLA+ será seleccionado para la construcción.

Tabla 7*Propiedades mecánicas de filamentos de impresión 3D.*

Característica	ABS	PLA	PETG	PLA+
Densidad [g/cm ³]	1,05	1,24	1,27	1,23
Resistencia a la tracción, rotura [MPa]	74	45,60	108	63
Resistencia a la tracción, deformación [MPa]	43	49,50	50	40
Módulo de elasticidad [GPa]	2,45	5,92	2,20	2,30
Módulo de flexión [GPa]	2,35	3,15	2,08	1,98
Resistencia a la flexión [MPa]	66	103	50	87
Alargamiento a la rotura [%]	14	5,20	18	29
Alargamiento a la deformación [%]	2	3,30	2	2
Dureza Rockwell	110	104	105	-
Resistencia al impacto Izod, con muesca [kJ/m ²]	6,41	5,10	11,50	7
Punto de fusión [°C]	170 - 320	145 - 160	220 - 280	205-225
Temperatura de transición vítrea [°C]	108	60	79	-

Nota. Obtenido de la base de datos de materiales *Matweb* (<https://www.matweb.com/index.aspx>); PLA+, por

eSUN, 2021 (https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf) y *Properties of PLA+ and ABS filament*, por Ozsoy et al., 2021

(https://www.researchgate.net/publication/356718516_Comparison_of_Mechanical_Properties_of_PLA_and_ABS_Based_Structures_Produced_by_Fused_Deposition_Modelling_Additive_Manufacturing).

Tabla 8*Matriz de selección de material con ponderación.*

Criterios de selección	Ponderación	PLA		PLA+		ABS		PETG	
		Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.
Resistencia a tracción y flexión	0,15	5	0,75	4	0,60	4	0,60	3	0,45
Resistencia a impactos	0,15	2	0,30	3	0,45	4	0,60	5	0,75
Densidad	0,10	4	0,40	4	0,40	5	0,50	4	0,40
Precio por kilo	0,15	5	0,75	4	0,60	5	0,75	3	0,45
Estética	0,10	4	0,40	5	0,50	2	0,20	4	0,40

Criterios de selección	Ponderación	PLA		PLA+		ABS		PETG	
		Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.
Facilidad de impresión	0,20	5	1,00	5	1,00	3	0,60	5	1,00
Durabilidad	0,10	2	0,20	3	0,30	4	0,40	5	0,50
Amigable con medio ambiente	0,05	5	0,25	5	0,25	3	0,15	4	0,20
Total	1		4,05		4,10		3,80		4,15
Recomendado			No		Si		No		Si

Diseño mecánico

Se presentan 3 conceptos para el sistema de manipulación robótica (Tabla 9), teniendo en cuenta una optimización en diversos aspectos y con un enfoque hacia los requerimientos analizados anteriormente.

Para el primer concepto, el objetivo fue reducir la complejidad en eslabones, obteniendo un modelo con eslabones de un solo cuerpo, con lo cual no era necesario un armado de gran cantidad de tiempo, sin embargo, el peso aumenta con ello, optando por un eje prismático con un perfil de aluminio para resistir mayor carga.

El segundo concepto toma en cuenta una reducción de peso en los eslabones, eligiendo de esta manera otro sistema para sostener el eje prismático, aquí se usan barras cilíndricas, lo cual reduce considerablemente el peso del brazo robótico.

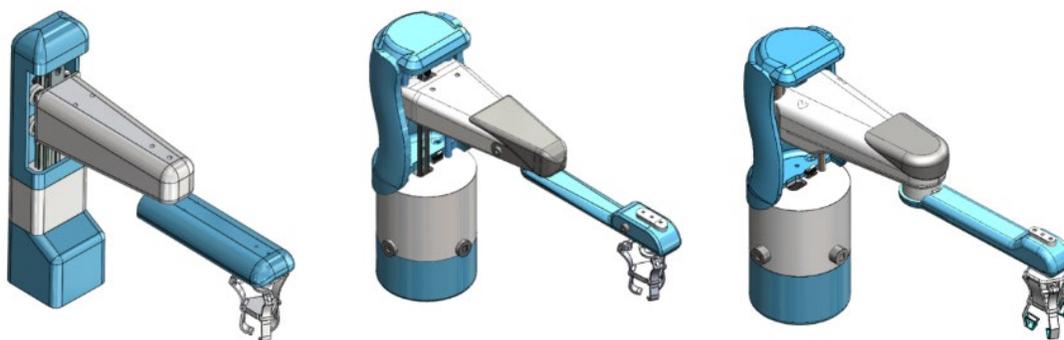
El tercer concepto tiene el objetivo de obtener un armado más fácil, esto incrementa la cantidad de piezas en el brazo robótico, el peso no varía considerablemente, sin embargo, aumenta. Cuenta con una inercia reducida de eslabones y se enfoca en una estética sin agujeros o tornillos a la vista.

Tabla 9

Características de conceptos realizados para el brazo robótico.

Característica	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3
Descripción	Centrado en simplificar la geometría de los eslabones. Con una sola pieza, por lo cual no es necesario un armado laborioso.	Toma en cuenta una reducción de peso en eslabones. Varía el elemento de sujeción en eje prismático.	Se enfoca en mayor facilidad de armado. Un peso similar a concepto 2. Es necesario tomar en cuenta un ajuste más preciso entre eslabones.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Armado simple - Mayor torque sostenido - Menor cantidad de piezas 	<ul style="list-style-type: none"> - Armado simple - Peso reducido en eslabones - Cantidad de piezas media - Estética superior 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor facilidad de armado - Peso de eslabones reducido - Simétrico - Mayor fijación entre eslabones
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor peso total - Mayor inercia en eslabones - Asimétrico - Estética inferior 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor torque sostenido - Dificultad de armado mayor - Paso de cables con mayor dificultad 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor torque sostenido - Mayor cantidad de piezas - Necesidad de mayor precisión en manufactura

Imagen



En la Tabla 10 se observa la matriz de calificación y selección para los diferentes conceptos del brazo robótico, aquí se evalúan criterios como peso, durabilidad, facilidad de ensamble, resistencia a la torsión, estética, durabilidad, estabilidad del movimiento y disponibilidad de materiales para su construcción. Todo esto tomando en cuenta cada característica de los diversos ensambles mostrados. De acuerdo con esto, se toma el concepto 3 como opción elegida, con puntos fuertes en facilidad de

ensamble, estética, peso reducido y durabilidad. Con respecto al concepto 1, que posee mayor peso y menor facilidad de ensamble, el concepto 3 posee estabilidad en movimiento y durabilidad suficiente para cumplir con las exigencias de la aplicación presente.

Tabla 10

Matriz de selección para conceptos de brazo robótico.

Criterios de selección	Ponderación	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 3	
		Calif.	Punt.	Calif.	Punt.	Calif.	Punt.
Peso reducido	0,15	3	0,45	5	0,75	4	0,60
Facilidad de ensamble	0,20	4	0,80	3	0,60	5	1,00
Resistencia a la torsión	0,10	5	0,50	4	0,40	3	0,30
Estética	0,15	2	0,30	4	0,60	5	0,75
Durabilidad	0,10	5	0,50	4	0,40	4	0,40
Estabilidad en el movimiento	0,20	5	1,00	4	0,80	4	0,80
Disponibilidad de materiales para construcción	0,10	2	0,20	4	0,40	5	0,50
Total	1		3,75		3,95		4,35
Recomendado			No		No		Si

Modelado asistido por computador

El diseño del proyecto fue realizado en su totalidad en base a las características seleccionadas en los apartados anteriores y a su vez analizando que cumpla con requerimientos de cinemática y dinámica. Así, el torque necesario es un punto primordial de análisis debido a que con ello se puede dimensionar los actuadores a usarse, finalmente se optimizaron características puntuales estéticas para con ello mejorar la experiencia del público pediátrico.

Este brazo robótico posee 3 GDL, uno prismático y dos rotacionales, los puntos críticos involucrarán los sólidos en voladizo, por tanto, es necesario disminuir el peso para tales regiones. Para una mayor robustez se diseña el movimiento prismático dentro del segundo eslabón, con ello, el primer eslabón será rotacional lo cual permitirá un mejor control de posición y mayor espacio para los elementos actuadores, disminuyendo el tamaño de las piezas que tienen contacto con el usuario y aumentando así la visibilidad del tablero de ajedrez para el juego.

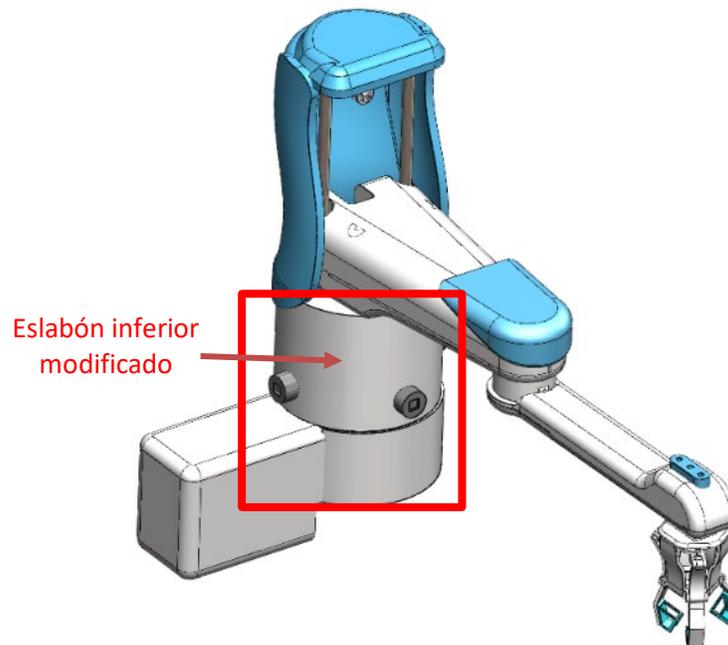
El primero y segundo eslabón fueron diseñados de forma prismática, sin embargo, al ser rotacional con el objetivo de mejorar la estética, se cambia su forma a cilíndrica, así, cuando el brazo robótico gire en el plano paralelo al tablero de ajedrez no se notará un desfase entre las piezas, manteniendo su forma.

La siguiente pieza que conecta el eslabón prismático con el segundo actuador rotacional (Figura 30) fue diseñada en primera instancia como un solo cuerpo, no obstante, tal modelo obstaculizaba el paso correcto de cables y ajuste del actuador de forma correcta, por tanto, se dividió tal pieza en dos partes tomando en cuenta que los elementos de sujeción se mantengan ocultos.

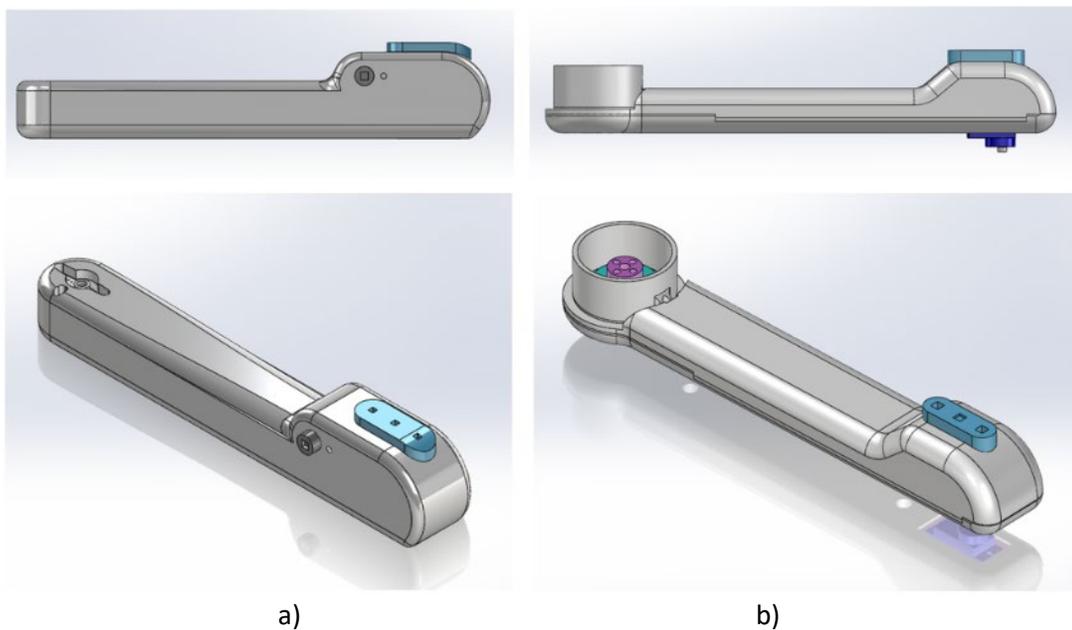
El último eslabón que contiene el actuador para sostener cada una de las piezas de ajedrez fue diseñado como un solo cuerpo de tal manera que se facilite su incorporación sin añadir elementos de sujeción innecesarios para una experiencia óptima de los infantes, este no fue modificado en funcionalidad, aunque su cuerpo se acopló para un correcto movimiento del brazo robótico desde un eslabón con alta cantidad de grosor hacia uno con menor cantidad de grosor, además, modificando el ajuste entre eslabones para reducir la fricción (Figura 31).

Figura 30

Eslabón inicial modificado en brazo robótico.

**Figura 31**

Eslabón final de brazo robótico. a) Primer concepto b) Segundo concepto.



Todas las piezas fueron sujetas a un diseño que incluya sus motores, los cuales serán definidos de acuerdo con el modelo dinámico final, por ende, este apartado de modelado asistido por

computador se correlaciona y optimiza en conjunto con el análisis estático y dinámico del brazo robótico, obteniendo de tal manera requerimientos finales de fuerzas y, finalmente seleccionando los motores necesarios.

Para este punto, es posible obtener los resultados finales de dimensiones que se utilizarán en la cinemática inversa integrada dentro de la programación del brazo robótico. Para el primer eslabón una altura de 160 [mm] y el segundo eslabón con una longitud de 195 [mm] al igual que el tercero.

La estructura de soporte para los elementos electrónicos y el tablero de ajedrez fueron diseñados con el fin de cumplir requerimientos en espacio y estética, que sea capaz de contener todas las conexiones internas, además de la iluminación para el tablero. Al cumplir tal objetivo, se realizaron modificaciones con una estructura que sea llamativa para el público objetivo con alta cantidad de colores y formas redondeadas garantizando seguridad en el tacto. Inicialmente se manejaron dos propuestas para la estética (Figura 32), de las cuales se derivaron modificaciones, optando por un modelo con alta cantidad de espacio, formas suaves y con menos peso (Figura 33).

Figura 32

Opciones presentadas para la estructura del prototipo.

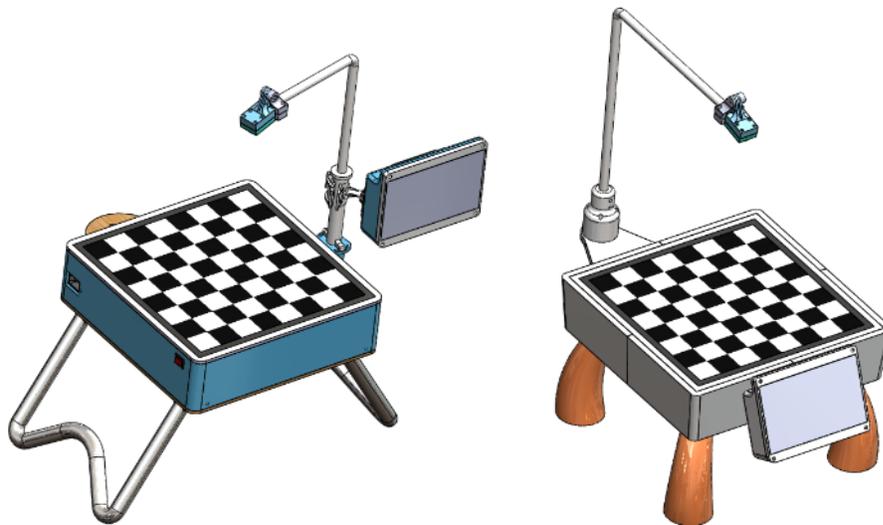
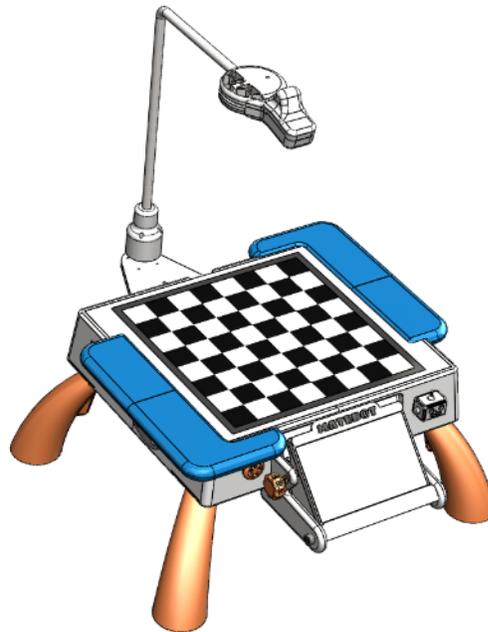


Figura 33

Concepto final de la estructura con estética modificada.



Como paso final, se incluyen los componentes realizados para la estructura y el brazo robótico con sus modificaciones finales. Tomando en cuenta los colores de tal manera que se acoplen en un solo conjunto. En la Figura 34, se observa el modelo renderizado con las características mencionadas.

Figura 34

Modelo final renderizado del prototipo.



Sus características de tamaño se observan en la Tabla 11 especificando las dimensiones máximas para el brazo robótico y para todo el sistema en conjunto.

Tabla 11

Dimensiones finales de prototipo.

Sección	Alto [mm]	Ancho [mm]	Profundidad [mm]
Brazo robótico	375	115	477
Sistema completo	532	535	560

Análisis estático del brazo robótico

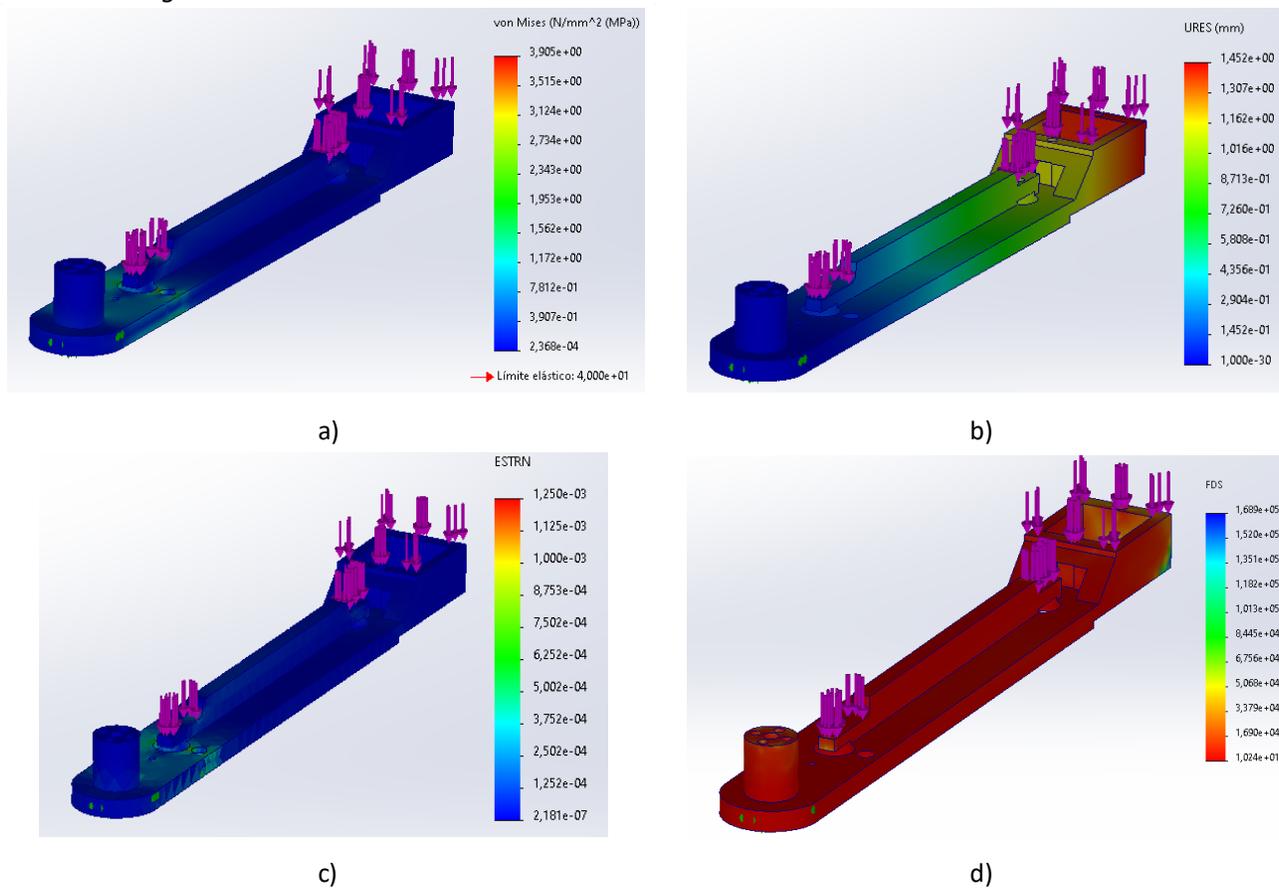
Se realiza un análisis estático para cada uno de los eslabones en el brazo robótico, se inicia en el tercero y con una carga de 37 gramos que incluye la pieza de ajedrez y la masa del efector final en conjunto con el servomotor, se toma un factor de seguridad de 1.5. Inicialmente, se analiza como punto de carga el apoyo de efector final y las sujeciones en los puntos donde se fija la pieza al eslabón anterior. La densidad del material fue modificada en la simulación en función del relleno que fue utilizado para la elaboración de la pieza mediante impresión por deposición de material fundido, a pesar de esto, se tiene que aclarar que los resultados obtenidos son solo de referencia puesto que por las características inherentes al proceso de fabricación de las piezas, es imposible determinar con exactitud las propiedades mecánicas de cada impresión, que puede variar en función de múltiples parámetros como orientación de las capas fundidas, la humedad del ambiente, la calidad del filamento base, el color del filamento, el tipo de extrusor e incluso de la configuración del laminador. Las propiedades mecánicas que se tienen en cuenta para este análisis se muestran en la Tabla 7.

Eslabón 3. Para este eslabón se consideró una carga en la sujeción del servomotor de 0.55 [N] que incluye el peso generado tanto por el efector final como por la pieza de ajedrez más pesada.

Además, se incluye una carga adicional producida por las carcasas del eslabón de 0.53 [N] en los puntos de fijación de los tornillos. Los resultados obtenidos para el esfuerzo de Von Mises, desplazamientos, deformación unitaria y factor de seguridad se muestran en la Figura 35.

Figura 35

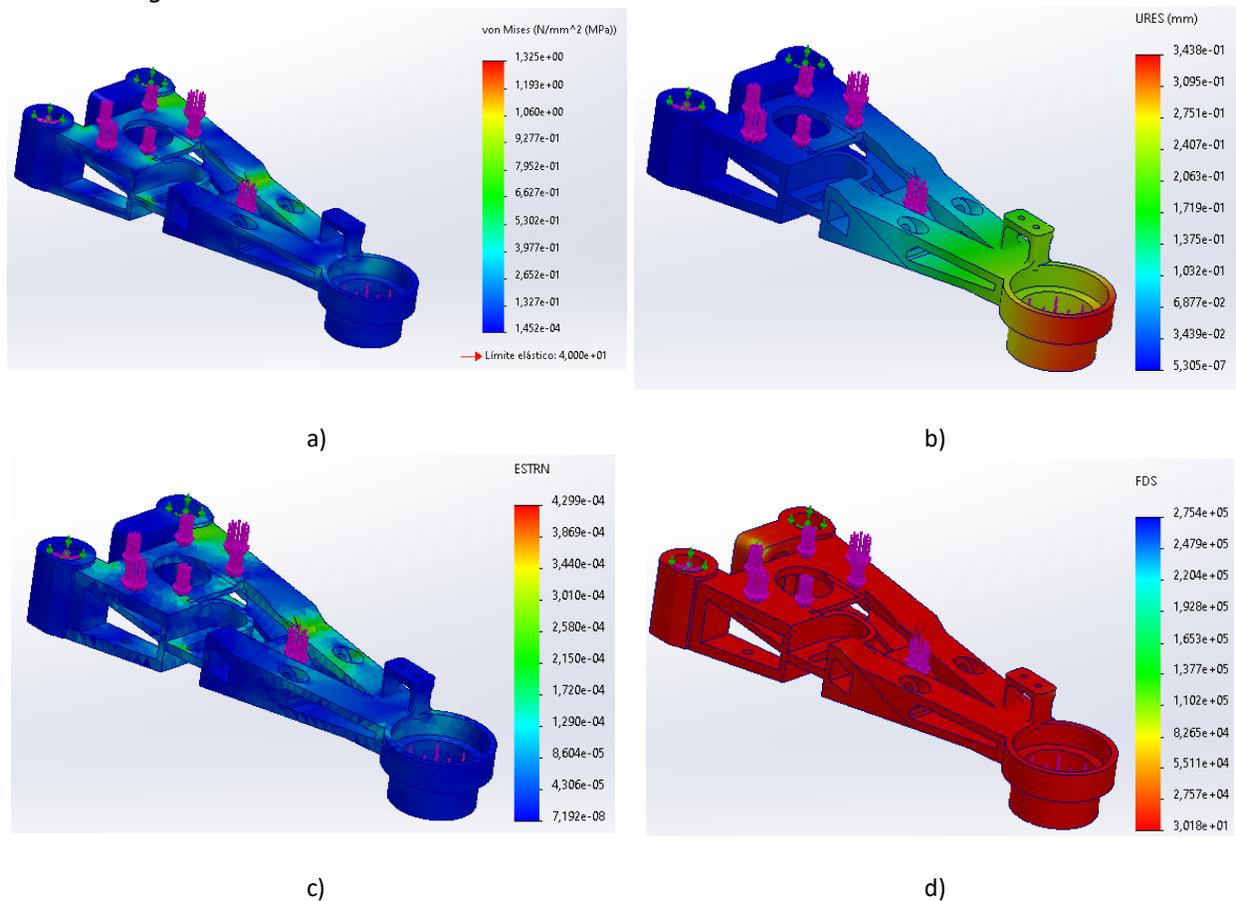
Análisis estático del eslabón 3: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad



Eslabón 2. Aquí se considera la carga del tercer eslabón más los pesos producidos por las masas del anterior y los componentes de la transmisión mecánica como el rodamiento axial, el rodamiento radial, eje, entre otros. Los resultados obtenidos para el esfuerzo de Von Mises, desplazamientos, deformación unitaria y factor de seguridad se muestran en la Figura 36.

Figura 36

Análisis estático del eslabón 2: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad



Eslabón 1. Para esta sección, se requiere conocer el mayor momento causado por los eslabones 2 y 3, junto con el efector final sobre las barras guía en dónde se produce el desplazamiento vertical del robot. Este momento es máximo cuando el brazo está totalmente extendido como se muestra en la Figura 37, debido a que el centro de masa se encuentra más alejado de la posición de las barras guía. La distancia del centro de masa hasta las barras guía es de 128 [mm], y la masa del brazo completo incluyendo un factor de seguridad de 1.5 es de 932 gramos, dando un momento total de 1.17 [Nm], el cual se soporta en dos barras guía. Se realiza el análisis de una de estas barras como se muestra en la Figura 38 para conocer el valor de las reacciones que se aplicarán al eslabón 1. Resultando ser de 2.532

[N]. Los resultados obtenidos para el esfuerzo de Von Mises, desplazamientos, deformación unitaria y factor de seguridad del eslabón 1 se muestran en la Figura 39.

Figura 37

Posición extendida del brazo robótico, con todos sus componentes. Centro de masa mostrado de color rosa.

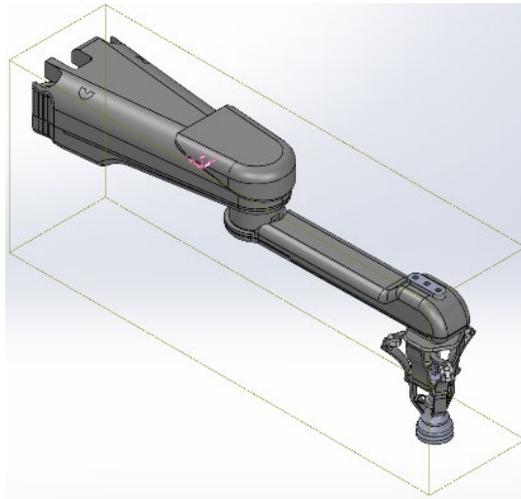


Figura 38

Diagrama de desplazamiento. Valores de las reacciones en los soportes de una de las barras.

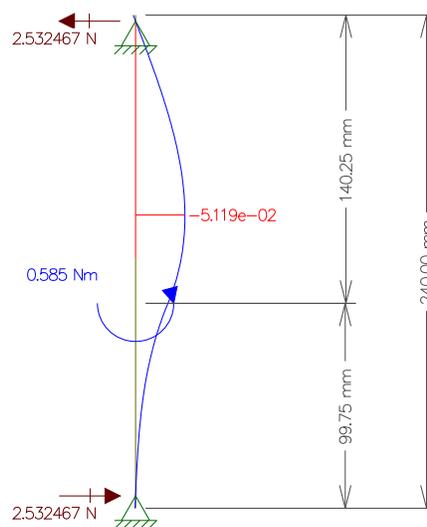
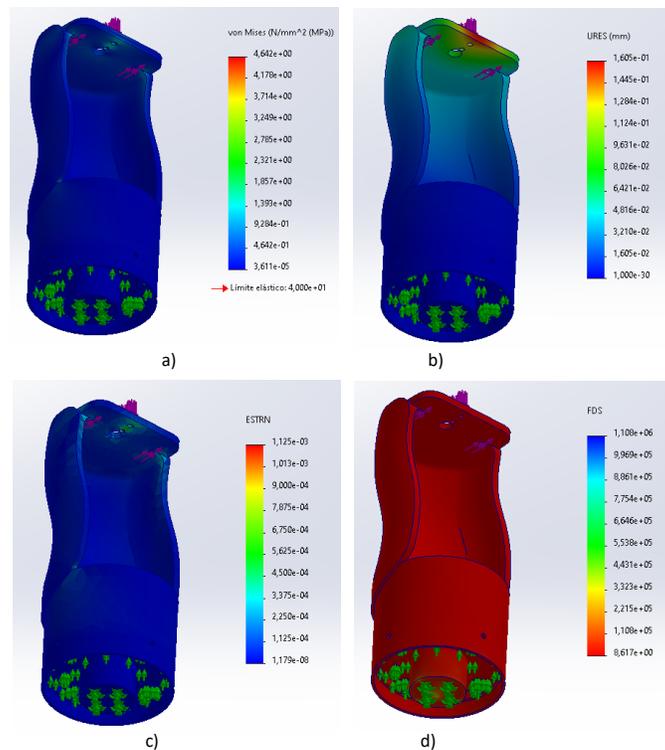


Figura 39

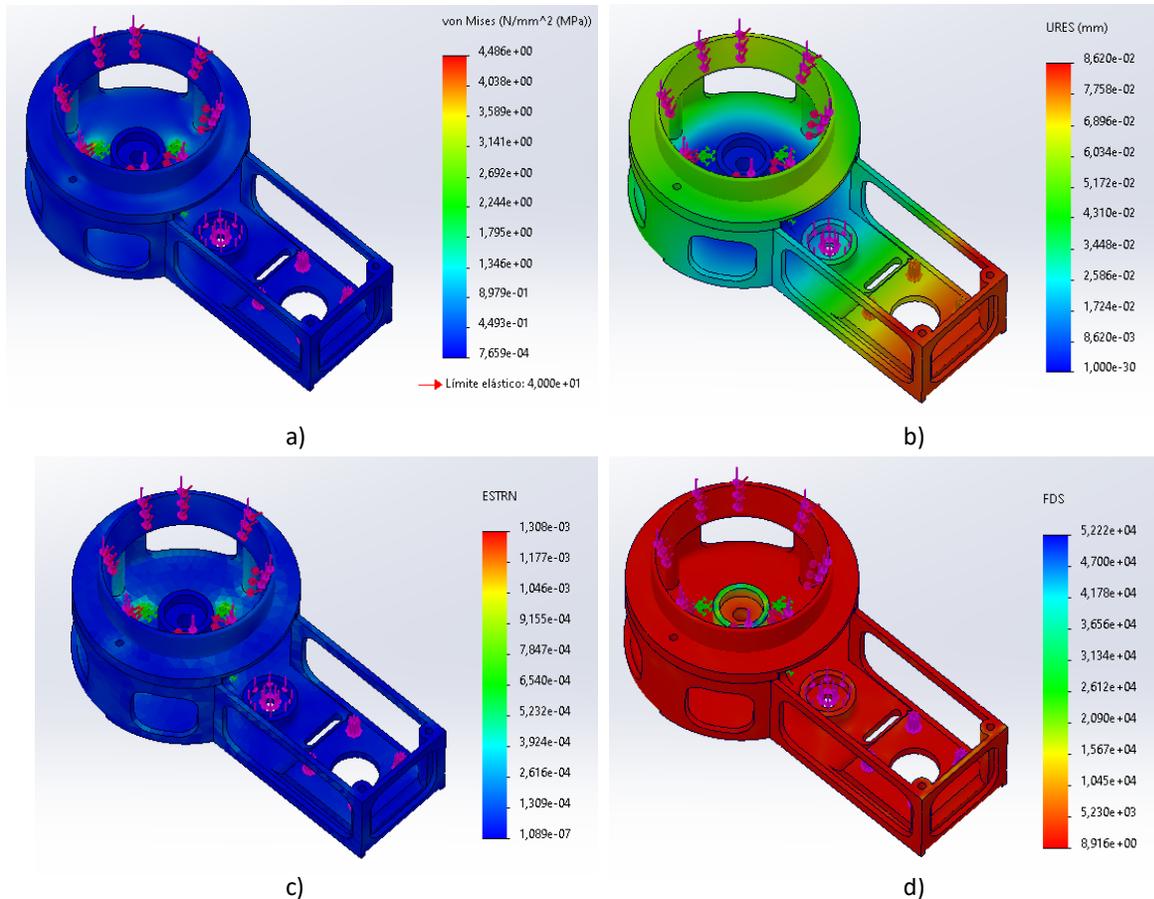
Análisis estático del eslabón 1: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad



Base. Por último, se analiza la base del robot, esta tiene 4 cargas, la primera es la suma del peso de todos los componentes que se apoyan en ella siendo esta un total de 29.5 [N], también se transmite el momento creado por el brazo robótico siendo de magnitud 1.71 [Nm], estas son soportadas por el apoyo del rodamiento. Existen adicionalmente dos cargas, una producida por el mecanismo de transmisión y otra por el motor siendo de 1.5 [N] y 3.4 [N] respectivamente. La base se soporta en la cara inferior por pernos. Los resultados obtenidos para el esfuerzo de Von Mises, desplazamientos, deformación unitaria y factor de seguridad de la base se muestran en la Figura 40.

Figura 40

Análisis estático de la base: a) Esfuerzo Von Mises, b) Desplazamientos, c) Deformación unitaria y d) Factor de seguridad



En la *Tabla 12* es presentado un resumen de valores para cada pieza analizada. Se debe destacar que se diseñó con el objetivo de ser estéticamente atractivo para niños y adolescentes. Además de conservar espesores mínimos y características constructivas similares para asegurar un resultado adecuado al momento de la fabricación mediante FDM. El factor de seguridad mínimo obtenido es de 8,6 en el eslabón 1. El desplazamiento máximo se obtuvo en el eslabón número 3, con 1.45 [mm], cabe destacar que tal magnitud está presente debido a su geometría, con menor momento de inercia en el eje del desplazamiento.

Tabla 12

Resultados del análisis estático de cada parte del brazo robótico.

Sección	Factor de seguridad	Esfuerzo máximo Von Mises [MPa]	Desplazamientos [mm]	Deformaciones unitarias
Eslabón 3	10,2	3,9	1,45	1,25E-03
Eslabón 2	30,2	1,3	0,34	4,30E-04
Eslabón 1	8,6	4,6	0,16	1,13E-03
Base	8,9	4,5	0,09	1,31E-03

Espacio de trabajo

El espacio de trabajo calculado según las medidas de los eslabones descritas en la sección de modelado por computador se muestra en la Figura 41, el volumen total es de aproximadamente 13 777 [cm³]. Este espacio cubre todo el volumen necesario para los movimientos válidos de ajedrez pudiendo usarse un tablero de hasta 30 [cm] por lado, adicionalmente, se tiene un área rectangular de 24 [cm] de largo y 8 [cm] de ancho para la plataforma donde el robot coloca las piezas que captura del oponente humano. Considerando la posición del robot en la Figura 41 como la inicial los rangos de trabajo de las variables articulares son:

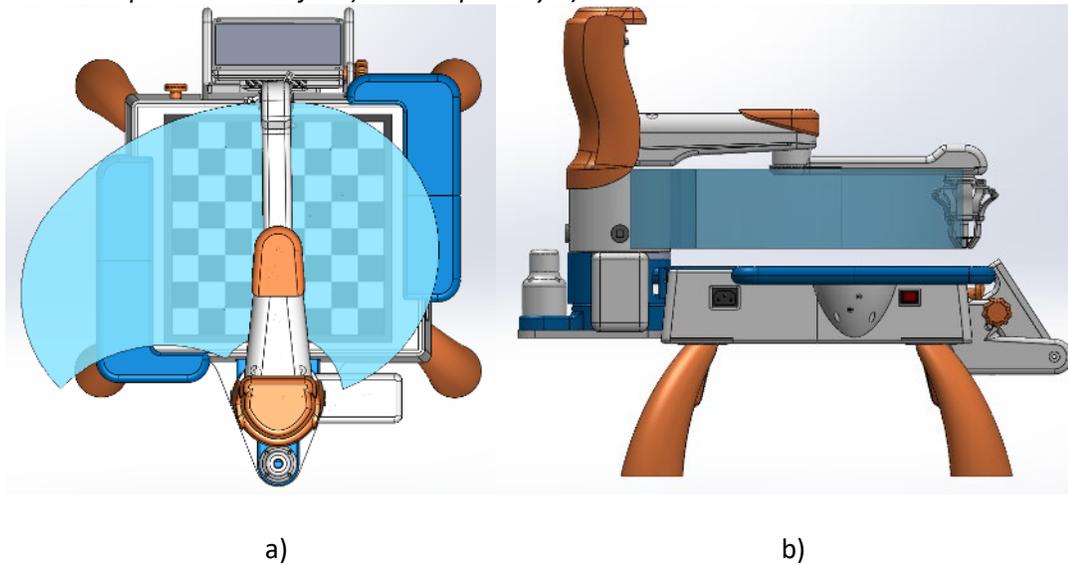
$$-0.5^\circ < q_1 < 126^\circ$$

$$0mm < q_2 < 90mm$$

$$25.5^\circ < q_3 < 180^\circ$$

Figura 41

Representación del espacio de trabajo: a) Vista superior y b) Vista lateral



Análisis dinámico del brazo robótico

La dinámica determina las fuerzas presentes en el manipulador robótico cuando este se encuentra en movimiento, esto permite obtener resultados de manera que se pueda dimensionar aquellos actuadores necesarios y con ello optimizar los recursos.

Para el procedimiento se toma en cuenta el cálculo obtenido anteriormente en la cinemática dentro del modelado matemático, además, es necesario obtener masas e inercias de cada uno de los eslabones, esto es recolectado mediante el software de diseño CAD/CAE, el desglose se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Descripción de masas e inercias de cada eslabón.

Estructura	Masa [kg]	Matriz de inercias [kg m ²]
Eslabón 1	0,902	$\begin{bmatrix} 7,06 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 1,26 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 6,71 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$
Eslabón 2	0,523	$\begin{bmatrix} 2,75 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 2,92 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 2,89 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}$
Eslabón 3	0,117	$\begin{bmatrix} 1,57 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 5,57 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 6,87 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$

Jacobiano geométrico

Para comenzar el modelado dinámico matemático, se obtiene el jacobiano geométrico como se muestra a continuación, tomando en cuenta el tipo de articulaciones. Se conforma de dos componentes, el rotacional (Ecuación 9) y el lineal (Ecuación 10).

$$j\omega_n = [R_0^0 \vec{z} \quad R_1^0 \vec{z} \quad \dots \quad R_{n-1}^0 \vec{z}] \quad (9)$$

$$jv_n = [(R_0^0 \vec{z}) \times (P_n^0 - P_0^0) \quad (R_1^0 \vec{z}) \times (P_n^0 - P_1^0) \quad \dots \quad (R_{n-1}^0 \vec{z}) \times (P_n^0 - P_{n-1}^0)] \quad (10)$$

Siendo R_n^0 , la matriz de rotación de la articulación n con respecto a la primera articulación. P_n^0 es el vector que define la posición de la articulación n. Tomando estos valores de la cinemática calculada anteriormente, esto es realizado para las 3 articulaciones.

Cálculo primera articulación

$$R_0^0 \vec{z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$j\omega_1 = [R_0^0 \vec{z} \quad \vec{0} \quad \vec{0}]$$

$$j\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(R_0^0 \vec{z}) \times (P_1^0 - P_0^0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$jv_1 = [(R_0^0 \vec{z}) \times (P_1^0 - P_0^0) \quad \vec{0} \quad \vec{0}]$$

$$jv_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo segunda articulación

$$R_1^0 \vec{z} = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$j\omega_2 = [R_0^0 \vec{z} \quad R_1^0 \vec{z} \quad \vec{0}]$$

Por ser junta prismática, no posee velocidad angular, por tanto, se añade un vector de ceros.

$$j\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Para la velocidad lineal, no se realiza el producto cruz, por tanto, el vector da como resultado:

$$(R_1^0 \vec{z}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$(R_0^0 \vec{z}) \times (P_2^0 - P_0^0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} l_2 \cos(q_1) \\ l_2 \sin(q_1) \\ l_1 + q_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_1) \\ l_2 \cos(q_1) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$jv_2 = [(R_0^0 \vec{z}) \times (P_2^0 - P_0^0) \quad (R_1^0 \vec{z}) \quad \vec{0}]$$

$$jv_2 = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_1) & 0 & 0 \\ l_2 \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo tercera articulación

$$R_2^0 \vec{z} = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$j\omega_3 = [R_0^0 \vec{z} \quad R_1^0 \vec{z} \quad R_2^0 \vec{z}]$$

$$j\omega_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(R_2^0 \vec{z}) \times (P_3^0 - P_2^0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} l_2 \cos(q_1) - l_3 \sin(q_1) \sin(q_3) + l_3 \cos(q_1) \cos(q_3) \\ l_2 \sin(q_1) + l_3 \sin(q_1) \cos(q_3) + l_3 \sin(q_3) \cos(q_1) \\ l_1 + q_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_2 \cos(q_1) \\ l_2 \sin(q_1) \\ l_1 + q_2 \end{bmatrix} \right)$$

$$(R_2^0 \vec{z}) \times (P_3^0 - P_2^0) = \begin{bmatrix} -l_3 \sin(q_1) \cos(q_3) - l_3 \sin(q_3) \cos(q_1) \\ -l_3 \sin(q_1) \sin(q_3) + l_3 \cos(q_1) \cos(q_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$jv_3 = [(R_0^0 \vec{z}) \times (P_3^0 - P_2^0) \quad (R_1^0 \vec{z}) \quad (R_2^0 \vec{z}) \times (P_3^0 - P_2^0)]$$

jv_3

$$= \begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_1) - l_3 \sin(q_1) \cos(q_3) - l_3 \sin(q_3) \cos(q_1) & 0 & -l_3 \sin(q_1) \cos(q_3) - l_3 \sin(q_3) \cos(q_1) \\ l_2 \cos(q_1) - l_3 \sin(q_1) \sin(q_3) + l_3 \cos(q_1) \cos(q_3) & 0 & -l_3 \sin(q_1) \sin(q_3) + l_3 \cos(q_1) \cos(q_3) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Velocidades en eslabones

El siguiente paso a esto es obtener las velocidades, esto es posible a partir del jacobiano correspondiente, aquí se clasifican de la misma manera en lineales y angulares. El cálculo se realiza con las siguientes expresiones:

$$\omega_n = R_n^{0T} \times j\omega_n \times \dot{q} \quad (11)$$

$$v_n = jv_n \times \dot{q} \quad (12)$$

Siendo \dot{q} , el vector de velocidades angulares en cada una de las articulaciones. A continuación, el cálculo de las velocidades para cada uno de los eslabones:

Cálculo primera articulación

$$\omega_1 = R_1^{0T} \times j\omega_1 \times \dot{q}$$

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & \sin(q_1) & 0 \\ -\sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}$$

$$v_1 = jv_1 \times \dot{q}$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo segunda articulación

$$\omega_2 = R_2^{0T} \times j\omega_2 \times \dot{q}$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & \sin(q_1) & 0 \\ -\sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = jv_2 \times \dot{q}$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_1) & 0 & 0 \\ l_2 \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} -\dot{q}_1 l_2 \sin(q_1) \\ \dot{q}_1 l_2 \cos(q_1) \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

Cálculo tercera articulación

$$\omega_3 = R_3^{0T} \times j\omega_3 \times \dot{q}$$

$$\omega_3 = \begin{bmatrix} -\sin(q_1)\sin(q_3) + \cos(q_1)\cos(q_3) & \sin(q_1)\cos(q_3) + \sin(q_3)\cos(q_1) & 0 \\ -\sin(q_1)\cos(q_3) - \sin(q_3)\cos(q_1) & -\sin(q_1)\sin(q_3) + \cos(q_1)\cos(q_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$\omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$v_3 = jv_3 \times \dot{q}$$

v_3

$$= \begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_1) - l_3 \sin(q_1)\cos(q_3) - l_3 \sin(q_3)\cos(q_1) & 0 & -l_3 \sin(q_1)\cos(q_3) - l_3 \sin(q_3)\cos(q_1) \\ l_2 \cos(q_1) - l_3 \sin(q_1)\sin(q_3) + l_3 \cos(q_1)\cos(q_3) & 0 & -l_3 \sin(q_1)\sin(q_3) + l_3 \cos(q_1)\cos(q_3) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

v_3

$$= \begin{bmatrix} -\dot{q}_1(l_2 \sin(q_1) - l_3 \sin(q_1)\cos(q_3) - l_3 \sin(q_3)\cos(q_1)) + \dot{q}_3(-l_3 \sin(q_1)\cos(q_3) - l_3 \sin(q_3)\cos(q_1)) \\ \dot{q}_1(l_2 \cos(q_1) - l_3 \sin(q_1)\sin(q_3) + l_3 \cos(q_1)\cos(q_3)) + \dot{q}_3(-l_3 \sin(q_1)\sin(q_3) + l_3 \cos(q_1)\cos(q_3)) \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

Modelo dinámico Euler-Lagrange

Para obtener el modelo dinámico, se utiliza el denominado método Euler-Lagrange, considera la energía cinética y potencial, teniendo de esta forma un cálculo sin fórmulas extra y utilizando las

velocidades de los eslabones. La energía cinética se divide de la misma manera en lineal y rotacional, se utilizarán las ecuaciones (13) y (14) respectivamente para su cálculo.

$$Kv_n = \frac{1}{2} m_n v_n^T v_n \quad (13)$$

$$K\omega_n = \frac{1}{2} \omega_n^T I_n \omega_n \quad (14)$$

Cálculo primera articulación

$$Kv_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^T v_1 = \frac{1}{2} (0,902) [0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$K\omega_1 = \frac{1}{2} \omega_1^T I_1 \omega_1 = \frac{1}{2} [0 \quad 0 \quad \dot{q}_1] \begin{bmatrix} 7,06 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 1,26 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 6,71 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}$$

$$K\omega_1 = 3,35 \cdot 10^{-3} \dot{q}_1^2$$

Cálculo segunda articulación

$$Kv_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^T v_2 = \frac{1}{2} (0,523) [-\dot{q}_1 l_2 \sin(q_1) \quad \dot{q}_1 l_2 \cos(q_1) \quad \dot{q}_2] \begin{bmatrix} -\dot{q}_1 l_2 \sin(q_1) \\ \dot{q}_1 l_2 \cos(q_1) \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

$$Kv_2 = 2,62 \cdot 10^{-1} \dot{q}_1^2 l_2^2 + 2,62 \cdot 10^{-1} \dot{q}_2^2$$

$$K\omega_2 = \frac{1}{2} \omega_2^T I_2 \omega_2 = \frac{1}{2} [0 \quad 0 \quad \dot{q}_1] \begin{bmatrix} 2,75 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 2,92 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 2,89 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix}$$

$$K\omega_2 = 1,45 \cdot 10^{-3} \dot{q}_1^2$$

Cálculo tercera articulación

$$Kv_3 = \frac{1}{2} m_3 v_3^T v_3$$

Debido al tamaño de la matriz se mostrará solamente el valor final de la operación.

$$Kv_3 = 5.85 \cdot 10^{-2} \dot{q}_1^2 l_2^2 + 1.17 \cdot 10^{-1} \dot{q}_1^2 l_2 l_3 \cos(q_3) + 5.85 \cdot 10^{-2} \dot{q}_1^2 l_3^2 + 1.17 \cdot 10^{-1} \dot{q}_1 \dot{q}_3 l_2 l_3 \cos(q_3) + 1.17 \cdot 10^{-1} \dot{q}_1 \dot{q}_3 l_3^2 + 5.85 \cdot 10^{-2} \dot{q}_2^2 + 5.85 \cdot 10^{-2} \dot{q}_3^2 l_3^2$$

$$K\omega_3 = \frac{1}{2} \omega_3^T I_3 \omega_3 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dot{q}_1 + \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,57 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 5,57 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 6,87 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$K\omega_3 = 3,44 \cdot 10^{-4} (\dot{q}_1 + \dot{q}_3)^2$$

Cálculo energías potenciales

Contempla la masa y la gravedad del eslabón, además de la altura a la cual se encuentra con respecto a la base del brazo robótico. Para obtenerla se utiliza la siguiente expresión (14), siendo H la matriz homogénea del eslabón n con respecto al eslabón inicial.

$$V_n = m_n g H_{n(3 \times 4)}^0 \quad (14)$$

Obteniendo los valores correspondientes de los eslabones. Siendo l_c la distancia del centro de masa del primer eslabón con respecto al punto de origen del sistema de referencia.

$$V_1 = 0.902(9.81)(l_c) = 4.7 \cdot 10^{-1}$$

$$V_2 = 0.523(9.81)(l_1 + q_2) = 5,13q_2 + 4.72 \cdot 10^{-1}$$

$$V_3 = 0.117(9.81)(l_1 + q_2) = 1,15q_2 + 1.06 \cdot 10^{-1}$$

Lagrangiano y cálculo de torques

Como se mencionó anteriormente, el modelo Euler-Lagrange, utiliza las energías cinética y potencial para el cálculo de torques. Por tanto, se usa la expresión denominada Lagrangiano (Ecuación 15), que consta de la sumatoria de estas energías contenidas dentro de todo el brazo robótico como un

conjunto.

$$L = \sum^n [K\omega_n + Kv_n - V_n] \quad (15)$$

El torque de cada uno de los eslabones es obtenido con la sumatoria de la derivada parcial con respecto a la posición más la derivada parcial con respecto a la velocidad articular y está derivada con respecto al tiempo, esto se puede observar en la ecuación 16.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (16)$$

Siendo τ_i , el torque calculado para el eslabón i . Y \dot{q}_i , la velocidad angular del eslabón calculado. Para continuar con el cálculo de esta fórmula es necesario reemplazar las variables de velocidad por un valor constante, siendo:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 80 \\ 40 \\ 40 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{°} \\ \text{S} \\ \text{S} \end{bmatrix}$$

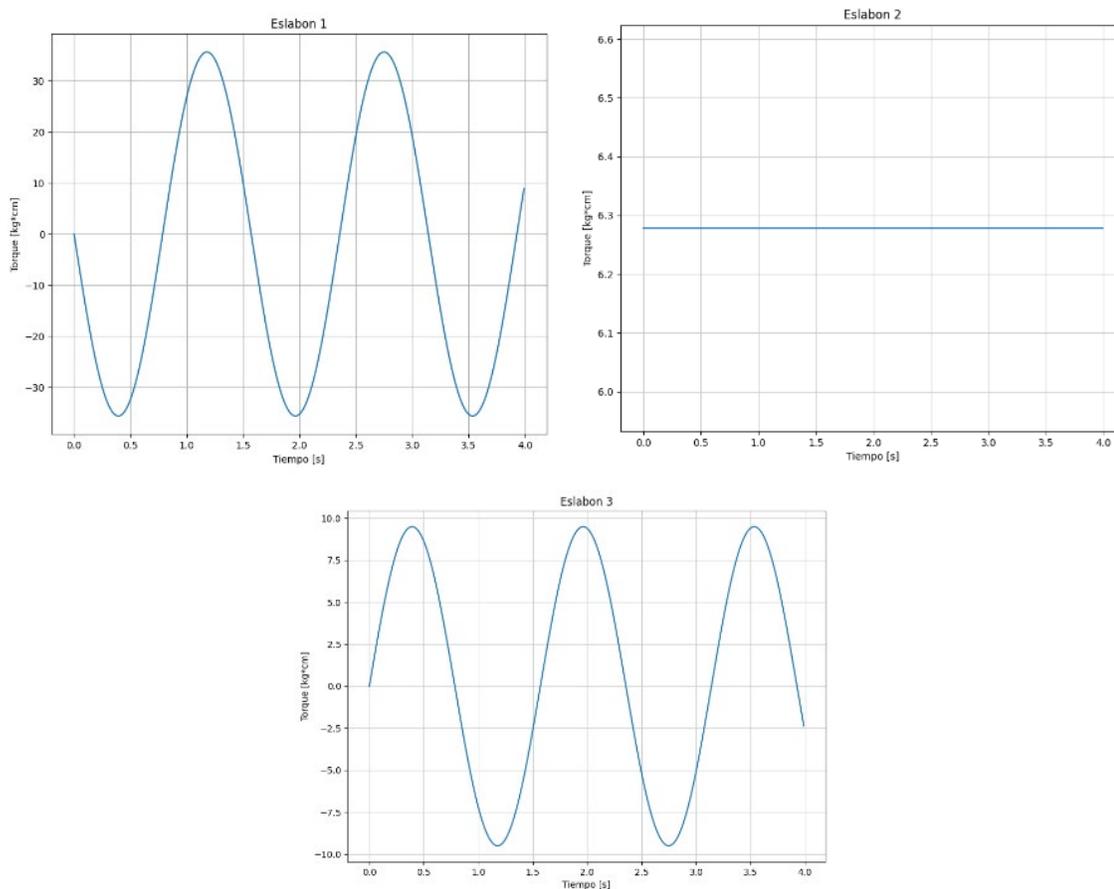
Obteniendo, además, los valores de posición de eslabones:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 80t \\ 40t \\ 40t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{°} \\ \text{°} \\ \text{°} \end{bmatrix}$$

Con ello es posible adquirir las magnitudes de torque con respecto al tiempo reemplazando cada una de las variables y posteriormente derivando las expresiones. La variación del torque con respecto al tiempo se evidencia en la Figura 42.

Figura 42

Gráficas de torque con respecto al tiempo para cada uno de los eslabones.



Obteniendo finalmente los valores máximos para cada una de las articulaciones (Tabla 14), permitiendo desglosar así las necesidades en los correspondientes motores. Cabe recalcar que la transmisión usada para cada uno de ellos permite aumentar la cantidad de torque emitido en los motores.

Tabla 14

Torque máximo requerido por eslabón.

	Torque Máximo [kg cm]
Eslabón 1	35,72
Eslabón 2	6,27
Eslabón 3	9,54

Selección de técnica de visión artificial

La adaptación de imágenes de forma óptima es importante para producir un resultado satisfactorio en cuanto a detección de objetos y validación de resultados, por tanto, una correcta selección del procesamiento teniendo en cuenta diversas técnicas, combinaciones y parámetros que cumplan con el objetivo planteado garantiza un alto porcentaje de éxito.

La aplicación del presente proyecto tiene las siguientes características: las piezas a detectarse poseen formas diferentes, en total 6 formas para el juego de ajedrez; existen dos colores de piezas; estas piezas se ubican en un tablero con una matriz de cuadrados con dos colores diferentes (blanco y negro); las piezas pueden estar en cualquier posición del tablero en un momento determinado dentro del juego; los movimientos ejecutados en el juego son secuenciales y por turnos; en total existen 32 piezas en el tablero.

Estas características permitirán adecuar el sistema de detección después de seleccionar el tipo de enfoque utilizado, existiendo dos posibilidades, una de ellas son los comandos con procesamiento secuencial basado en valores empíricos y pruebas preliminares, la segunda opción es el entrenamiento automatizado mediante redes neuronales para detección de las piezas, con muestras de la zona de detección y de las piezas dentro de una base de datos.

Esta segunda opción mencionada ha sido de gran utilidad en campos diversos, en donde la variabilidad del entorno es alta, no se puede controlar o toma en cuenta demasiados factores, como son detección de autos, personas, objetos para evitar colisiones en diversos medio ambientes con vehículos autónomos, sin embargo, para el presente proyecto, el entorno es controlable, debido a que la cámara enfocará únicamente al tablero de ajedrez con la iluminación necesaria y ajustada, además, la forma de cada una de las piezas no variará en el transcurso del tiempo.

Por tanto, el método de procesamiento secuencial para la detección es el más conveniente, este

se basa en el procedimiento que incluye los siguientes pasos: preprocesamiento, segmentación, extracción de características, reconocimiento e interpretación. Cada uno de estos compone un algoritmo computacional que contiene técnicas de procesado en un orden específico tomando en cuenta el tipo de iluminación, calidad de imagen, cantidad de colores, tipo de objeto a detectar e información relevante de las imágenes.

Diseño de algoritmo de detección de piezas

Al igual que en todo programa de visión artificial, el primer paso es la adquisición, consiste en obtener una o varias imágenes para su análisis. En el caso de este algoritmo se pueden diferenciar dos tipos de imágenes, el primer tipo es del tablero vacío de piezas de ajedrez, pero con la iluminación en condiciones reales, esta imagen servirá para crear los objetos de las casillas e inicializarlos además de utilizarse como contraste para determinar las casillas vacías, una vez se comience a detectar los movimientos. El segundo tipo de imagen es la que se obtiene al realizar cada cambio de posición de las piezas del tablero.

En el caso de la primera imagen, la que se obtiene con el tablero vacío, el proceso continúa con la etapa de preprocesamiento. En esta etapa primero se realiza un corte de la imagen para dejar solo el área de interés, que es todo lo que está dentro del tablero, se incluyen los bordes, pero se deja afuera todo lo captado por la cámara que podría producir interpretaciones de bordes falsas. También en esta etapa se binariza la imagen capturada, con un umbral adaptativo tal como lo permite la biblioteca OpenCV. De esta forma se obtiene una imagen en blanco y negro donde todos los píxeles por encima del umbral se transforman en blancos y todos los píxeles por debajo del umbral se transforman en negros tomando en cuenta valores de píxeles adyacentes. Esto permite que en los siguientes pasos donde se buscan bordes y posteriormente formas, se obtengan resultados más adecuados.

Para la etapa de segmentación se utiliza el algoritmo de detección de bordes de Canny, incluido en la biblioteca de OpenCV, con esta herramienta se identifican todos los bordes contenidos en la imagen anteriormente binarizada, la mayoría de estos corresponden a los límites de cada casilla del tablero y a los límites del mismo tablero, sin embargo, reflejos o sombras producidos por el ambiente pueden ser detectados también como bordes. El siguiente paso es filtrar los bordes detectados para dejar solo los bordes útiles, los cuales son únicamente los bordes horizontales, verticales y con una longitud mínima en píxeles, para esto se utiliza la función de la Transformada Lineal de Hough, mediante esta herramienta se logra inferir las líneas de la cuadrícula de ajedrez y del borde del tablero.

En la etapa de extracción de características se encuentran las esquinas de las casillas del tablero, esto se realiza buscando las intersecciones de los bordes horizontales y verticales. Se eliminan los puntos o intersecciones repetidas y se comprueba que el número de esquinas dentro del tablero sean 81, o 9 puntos por fila y 9 puntos por columna. Una vez se comprueba que se detectaron todas las esquinas, se obtiene la posición en coordenadas de cada una de las 64 casillas del tablero.

Finalmente, en la etapa de reconocimiento e interpretación, se crea un objeto por cada casilla con sus características identificativas como las coordenadas de sus límites, se asigna un nombre diferente a cada una siguiendo la notación estándar del ajedrez (a1, a2, ..., h7, h8) y se le asigna el estado de "vacía".

Cuando el juego comienza, se captura una imagen con todas las piezas en su posición de inicio, y a cada casilla se le asigna su pieza correspondiente o se mantiene el estado de vacía en caso de ser una de las casillas que no se ocupan al comenzar un nuevo juego. De cada casilla se extrae el color teniendo en cuenta las coordenadas encontradas al analizar el tablero vacío. Una vez se realiza un movimiento, se captura una nueva imagen, de la cual se vuelven a extraer el color de cada casilla y el color se compara individualmente casilla a casilla entre la imagen del estado actual y la del estado anterior, encontrando

las casillas que más variación de color poseen. Existen dos posibilidades a continuación, que existan dos casillas que cambiaron de color significativamente (movimiento normal o movimiento de captura), y que existan cuatro casillas que cambiaron de color significativamente (movimiento de enroque). Entonces se interpreta que estas casillas fueron protagonistas del movimiento. Ahora se pueden diferenciar tres escenarios. En el primero, que es el de movimiento normal, además de que se detectaron únicamente dos casillas con cambio significativo de color, también se distingue que una de estas casillas estaba con el estado de vacía y la otra casilla estaba ocupada, entonces se intercambia su estado. En el segundo escenario, las dos casillas con más cambio en su color estaban ocupadas, esto sucede cuando se realiza un movimiento de captura, aquí la casilla de la pieza capturada cambia su estado por la pieza que realiza la captura, y la casilla de la pieza que captura cambia su estado a vacía. Por último, se tiene el escenario del enroque, en este se intercambian los estados de las casillas vacías por los de las casillas de origen.

Una vez se detecta el cambio, se crea una cadena de caracteres que especifica el movimiento que va a ser utilizado por el motor.

Selección de motor de ajedrez

El motor de ajedrez será el proveedor de los movimientos a realizar dentro del juego en tiempo real, mediante programación se comunicarán las posiciones actuales de las piezas de ajedrez siendo así capaz de identificar los movimientos que realice el infante y respondiendo adecuadamente, tomando en cuenta el nivel de dificultad seleccionado.

Existe una gran variedad de motores en la actualidad, cada uno con ventajas y desventajas de acuerdo con el tipo de aplicación, capacidad de uso en diversos procesadores, código de programación base, entre otros. La característica más relevante para este proyecto será que pertenezca a código abierto, es decir, sea modificable y su uso no tenga ninguna restricción. Esto permitirá una adecuación

completa y optimizada dentro de la tarjeta de control seleccionada.

A continuación, se realiza una comparativa entre los diversos motores de ajedrez (Tabla 15), analizando factores como compatibilidad con procesadores ARM, puntuación, cantidad de juegos realizados para análisis, porcentaje de ganancias, entre otros. Una característica relevante es la probabilidad de superioridad (LOS), la cual se mide con la diferencia de puntaje y porcentaje de ganancias mediante distribución estadística entre dos motores de ajedrez (el valor dentro de la tabla es la probabilidad de superioridad del motor izquierdo frente al derecho). Estos datos cuantificables son obtenidos desde un organismo independiente de medición para los motores de ajedrez, denominado como Computer Chess Rating Lists (CCRL).

Tabla 15

Comparativa entre motores de ajedrez.

Característica	Stockfish	Dragon	Fat Fritz 2	Berserk	Revenge
Ranking (CCRL)	1	2	3	4	5
Rating (ELO)	3531	3530	3512	3479	3474
Juegos realizados	804	824	2879	1012	1350
Porcentaje de ganancias	63,6%	63,7%	64,1%	53,9%	54,6%
Probabilidad de superioridad (LOS)	52.8%	96.2%	100%	67.9%	NA
Control de tiempo [mov/min]	40/15	40/15	40/15	40/15	40/15
Tipo de uso	Código abierto	Comercial	Comercial	Código abierto	Comercial
Compatibilidad con procesador ARM	Si	Si	Si	Si	Si

Nota. Obtenido de CCRL ranking realizado de todos los motores de ajedrez

(<https://ccrl.chessdom.com/ccrl/4040/index.html>) y Engines - Chess Programming Wiki

(<https://www.chessprogramming.org/Engines>).

Esto nos permite visualizar una alta similitud de resultados entre la capacidad de juego de los diversos motores de ajedrez, los valores de rating recalcan altas capacidades en cualquiera de las cinco

opciones listadas anteriormente, exceptuando aquellas comerciales. Sin embargo, todos estos valores son altos y superan los requerimientos para un juego normal frente a una persona común en ajedrez en su dificultad más alta, no obstante, es posible reducir tal dificultad de acuerdo con los requerimientos de la aplicación. Por tanto, la selección del motor de ajedrez se basa más en la integración con ARM, siendo estos los procesadores generalmente usados en Single-Board Computers (SBC) y su facilidad de uso.

Las SBC proveen de una capacidad de procesamiento de media a baja con respecto a computadores portátiles o de escritorio comerciales en la actuales e integran varios componentes electrónicos como microprocesador, memoria RAM y ROM, pines de entrada y salida de datos, entre otros.

Esta integración es permisible mediante una intercomunicación con UCI (*Universal Chess Interface*, por sus siglas en inglés), el cual es un protocolo de comunicación manejado por los motores de ajedrez, este ya se integra con todos los comentados anteriormente. Siendo así, para el presente proyecto todas las condiciones son satisfechas, de manera que se selecciona el motor Stockfish de entre las opciones, debido a que posee más casos de uso, manteniendo una mayor estabilidad en cuestión de corrección de errores o fallos que existan en el código, reduciendo así la posibilidad de encontrar este tipo de problemas al usarlo.

Selección de componentes electrónicos necesarios

Los dispositivos por utilizarse como actuadores, pre actuadores, convertidores de señales, tarjeta de control, entre otros, son elegidos en base a una comparativa realizada de acuerdo con los requerimientos de diseño.

Actuadores

Tabla 16

Comparativa de motores eléctricos.

Característica	Servomotor SG90	Servomotor MG90S	Servomotor MG995	Motor a pasos NEMA 17	Motor a pasos NEMA 23
Voltaje de operación [V]	4,8 - 6	3 - 7,2	4,8 - 6,6	12	12
Corriente de operación [A]	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	0,5-0,9	1,7	2,8
Torque [kg*cm]	1,2 - 1,4	2,2 - 2,5	9,4 - 11	4,4	12,8
Velocidad [s/°]	0,12/60	0,1/60	0,2/60	Variable	Variable
Tipo de engranes	Plástico	Metal	Metal	No aplica	No aplica
Ángulo de rotación [°]	0 - 180	0 - 180	0 - 180	Indefinido	Indefinido
Resolución [°]	3	3	2	1,8 – 0,05625	1,8 – 0,05625
Peso [g]	9	13,4	55	210	700
Diámetro de eje [mm]	-	-	6	5	6,35
Longitud de eje [mm]	-	-	4,5	25	25
Disponible en el país	Si	Si	Si	Si	Si
Precio	3	5	8	25	35

Nota. Obtenido de *Micro Servo SG90*, por Electromania, 2020

(<https://www.electromania.pe/producto/micro-servo-sg90/>); *Servo Mini SG90*, por Electrocrea, 2021

(<https://electrocrea.com/products/servo-mini-sg90/>); *Micro Servo MG90S 2.5Kg*, por Naylamp, 2021

(<https://naylampmechatronics.com/servomotores/246-micro-servo-mg90s.html>); *Servomotor Tower Pro MG995*,

por SanDoRobotics, 2023 (<https://sandorobotics.com/producto/mg995/>); *Motor NEMA 17*, por e-Lab Shop, 2022

(<https://e-labshop.com/shop/arduino/modulos/servos-motores-y-ruedas/motor-nema-17-1-7a-alto-torque-17hs4401s/>) y *Motor Paso A Paso Nema 23*, por Electronilab, 2023 (<https://electronilab.co/tienda/motor-paso-a-paso-nema-23-125-oz-in-200-pasos-vuelta/>).

Posterior a los resultados obtenidos con el análisis dinámico del brazo robótico, es necesaria una selección de los actuadores que permitirán efectuar el movimiento, para ello, se usarán motores eléctricos DC, los cuales pueden ser servomotores o motores a pasos. La Tabla 16 contiene una comparativa entre diversos motores como SG90, MG90S, MG995, motor a pasos NEMA 17 y NEMA 23 disponibles en el mercado local e internacional que son usados con más frecuencia para aplicaciones de bajo torque y por su facilidad de integración en diversas tarjetas de control. Se detallan características como precio, torque, voltaje de alimentación, amperaje, tipo de conexión, entre otros.

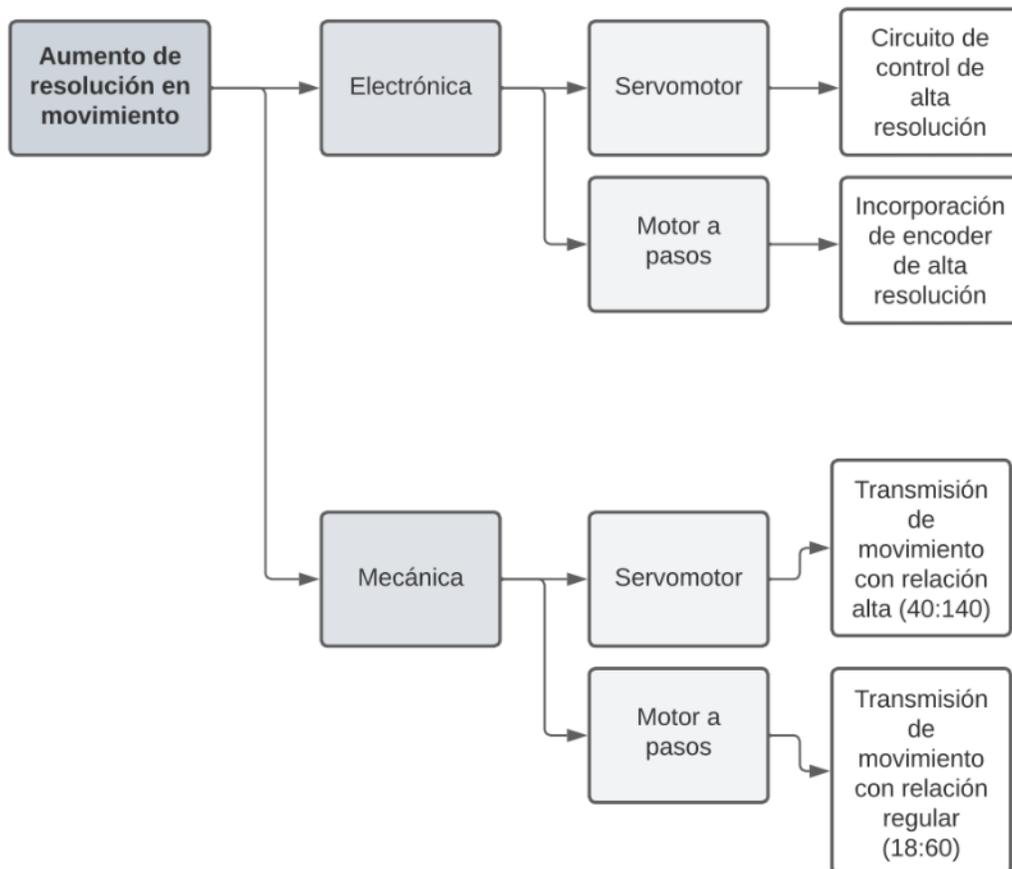
Como se observa en la tabla anterior, las dos categorías principales para motores aplicadas a la robótica y/o manipuladores articulares son servomotores y motores a pasos, estos poseen diferencias notables que los hacen convenientes en diversos escenarios. Los servomotores están conformados por una menor cantidad de polos en comparación con los motores a pasos, aunque poseen un circuito de control de ángulo mediante encoder o sensores de efecto Hall (Micropap, 2021). Esta diferencia de polos permite al motor a pasos poseer una resolución de posición más alta (entre 1.8° a 0.9°) en conjunto con repetibilidad del ángulo deseado, incluso mayor si se utilizan micro pasos, finalmente, la velocidad de rotación es controlable. El servomotor posee mayor torsión en comparación al motor a pasos, además de una curva de velocidad lineal, sin embargo, para conseguir la misma resolución de posición, el coste de los dispositivos se eleva considerablemente (CLR, 2020).

Con ello, uno de los factores determinantes para la selección de componentes es la resolución requerida en el movimiento, lo que se traduce a la mínima variación de movimiento angular ejercida por el actuador. Para determinar esto se realizó una simulación de las posiciones del manipulador tomando en cuenta el tamaño del tablero de ajedrez y cada una de sus casillas, la cinemática inversa permitió el cálculo de cada uno de los ángulos entre eslabones, registrando estos en una bitácora. Para generar una respuesta rápida pero útil se obtuvo la diferencia de ángulo entre la posición actual y la anterior,

recorriendo cada una de las 64 casillas desde abajo hacia arriba tomando la menor variación de ángulo entre eslabones, la menor medida obtenida fue de 0.3° , con un promedio de 6.8° .

Figura 43

Desglose de sistemas para obtención de mayor resolución.



Esto proporciona una característica cuantificable a satisfacer, tal resolución mínima es obtenible con varios tipos de sistema (Figura 43), las primeras opciones electrónicas supondrían un alto coste debido a la calidad y capacidad necesaria de los componentes. Por otro lado, las opciones mecánicas con un coste más reducido proveen una solución más viable, teniendo en cuenta servomotores de baja resolución como los listados en la Tabla 16, se necesita una relación alta para proveer un movimiento con la resolución necesaria de 0.3° , sin embargo para los motores a pasos la relación de movimiento es menor e incluso es posible usar "micro pasos" esto se refiere a una reducción del ángulo recorrido por

paso (desde la mitad hasta 32 veces menos), para ello es necesario tomar en cuenta el torque necesario debido a que al efectuar este tipo de control, el par del motor es reducido. Siendo esta última opción la más viable, con una transmisión de menor tamaño y coste reducido, seleccionando así el motor a pasos NEMA 17 como actuador para cada uno de los eslabones.

Pre actuadores

Estos componentes electrónicos dependen completamente de los actuadores seleccionados, por tanto, para los motores NEMA 17 son necesarios controladores con respuesta digital de pulsos, estos permiten seleccionar la dirección de movimiento de los motores, la velocidad de movimiento (mediante la reducción o aumento del tiempo de espera entre pulsos) y la cantidad de ángulo recorrido especificando la cantidad de pasos a moverse.

Los controladores más usados son los modelos A4988 y DRV8825, sus características se muestran en la Tabla 17, las diferencias toman en cuenta un cambio en la cantidad de potencia que son capaces de soportar, la intensidad máxima en el controlador A4988 es de 2 amperios, en comparación con el DRV8825 que soporta hasta 2.5, esta característica es relevante debido al torque a usarse, siendo 35.72 [kg cm] el mayor valor obtenido, el motor a pasos necesitará aproximadamente 1.5 amperios, efectuado una regla de tres, para un correcto funcionamiento, incluyendo la transmisión de potencia con relación de 1 a 9 en el brazo robótico. Cada uno de ellos cuenta con protecciones a sobre corrientes, cortocircuitos, sobretensiones e incluso a temperaturas demasiado altas, para garantizar un correcto funcionamiento del prototipo en el cual son usados.

Con las características mencionadas anteriormente, el controlador seleccionado es A4988, siendo una opción viable y que satisface las necesidades del presente proyecto.

Tabla 17

Características de controladores para motores a pasos.

Característica	A4988	DRV8825
Voltaje máximo [V]	35	45
Intensidad máxima [A]	2	2,5
Micro pasos máximos	16	32
Rs típico	0,05; 0,1 o 0,2	0,1
Protección sobreintensidad	Si	Si
Protección sobretensión	Si	Si
Protección cortocircuito	Si	Si
Precio [\$]	5	8

Nota. Obtenido de *Micro Servo SG90*, por Electromania, 2020

(<https://www.electromania.pe/producto/micro-servo-sg90/>); *Servo Mini SG90*, por Electrocrea, 2021

(<https://electrocrea.com/products/servo-mini-sg90/>); *Micro Servo MG90S 2.5Kg*, por Naylamp, 2021

(<https://naylampmechatronics.com/servomotores/246-micro-servo-mg90s.html>); *Servomotor Tower Pro MG995*,

por SanDoRobotics, 2023 (<https://sandorobotics.com/producto/mg995/>); *Motor NEMA 17*, por e-Lab Shop, 2022

([https://e-labshop.com/shop/arduino/modulos/servos-motores-y-ruedas/motor-nema-17-1-7a-alto-torque-](https://e-labshop.com/shop/arduino/modulos/servos-motores-y-ruedas/motor-nema-17-1-7a-alto-torque-17hs4401s/)

[17hs4401s/](https://e-labshop.com/shop/arduino/modulos/servos-motores-y-ruedas/motor-nema-17-1-7a-alto-torque-17hs4401s/)) y *Motor Paso A Paso Nema 23*, por Electronilab, 2023 (<https://electronilab.co/tienda/motor-paso-a-paso-nema-23-125-oz-in-200-pasos-vuelta/>).

Iluminación

Siendo uno de los puntos que se relaciona directamente con la visión artificial, la iluminación de la escena en el presente proyecto toma en cuenta la luz recibida por todas las secciones del tablero de

ajedrez. La uniformidad en la detección es el punto clave, de tal forma que no se generen puntos de mayor intensidad lumínica debido a que esto provocará un desbalance en la extracción de información de las imágenes, al poseer un brillo uniforme a lo largo y ancho de todo el tablero la detección se torna estable. Por tanto, la fuente lumínica será difusa usando el mayor ángulo de apertura posible, abarcando así mayor área iluminada.

El tipo de iluminación de la escena será frontal, disminuyendo así la cantidad de sombras y siendo mucho más controlable el haz de luz usado. Para el tipo de luminaria, es elegida la luz led debido a su bajo consumo energético y poca energía residual en forma de calor.

Para la iluminación decorativa que será colocada debajo del tablero para estimular la atención de los niños de manera continua, es necesario una alta gama de colores, siendo posible reproducir diversos tonos para que se genere un ambiente dinámico mientras el niño interactúa con el prototipo. Con esto, se selecciona por tanto luces RGB, estas constan de tres fuentes lumínicas (roja, verde y azul) que trabajan en conjunto para producir una alta gama de colores al variar su intensidad individualmente.

Estas luces LED deben poseer una alta compatibilidad con varias tarjetas de control para garantizar el funcionamiento correcto y continuo de las mismas, además de poseer un tiempo de latencia bajo para así efectuar cambios de color dentro de diversos procesos de funcionamiento del prototipo. Existen diversos modelos capaces de cumplir con estos requerimientos, como WS2812B (Worldsemi, 2019), TLC5947 (Texas Instruments, 2020), APA104 (Greeled Electronic, 2020), entre otros. Son luces que funcionan con señales de PWM para un control direccionable, siendo capaces de seleccionar un color para cada led que se encuentre dentro del conjunto electrónico.

Con lo mencionado anteriormente, todas las opciones descritas son viables, sin embargo, se seleccionan las luces led WS2812B debido a que existe disponibilidad dentro del país.

Tarjeta de control

Para la tarjeta de control es necesario tomar en cuenta cada uno de los dispositivos que deben activarse, señales que deben recibirse y además el procesamiento digital necesario para todas las funciones del prototipo, esto permite detallar con objetividad las necesidades del dispositivo (Tabla 18).

Enumerando tales funcionalidades, como primer punto los dispositivos a activarse son pre actuadores, iluminación (tomando en cuenta que los dispositivos seleccionados necesitan salida PWM), cámara, señales sonoras y pantalla de interfaz humano máquina. Cada uno de los dispositivos maneja diferentes tipos de señales. Las señales por recibirse son digitales con recepción de imagen de la cámara, pulsaciones en pantalla y los fines de carrera para el posicionamiento de eslabones.

El procesamiento digital toma en cuenta la modificación de imágenes para la obtención de datos seleccionados para la visión artificial, validación de posiciones de piezas en el tablero, ingreso y recepción de movimientos con el motor de ajedrez Stockfish, cálculo de posiciones de eslabones para el movimiento de piezas, procesamiento de datos para su posterior visualización en pantalla con todos los componentes de la interfaz humano máquina (incluyendo imágenes, videos, botones y mensajes textuales y sonoros).

Finalmente, la validación de todas las acciones mediante programación para garantizar un proceso correcto de las acciones realizadas y reduciendo errores de detección de piezas, juego coherente de ajedrez y validación de lecciones en la sección de enseñanza. Para un funcionamiento continuo y correcto de todas estas características es necesario procesamiento multihilo, designando diferentes tareas a varios núcleos del procesador de la tarjeta de control.

Tabla 18

Características mínimas necesarias para la tarjeta de control del prototipo.

Tipo de elemento	Cantidad
Pines de salida digital	9
Pines de entrada	3
Conexión de cámara	Si
Conexión de pantalla	Si
Salida de audio	Si
Procesamiento multihilo	Si

Tabla 19

Especificaciones técnicas de tarjetas de control.

Característica	ASUS Tinker Board S	LePotato (AML-S905X-CC)	Rock Pi 4	Raspberry Pi 4
Pines GPIO	28	24	6	24
Procesador	4 núcleos / 1,8 GHz	4 núcleos / 1,5 GHz	2 núcleos / 1,5 GHz	4 núcleos / 1,5 GHz
Memoria RAM [GB]	2	1	4	4
GPU	Mali-T764	Mali-450	Mali-T860	VideoCore VI
Memoria interna [GB]	16	Externa	Externa	Externa
Salida de audio	Si	Si	Si	Si
Conector de cámara	Si	No	Si	Si
Salida de video	Si	Si	Si	Si
Precio base [\$]	150	35	95	80
Disponibilidad en el país	No	No	No	Si

Nota. Obtenido de *Single Board Computer*, por All3DP, 2022 (<https://all3dp.com/es/1/single-board-computer-placa-computadora-alternativas-raspberry-pi/>); *The best Raspberry Pi alternatives (and single-board computers explained)*, por ZDNET, 2023 (<https://www.zdnet.com/article/best-raspberry-pi-alternative/>) y *Best Single Board Computers*, por Cherry Picks, 2023 (<https://www.cherrypicksreviews.com/single-board-computers>)

Existen varias tarjetas de control en el mercado con características suficientes de procesamiento para el presente proyecto, tomando en cuenta aquellas con software libre, pines GPIO (General Purpose

Input/Output) para conexión de dispositivos electrónicos de baja potencia y capacidad de procesamiento de imágenes, se analiza de forma técnica cada una de ellas.

Sus especificaciones (Tabla 19) muestran procesadores desde 1.5 a 1.8 [GHz] de velocidad, con una cantidad de pines GPIO desde 6 a 28 de acuerdo con el modelo seleccionado, la memoria interna de las tarjetas en su mayoría es externa, por lo cual, es posible expandirla de acuerdo con las necesidades. Todas cuentan con salida de video, por tanto, es posible conectarlas a una pantalla externa que sirva como interfaz humano-máquina. Sin embargo, la característica que no se satisface en su mayoría es la disponibilidad en el país, solamente el modelo Raspberry Pi 4 lo cumple.

De acuerdo con esto, se selecciona la tarjeta Raspberry Pi 4 para cumplir con el procesamiento de las tareas del presente proyecto.

Esta tarjeta de control cuenta con una alta compatibilidad con el procesamiento de imágenes y una alta cantidad de recursos en continua actualización (Pajankar, 2022, págs. 35-37).

Pantalla Interfaz Humano-Máquina

La interfaz humano-máquina será el medio de interacción continua por parte del usuario, por tanto, debe asegurar un funcionamiento sin interrupciones o fallos. Para el presente proyecto la forma de comunicación óptima con la máquina será de pulsos táctiles, facilitando así el aprendizaje del infante.

La compatibilidad es otro punto que tomar en cuenta, el dispositivo debe ser capaz de trabajar con la tarjeta de control seleccionada. Una pantalla de este tipo debe asegurar un tamaño suficiente para mostrar todas las imágenes, botones, instrucciones y advertencias sin provocar ninguna dificultad al momento de usar la interfaz para navegar entre diversas opciones del prototipo.

Para pantallas táctiles, es importante tomar en cuenta que los niños pueden presentar una habilidad ligeramente reducida en la selección de componentes, como mayor tiempo al tener

presionado los botones, imprecisión de selección en objetos lejanos a ellos (pantallas muy grandes) o selección errónea en componentes demasiado cercanos entre sí (Markopoulos & Giannakos, 2021).

Por tanto, para generar un equilibrio entre tamaño, peso y distancia de interacción, se selecciona un tamaño de 7 pulgadas para la pantalla, con una resolución aproximada de 1024 por 600 píxeles.

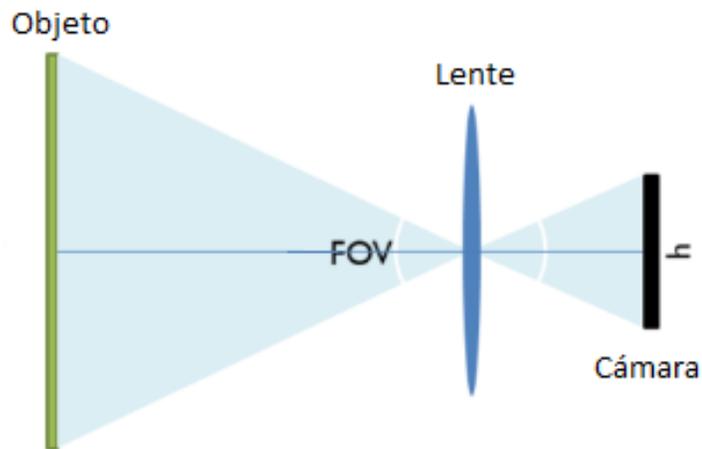
El modelo elegido de la marca EVICIV proporciona estas características además de cumplir con un accesorio adicional, los altavoces. Su pantalla es IPS, por tanto, posee un ángulo de visibilidad aumentado (178°), conexión HDMI y tiempo de respuesta mínimo de 3 milisegundos (EVICIV, 2023).

Cámara

Este dispositivo es una parte fundamental para el reconocimiento en la visión artificial, su selección debe tomar en cuenta la resolución para una captura de imágenes con el detalle suficiente para la extracción de información mediante algoritmos de programación. Para la tarjeta de control seleccionada existen varias versiones que pueden ser usadas, sin embargo, otra característica a considerar es la distancia entre el tablero (área de visión) y la cámara, esta medida se relaciona con el campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés) (Figura 44), siendo este el ángulo de apertura del área de visión de la cámara, mientras más grande es este valor, mayor anchura y altura es capaz de visualizar en un objeto. Las características se observan en la Tabla 20.

Figura 44

Representación visual del campo de visión (FOV).



Nota. Tomado de *Choosing a Lens to meet FOV and WD requirements*, por Scientific Imaging, 2021, Scientific Imaging (<https://scientificimaging.com/knowledge-base/choosing-a-lens-to-meet-fov-and-wd-requirements/>).

Tabla 20

Características de cámaras para tarjeta de control Raspberry Pi.

Característica	Raspberry Pi Cam V2	Raspberry Pi Cam V3	Raspberry Pi Wide Angle	Raspberry Pi Cam HQ
Resolución [MP]	8	12	5	12
FOV [°]	62,2	66	130	Variable
Tamaño (alto x ancho x profundidad) [mm]	25 x 24 x 9	25 x 24 x 11,5	25 x 24 x 11,5	38 x 38 x 18,4
Peso [g]	3	4	4	30,4

Nota. Obtenido de *Raspberry Pi Documentation - Camera*, por Raspberry Pi, 2023

(<https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>) y *Raspberry Pi 4 Camera Fisheye Gran Angular*, por Unistorm, 2023

(https://www.amazon.com/gp/product/B0748KF97S/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o04_s01?ie=UTF8&psc=1).

De manera que, con el valor de campo de visión se calcula la distancia (Ecuación 17) con un ancho del área de visión de 31 [cm], para lo cual se obtienen 45 [cm] aproximadamente entre la cámara

y el tablero para la “Raspberry Pi Cam V2”, el modelo “Raspberry Pi Wide Angle” proporciona una distancia mínima de 12.6 [cm] aproximadamente. Esto teniendo en cuenta el formato de salida de imagen, siendo 16:9, por tanto, el campo de visión horizontal será menor que el vertical. Seleccionando así este último modelo mencionado para el presente proyecto.

$$d = \frac{A/2}{\tan (FOV/2)} * C \quad (17)$$

Siendo A , el ancho del área de visión; FOV , campo de visión en grados y C , el formato de salida de imagen (por ejemplo, 16:9 como 16/9).

Fuente de alimentación

Todos los dispositivos electrónicos seleccionados anteriormente funcionan con corriente continua (DC), la fuente de alimentación proporcionará la energía necesaria para que el prototipo funcione de forma correcta y sin interrupciones en su proceso normal. Por tanto, es necesario detallar el consumo energético de cada uno de los elementos a usarse, permitiendo así evaluar la potencia máxima del prototipo. Tomando en cuenta el consumo máximo de cada uno de los componentes activos (Tabla 21) obtenemos un consumo total de 118.52 vatios.

Para la entrega de energía se selecciona el dispositivo que entregue mayor cantidad de voltaje, reduciendo así la corriente que fluye a través de él, en este caso, tomando en cuenta una fuente conmutada de 12 voltios siendo esta la más accesible en el mercado local, obtenemos una corriente de 9.9 amperios aproximadamente. Una fuente de alimentación que proporcione 5 voltios necesitaría resistir 24 amperios aproximadamente.

El mayor consumo energético se ubica en los motores y las luces decorativas, con 61.2 y 29.4

[W] respectivamente siendo estos los componentes más críticos, cabe recalcar que se toma en cuenta un consumo máximo por seguridad, es posible que los componentes no lleguen a poseer tanta corriente en el funcionamiento normal. Con lo cual, de acuerdo con disponibilidad en el mercado se selecciona una fuente con capacidad de 15 amperios y 12 voltios.

Tabla 21

Consumo energético de componentes eléctricos.

Elemento electrónico	Corriente máxima [A]	Tensión máxima [V]	Cantidad	Potencia total [W]
Motor NEMA 17	1,70	12	3	61,2
Servomotor MG90S	0,5	5	1	2,5
LEDs WS2812B	0,06	5	98	29,4
Pantalla táctil 7"	2	5	1	10
Raspberry Pi 4	3	5,1	1	15,3
Controladores A4988	0,008	5	3	0,12
Consumo total				118,52

Nota. Obtenido de *WS2812B-2020*, por WorldSemi, 2020 (https://www.mouser.com/pdfDocs/WS2812B-2020_V10_EN_181106150240761.pdf); *Eviciv 702*, por Eviciv, 2023 (<https://m.media-amazon.com/images/I/A11JRd05MTL.pdf>); *A4988*, por Allegro, 2021 (<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/338780/ALLEGRO/A4988.html>) y *Raspberry Pi Product Brief*, por Raspberry, 2021 (<https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>)

Diseño de circuito de control

El objetivo del circuito de control es regular, supervisar y dirigir el funcionamiento del sistema. Es decir, se encarga de recibir información de entrada, proveniente de la cámara, de los sensores de fin

de carrera y de la pantalla a través de la interfaz gráfica, procesar esa información en la tarjeta de control y generar una respuesta o salida adecuada hacia los actuadores que en este caso son los tres motores a pasos de movimiento del brazo, el servo motor del efector final y las luces decorativas inferiores, además de la propia retroalimentación de la interfaz gráfica. Por último, en el mismo circuito se ha incluido la alimentación de cada dispositivo a su nivel de voltaje adecuado.

Tabla 22

Asignación y descripción de los puertos de la tarjeta de control y su conexión con la placa de control.

Puerto tarjeta de control	Tipo de señal	Función	Destino en la placa de control
GPIO4	Salida digital	Energizar los motores a pasos	EN
GPIO12	Salida digital	Movimiento del primer eslabón	STEP X
GPIO13	Salida digital	Movimiento del segundo eslabón	STEP Y
GPIO17	Salida digital	Dirección del primer eslabón	DIR X
GPIO18	Salida digital	Luces decorativas	N/A
GPIO19	Salida digital	Movimiento del tercer eslabón	STEP Z
GPIO22	Salida digital	Dirección del tercer eslabón	DIR Z
GPIO23	Entrada digital	Fin de carrera del primer eslabón	LIMIT X
GPIO24	Entrada digital	Fin de carrera del segundo eslabón	LIMIT Y
GPIO25	Entrada digital	Fin de carrera del tercer eslabón	LIMIT Z
GPIO26	Salida digital	Movimiento de efector final	SS1
GPIO27	Salida digital	Dirección del segundo eslabón	DIR Y

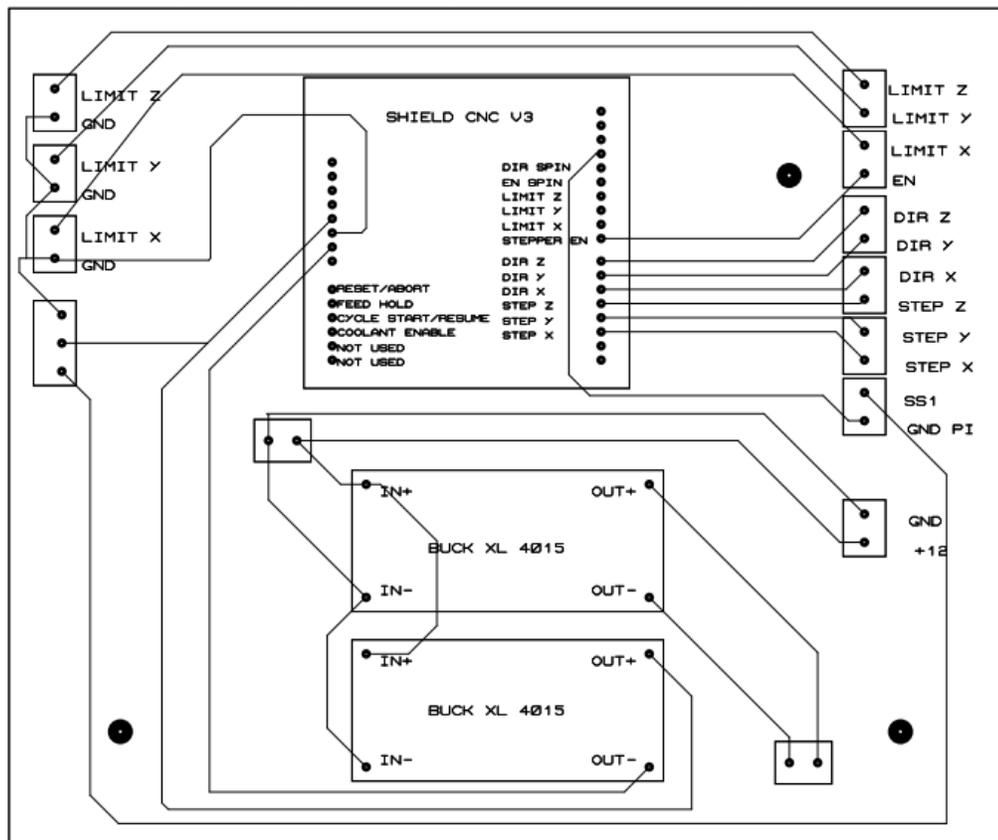
El circuito de control propuesto cuenta con conectores hembra que encajan en una placa comercial llamada Shield CNC V3, la cual está lista para montar al menos tres controladores de NEMA 17, en este caso los A4988, el uso de esta placa simplifica las conexiones comunes como las de alimentación de los motores a 12 [V], las de alimentación de los controladores a 5 [V] y los puntos comunes de tierra, también facilita la configuración de los pines para micro pasos. El circuito también cuenta con dos convertidores de voltaje DC-DC denominados Buck, los cuales reducen el voltaje de la

fuentes principales de 12 [V] a 5 [V] necesarios para alimentar las luces, los controladores A4988 y el servomotor.

Las señales de entrada y salida de la tarjeta de control se especifican en la Tabla 22 y se muestra en donde se conectan en el circuito de control propuesta, en la Figura 45 se muestra el esquema de conexiones.

Figura 45

Placa de control con sus componentes y terminales para conexión con los dispositivos externos.

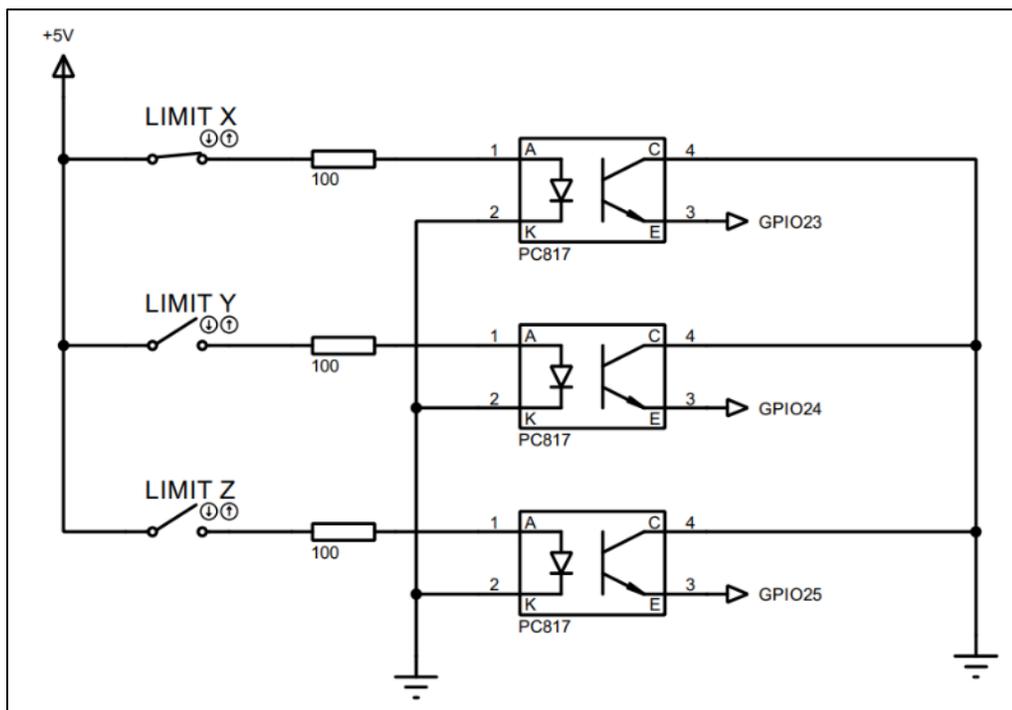


Las señales de entrada pueden provenir de tres fuentes diferentes como se mencionó con anterioridad, primero de la cámara, esta se conecta directamente a la tarjeta de control a través de un cable CSI por lo que no requiere de un circuito adicional. La segunda fuente es la pantalla a través de la interfaz gráfica, en este caso también se conecta directamente a la tarjeta de control por puertos

específicos por lo tanto tampoco necesita de circuitos adicionales. La tercera fuente de señales de entrada son los sensores de fin de carrera, existen tres, uno por cada eslabón o motor a pasos, estos si requieren de un circuito adicional debido a que se utilizan optoacopladores para eliminar los falsos positivos de los propios sensores, el circuito utilizado se muestra en la Figura 46.

Figura 46

Circuito de acondicionamiento de la señal de los sensores fin de carrera para las tres articulaciones del brazo robótico.



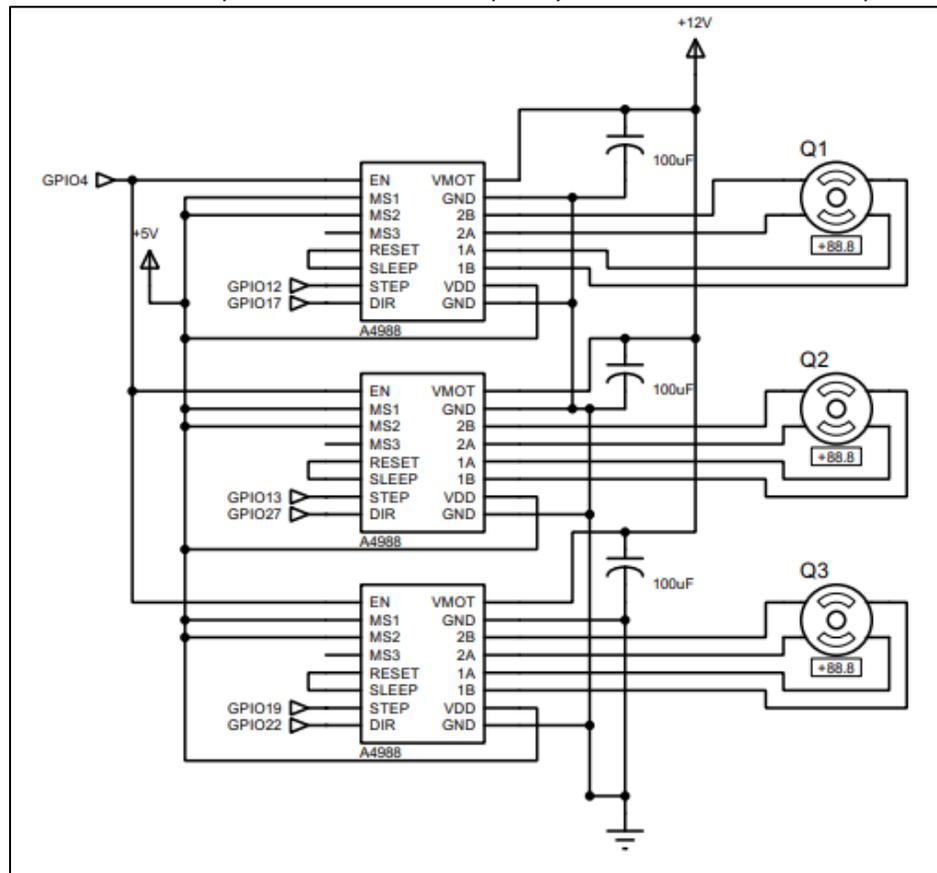
Las señales de salida van dirigidas a varios dispositivos (Figura 47), primeramente, a la pantalla, con la misma conexión mencionada antes por lo que no necesitan circuitos adicionales. El resto de las señales si necesitan pasar por circuitos adicionales, concretamente son 9 señales distintas, tres de estas señales pertenecen a la dirección a la que debe moverse cada motor a pasos estas se conectan desde la tarjeta de control pasando por una placa intermedia hasta el controlador A4988 de los motores y del controlador hacia los propios motores, tres señales más determinan cuando debe dar un paso cada motor estos siguen la misma ruta que las señales de dirección pero a pines diferentes del controlador

A4988, una señal adicional controla la energización de los tres motores a pasos en conjunto.

Adicionalmente, una señal determina el ángulo al que debe desplazarse el servomotor, esta señal atraviesa el circuito de control sin alterarse. La última señal determina la intensidad y tonalidad de cada led de la iluminación decorativa inferior.

Figura 47

Diagrama de conexiones desde los puertos GPIO de la Raspberry Pi 4 hasta los motores a pasos.



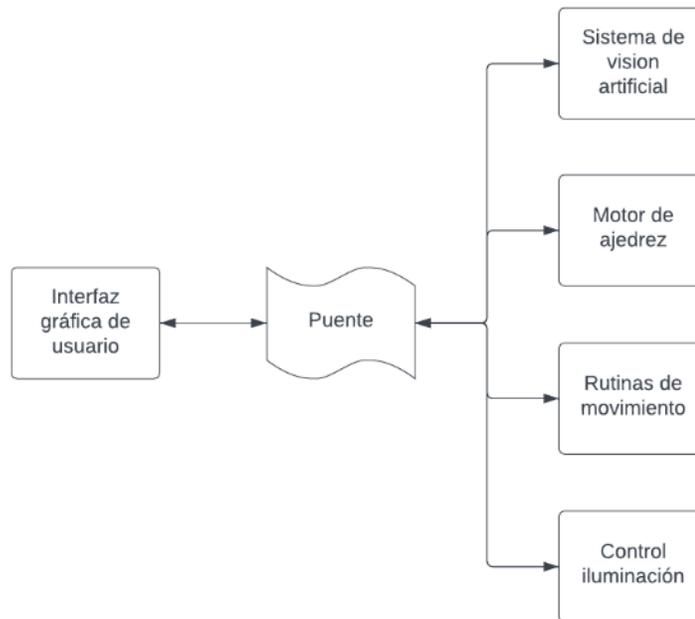
Sistema de control

El sistema completo está controlado mediante scripts de Python que se pueden clasificar en 6 programas diferentes. El programa principal es el que inicializa la interfaz gráfica de usuario, además de esto inicializa al segundo programa llamado "Puente" que se encarga de administrar la comunicación entre la interfaz gráfica y el resto de los programas. Una vez se inicializa la interfaz gráfica, el programa

“Puentes” ejecuta la calibración de la posición inicial del brazo robótico, llevándolo a su posición de origen y reiniciando las variables articulares. Durante el juego, el programa solicita al sistema de visión artificial que identifique los cambios en el tablero, es decir, que identifique la jugada realizada, el sistema de visión artificial se ejecuta y le retorna en movimiento realizado, entonces este algoritmo entonces solicita al motor de ajedrez que revise si la jugada detectada es válida, en caso de serlo también le solicita una jugada de respuesta, esta jugada de respuesta se envía a las rutinas de movimiento, las cuales se encargan de realizar el movimiento. A continuación, se detalla cada programa:

Figura 48

Comunicación entre los distintos programas que conforman el sistema de control.



Programación de visión artificial

El diseño de este algoritmo debe tomar en cuenta la capacidad de comunicación con otras funcionalidades, la detección de movimientos deberá comunicarse de forma continua con la interacción del usuario con la pantalla, la respuesta del motor de ajedrez, el movimiento del brazo robótico y activación de luces decorativas de acuerdo con las acciones realizadas.

Por tanto, es relevante crear un conjunto de códigos que puedan intercambiar información de

forma efectiva entre ellos y, además, sea posible acceder a cada uno por separado. Reduciendo así la redundancia de acciones y facilitando la adición de rutinas en cada uno de ellos.

La primera rutina que describir es “*ReconocerTablero*” (Figura 49), esta consta de pasos para la inicialización de todo el tablero, cuando se va a realizar el primero juego o la primera lección de enseñanza este método es llamado. Consiste en un procedimiento que toma en cuenta el proceso de visión artificial secuencial, incluyendo preprocesamiento, segmentación, extracción de características, reconocimiento e interpretación.

Preprocesamiento

Este paso contiene la captura de la imagen a través de la cámara, continúa con el escalado de esta para una reducción a un tamaño suficiente para la detección. La conversión de color se lleva a cabo, llevándola a una escala de grises, además de ello, se aplica un filtro gaussiano con un bajo porcentaje de desenfoque para reducir el ruido existente.

Segmentación

Comienza con el etiquetado de las regiones en la imagen, tomando en cuenta un umbral para categorizar aquellos píxeles que están por encima y otros que se encuentran debajo de él. Se utilizó un límite adaptable, que toma una ponderación ligeramente variable de acuerdo con una región cercana especificada cuando analiza cada uno de los píxeles. Seguido a esto, se genera una matriz con los elementos analizados en blanco y negro diferenciando los que pasaron el umbral y aquellos que no.

Extracción de características

La extracción se realiza a través del conjunto de valores creados anteriormente, estos son analizados de forma que se encuentren contornos, generando polígonos con un conjunto de puntos. Los polígonos son evaluados de acuerdo con su área y perímetro, encontrando la región más grande y con

ellos creando una “máscara” que abarca la región de interés que se desea evaluar, esta región en este caso será el tablero de ajedrez.

Posteriormente, se obtienen los bordes en la región, esto con el algoritmo de Canny, que consta en la medición de la variación encontrada entre píxeles, así, un valor alto entre ellos da origen a un borde encontrado. Con los bordes hallados dentro de la región de interés el siguiente paso es encontrar líneas con la transformada de Hough, que explora la imagen buscando aquellos contornos que cumplan con un umbral de tamaño y curvatura para así obtener sus coordenadas.

Estas coordenadas son usadas para encontrar intersecciones, para este proyecto, las intersecciones dentro de la región de visión dan como resultado una esquina de las casillas, por tanto, posteriormente, se reconocen todas las intersecciones para almacenar las coordenadas de tal manera que se usen como esquinas.

Cada una de estas, son ordenadas para proveer de resultados fiables, así, es posible recorrer todo el arreglo de valores de forma estructurada. El resultado de esto es una matriz de magnitudes posicionales dispuestas en el espacio bidimensional que permiten crear casillas que se encuentran una junto a otra.

Reconocimiento e interpretación

El reconocimiento es realizado mediante la interpretación de la imagen de cada una de estas casillas, que poseen características de posición, color y bordes de la región. Las casillas componen un objeto llamado “Tablero”, conteniendo toda la información de 64 casillas, con un proceso determinado para la detección (Figura 50).

El objeto “Tablero”, inicializa una matriz de piezas en formato de ajedrez, que son suministradas al estado actual de cada una de las casillas, así, cada peón, rey, reina, entre otros, se encuentran en su posición inicial. Al realizar un movimiento en un juego en tiempo real o una lección, se toma una nueva

imagen, esta se divide en secciones para cada una de las casillas y se guarda como un nuevo estado, teniendo así una comparativa con la anterior imagen. Esta comparativa es realizada mediante una iteración por cada una de las casillas, midiendo la variación de color existente, si esta pasa de un umbral determinado, se almacena como un cambio de estado. Finalmente, se comprueba cuantas casillas tuvieron variación alta, determinando si fue un movimiento de enroque o un movimiento normal de una pieza, para así comunicarse con el motor de ajedrez enviando el movimiento en su nomenclatura correspondiente.

Figura 49

Algoritmo de reconocimiento inicial del tablero de ajedrez.

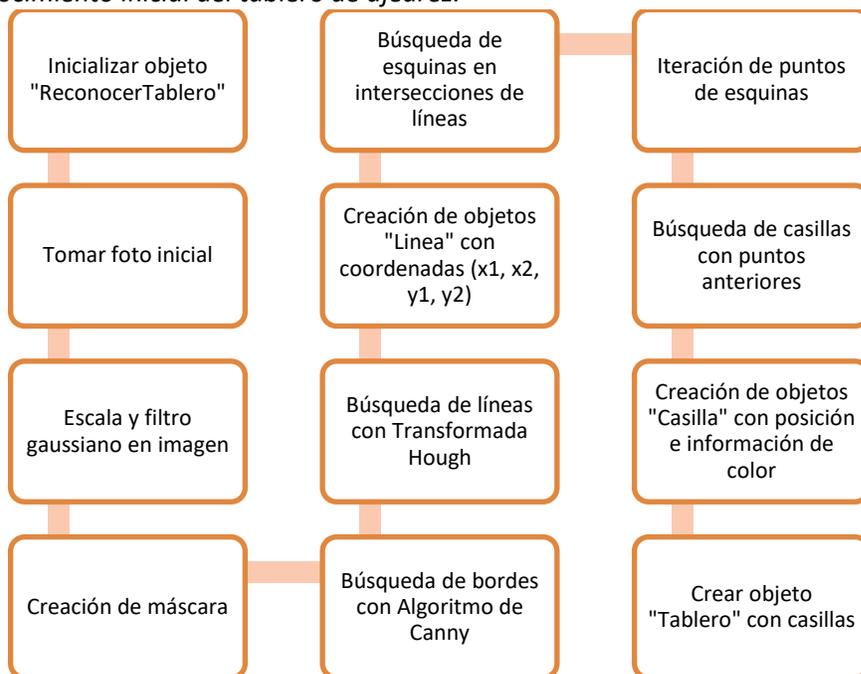
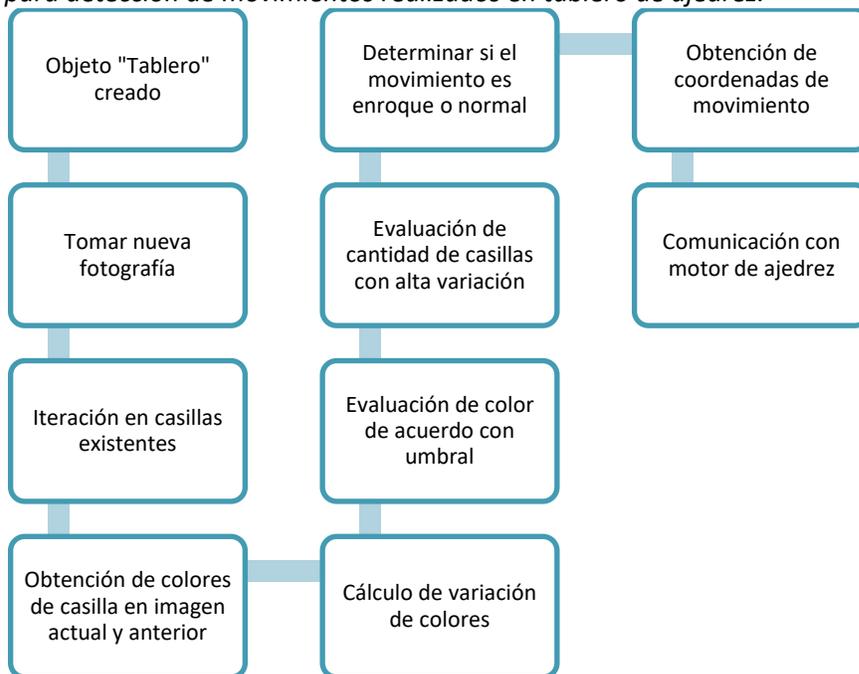


Figura 50

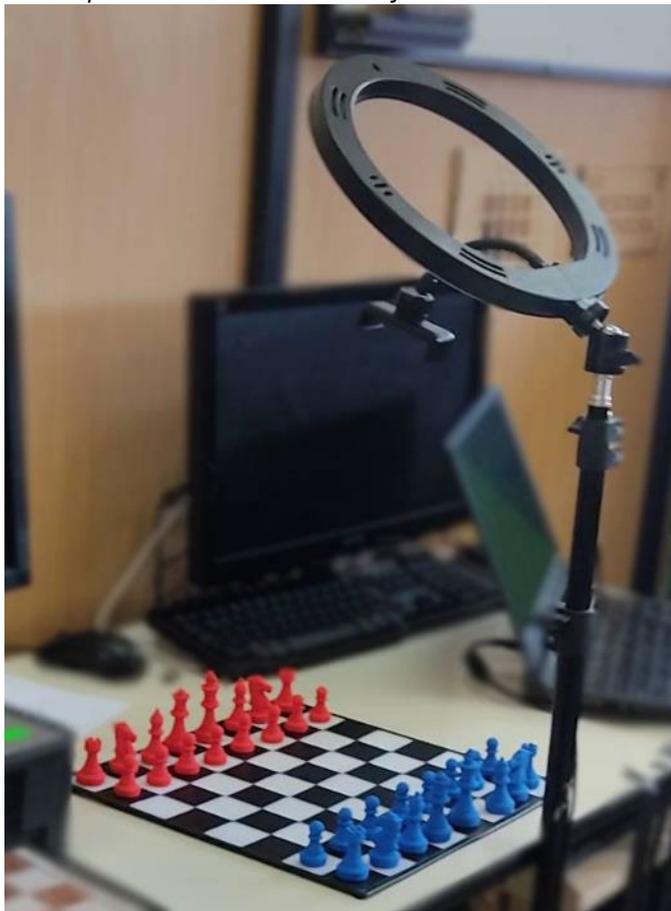
Secuencia de pasos para detección de movimientos realizados en tablero de ajedrez.



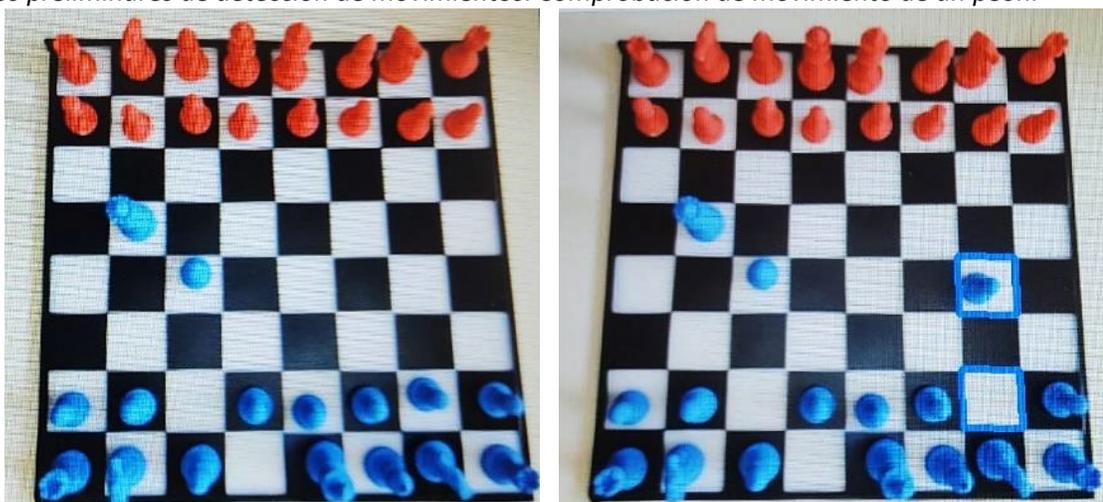
La creación de todo el algoritmo descrito anteriormente tuvo pruebas preliminares realizadas en conjunto a la programación, tomando datos para evaluar la validez del procedimiento en fase de construcción. Las pruebas se realizaron mediante un tablero provisional, usando una cámara genérica en conexión con el computador, la iluminación fue simulada con un aro de luz led (Figura 51). Los resultados del algoritmo fueron evaluados de forma visual (Figura 52), revisando que la detección de las casillas sea correcta y minimizando los errores al detectar el movimiento de una pieza, los valores de umbrales sufrieron varias modificaciones hasta llegar a un resultado satisfactorio.

Figura 51

Elementos utilizados para pruebas preliminares de visión artificial.

**Figura 52**

Resultados preliminares de detección de movimientos. Comprobación de movimiento de un peón.



Para estas evaluaciones preliminares después de la optimización de parámetros se tomaron 50 muestras, cambiando la posición de una de las piezas dentro del tablero de ajedrez y posteriormente capturando una imagen, el orden fue generado de forma aleatoria. Los datos obtenidos generan un 99% de precisión con una detección correcta de la posición previa y actual con un ambiente de laboratorio óptimo.

Integración de motor de ajedrez

Para este proyecto fue seleccionado el motor de ajedrez Stockfish, este solamente cumple la función responder con un movimiento de ajedrez a un tablero que se envía con anterioridad. Las facultades son solamente de respuesta a una acción previa dentro del juego enviado con las posiciones actuales de las piezas. La comunicación con el mismo es realizada mediante el protocolo UCI, con él es posible seleccionar la dificultad a la cual trabaja el motor, el color de ficha que debe mover y comprobar la validez de los movimientos, así como situaciones de jaque, empate, captura de piezas y jaque mate.

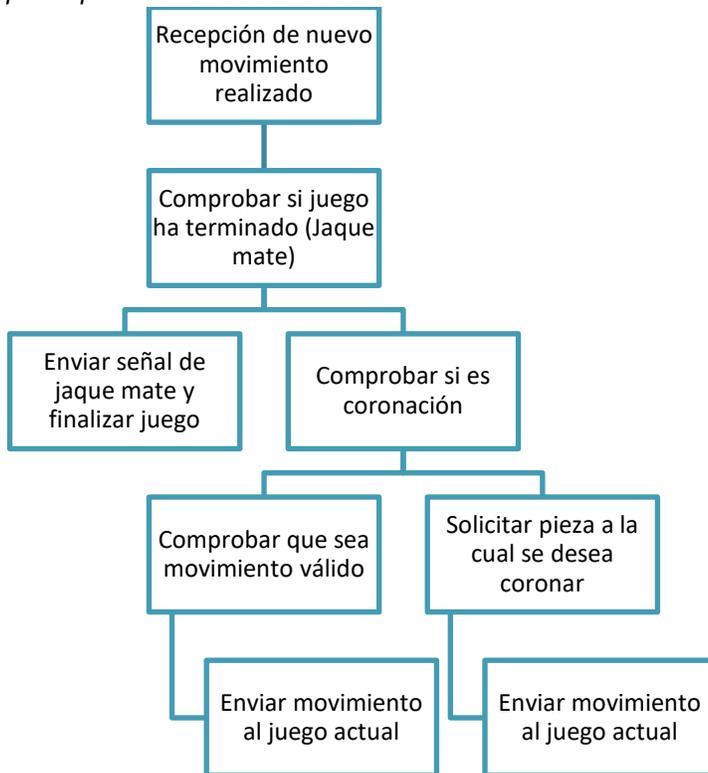
El motor de ajedrez mantiene una comunicación continua con el proceso de detección de movimientos. Como se mencionó anteriormente, se obtiene la siguiente acción con nomenclatura de ajedrez, por ejemplo, al mover un peón la expresión es “e2e4”. Este resultado es enviado al algoritmo creado para la comunicación con el motor de ajedrez Stockfish, siendo una inteligencia artificial entrenada para proveer de respuestas coherentes en un juego de ajedrez.

El movimiento en primera instancia es evaluado, de tal manera que se compruebe si el juego ha terminado (Jaque mate), si el juego continúa se corrobora si se detectó coronación, al confirmarse se solicita al usuario la pieza a la cual desea coronar, esto a través de comunicación con la pantalla, con lo cual puede continuar el juego. Si el valor es falso, entonces se comprueba que sea un movimiento válido en el juego actual de ajedrez y posteriormente se actualiza el tablero con la acción realizada. El proceso

se puede visualizar en la Figura 53.

Figura 53

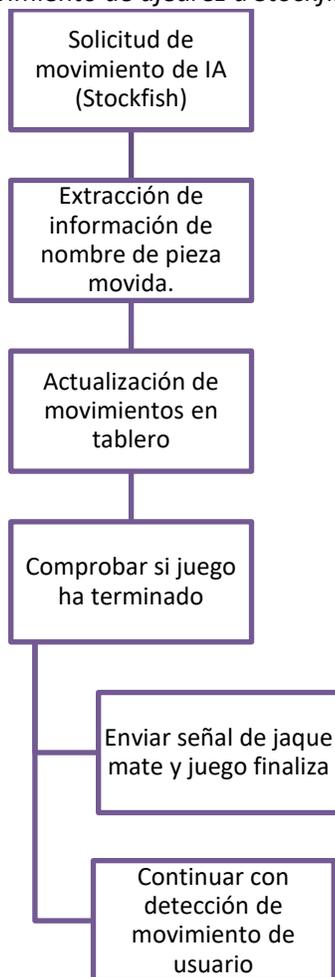
Secuencia de pasos para comunicación de movimientos del usuario hacia motor de ajedrez.



Realizado esto, es el turno de la máquina, aquí se envía una petición de actividad a Stockfish, de tal manera que compruebe el estado actual del tablero y entregue su respuesta coherente con el nivel de dificultad seleccionado previamente. Aquí se comprueba si el juego ha terminado, si es falso, prosigue la comunicación con la secuencia de pasos para el brazo robótico y comienza de nuevo, la detección de movimientos del usuario. El procedimiento se visualiza en la Figura 54.

Figura 54

Algoritmo para solicitud de movimiento de ajedrez a Stockfish.



Rutinas de movimiento y control de posición

Las rutinas de movimiento comienzan cuando se recibe el movimiento en notación de ajedrez desde el programa puente el cual la recibió del motor de ajedrez, esta notación consta de 4 caracteres, los dos primeros caracteres indican la casilla desde donde parte el movimiento y los dos caracteres finales indican la casilla de destino del movimiento. Esta cadena de 4 caracteres se divide y se

transforma a coordenadas cartesianas como se muestra en la Tabla 23, dichas coordenadas corresponden al centro de cada casilla medido desde el sistema de referencia del eslabón 1.

Utilizando las ecuaciones de la cinemática inversa, se transforman las coordenadas cartesianas a variables articulares. Estas variables se asignan a dos funciones, las variables de la posición de origen se asignan a la función de *“recoger”* y las variables de la posición de destino a la función de *“mover”*.

Cuando se ejecuta la función de *“recoger”*, se realiza un cálculo para el control de velocidad, utilizando las variables de posición actual y posición de destino, se crea una curva que limita la velocidad de cada motor en cada punto del desplazamiento. Este control de velocidades se realiza con el objetivo de producir un movimiento suave sin cambios bruscos de velocidad, a la vez que se reduce el ruido producido por los motores y se brinda seguridad adicional para el usuario ya que al inicio de cada movimiento el robot se mueve lo suficientemente lento como para que el usuario advierta el movimiento y no obstaculice el desplazamiento del robot. Con este control de velocidades, el brazo se mueve al lugar de origen de la jugada, baja lo necesario dependiendo de la pieza de ajedrez que va a levantar y cierra el efector final.

Una vez termina de cerrar el efector final, levanta la pieza y se ejecuta la tarea de mover la pieza, una vez más se realiza un cálculo para el control de velocidades, y con este se mueve hasta la casilla de destino, el robot baja la pieza y abre el efector final para soltarla en su lugar. Para finalizar, el robot sube, calcula las velocidades correspondientes para volver a la posición de reposo y se mueve a ella, hecho esto se da por terminada la rutina y el juego continúa.

Cabe resaltar, que el sistema comprueba el estado de los fines de carrera de los tres motores, en cada paso que dan, este procedimiento se realiza por seguridad, en ningún caso debería activarse ningún fin de carrera durante el juego normal, estos se utilizan únicamente al inicializar el robot para comprobar las posiciones iniciales de referencia, sin embargo, si se llegan a activar durante el juego,

significa que hubo una obstrucción en el movimiento natural del robot, ya sea debido a que el usuario interrumpió el desplazamiento del robot en algún momento, o que lo movió de su posición de reposo durante el turno de la persona. En este caso el robot reinicia sus variables de posición y retoma la referencia del origen para continuar con el juego normal. Este proceso puede visualizarse en la Figura 55.

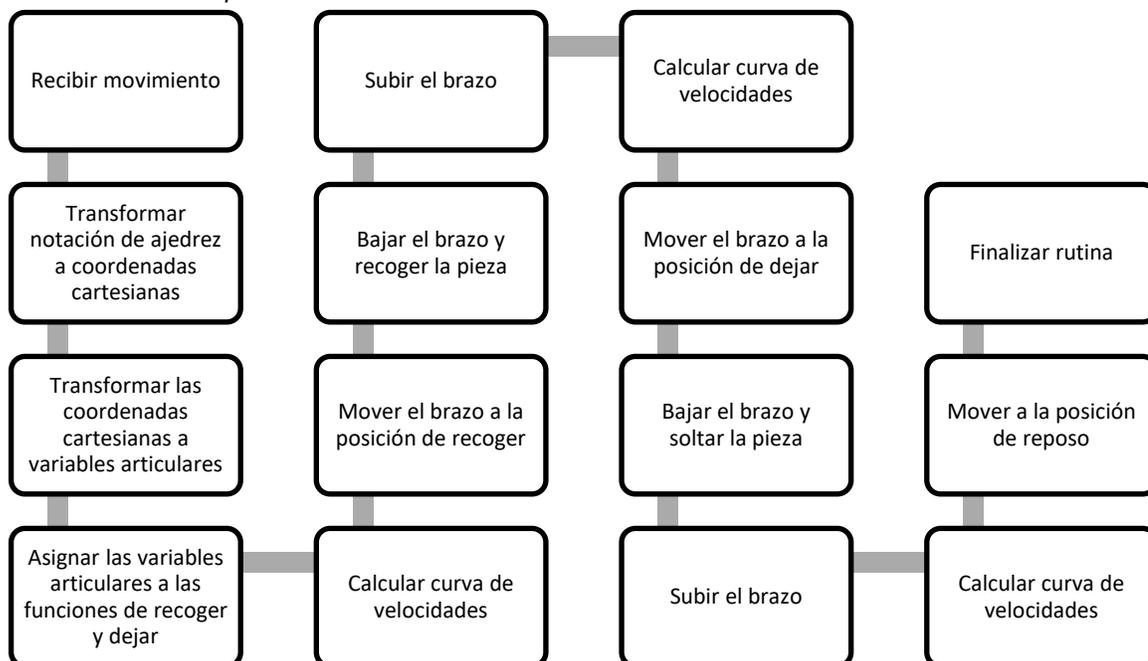
Tabla 23

Correspondencia entre coordenada en notación de ajedrez y coordenadas cartesianas

Notación ajedrez (Número)	Posición eje X (mm)	Notación ajedrez (Letra)	Posición eje Y (mm)
1	101,5	A	122,5
2	136,5	B	87,5
3	171,5	C	52,5
4	206,5	D	17,5
5	241,5	E	-17,5
6	276,5	F	-52,5
7	311,5	G	-87,5
8	346,5	H	-122,5

Figura 55

Proceso de movimiento de piezas con brazo robótico.



Para realizar el control de velocidades se tiene en cuenta los parámetros constructivos del brazo robótico y los eslabones además de la configuración del controlador A4988 estos detalles se sintetizan en la Tabla 24. Es importante conocer cómo se controla un motor a pasos, estos funcionan mediante señales digitales o de onda cuadrada, cada vez que se envía un pulso de este tipo al pin de *STEP*, el motor se mueve un paso en la dirección configurada mediante el pin *DIR*. Los motores NEMA 17 utilizados para el movimiento de los 3 eslabones del robot tienen físicamente 200 pasos por cada vuelta, lo que realizando una división nos da una resolución de 1.8° por cada paso, sin embargo, el controlador A4988 permite forzar pasos más pequeños denominados micro pasos, esto se consigue activando los pines correspondientes del controlador mediante puentes a 5 [V]. Se debe aclarar que cuando se usa una configuración de micro pasos, el motor pierde un porcentaje de torque, mientras más pequeño sea el micro paso, más débil será el torque del motor. Para este proyecto se decidió usar la configuración de $1/8$ de paso, esto quiere decir que los pasos físicos del motor se dividen en 8 micro pasos lo que da como resultado una resolución de 0.225° por cada paso en el eje del motor, esto junto con la relación de transmisión del mecanismo de cada eslabón, dan como resultado las resoluciones mostradas en la Tabla 24. Se usa esta configuración de micro pasos puesto que brinda mucha resolución con una baja pérdida de torque.

En cuanto a la programación del control de los motores a pasos, se define un tiempo de retraso el cual es el ancho de cada pulso en alto de la onda cuadrada y también el ancho de la zona en nivel bajo. Mientras menor sea este retraso, mayor será la velocidad del motor. Existen limitaciones en el rango de este tiempo, si el retraso es muy grande, el motor vibrará en exceso y causará mucho ruido, se determinó que el retraso máximo es de 0.00075 segundos con la configuración de $1/8$ de paso que corresponden a una velocidad aproximada de 666 pasos por segundo. A su vez un retraso muy pequeño causará velocidades demasiado altas en el eslabón, por lo que se limitó la velocidad a 8000 pasos por

segundo que corresponde a un retraso de 0.0000625 segundos. Conociendo el funcionamiento de los motores a pasos, se propone un control de velocidades representado en el diagrama de la Figura 56, en donde se muestra una variación de la velocidad dividida en 5 etapas. En la etapa 1 que corresponde a la curva C1 e inicia en el punto P1 el movimiento se mantiene con un retraso máximo, lo que significa la velocidad al mínimo, se mantiene en esta velocidad por 66 pasos hasta llegar al punto P2 en donde varía el retraso siguiendo la curva C2, lo que aumenta la velocidad hasta llegar a la velocidad máxima en el punto P3 que está a 733 pasos del punto anterior, desde este punto P3 se mantiene constante en la velocidad máxima por el número de pasos que determine el recorrido solicitado hasta llegar al punto P4, desde este punto se desacelera el movimiento siguiendo la curva C4 durante 733 pasos hasta llegar al punto P5, desde aquí se mantiene la velocidad mínima por 66 pasos hasta llegar al punto P6 que es el destino del movimiento. Las áreas bajo las curvas representan la cantidad de tiempo total que se toma en cada etapa.

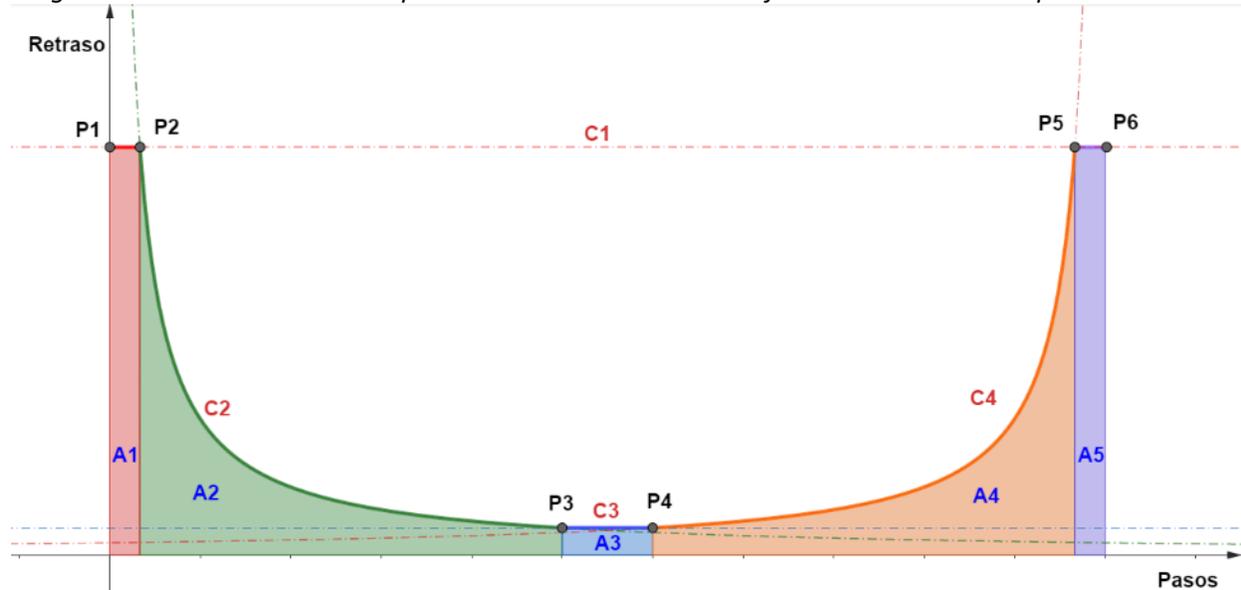
Tabla 24

Características cinemáticas de los eslabones y sus actuadores.

Eslabón	Actuador	Tipo de junta	Unidad de medición	Relación de transmisión	Resolución	Velocidad mínima	Velocidad máxima
1	Nema 17 (Q1)	Rotacional	Grados (°)	1:9	0,025°	16°/s	76°/s
2	Nema 17 (Q2)	Prismática	metros	1:1	0,025mm	17mm/s	37,5mm/s
3	Nema 17 (Q3)	Rotacional	Grados (°)	1:3	0,075°	16°/s	38°/s

Figura 56

Diagrama del retraso entre cada paso de un motor Nema 17 en función del número de pasos



Construcción del prototipo

Impresión 3D

Para el prototipo diseñado se determinó la impresión 3D como un proceso de manufactura para los diversos componentes en su estructura. Con el material seleccionado anteriormente (PLA+), se consideran parámetros óptimos de impresión, estos manejan diversas condiciones dentro del proceso como adhesión entre capas, acabado superficial, robustez de la pieza, precisión de tamaño, entre otros. Es importante una selección correcta de ellos, ciertas características son posibles de mejorar en conjunto, mientras que otras empeoran en contraste a aquellas que se optimizaron.

En la Tabla 25, se muestran los parámetros de impresión utilizados, se utilizaron dos máquinas en conjunto para aminorar la carga de tiempo total de manufactura. Las impresoras utilizadas fueron Anycubic Mega Zero 2 y Artillery Genius Pro, ambas con un tamaño de cama de impresión de 220 por 220 [mm], cada una de ellas fue optimizada previamente para maximizar resistencia, acabado superficial y disminuir error dimensional.

Tabla 25*Parámetros de impresión utilizados.*

Parámetro	Anycubic Mega Zero 2	Artillery Genius Pro
Altura de capa [mm]	0,2	0,2
Ancho de línea [mm]	0,45	0,44
Grosor de pared [mm]	1,2	1,32
Capas superiores	6	5
Capas inferiores	4	5
Porcentaje de superposición en líneas [%]	5	5
Patrón de relleno	Cúbico	Cúbico
Porcentaje de superposición en relleno [%]	10	30
Temperatura de impresión [°C]	205	200
Temperatura de cama [°C]	50	60
Porcentaje de flujo [%]	92	90
Velocidad de impresión [mm/s]	60	60
Velocidad de impresión en capas superiores/inferiores [mm/s]	30	30
Distancia de retracción [mm]	1,2	1
Velocidad de retracción [mm/s]	40	25

Las piezas iniciales por imprimir fueron aquellas del brazo robótico para comenzar con pruebas de cinemática y optimizar parámetros de movimiento. Iniciando con las partes de la base (Figura 57 y Figura 58) y a continuación con los eslabones de la estructura articulada en el SCARA.

Se evidencia un buen acabado superficial y adhesión correcta entre capas, el material utilizado facilita los resultados ya que una de sus características clave es la facilidad de impresión.

Figura 57

Pieza base de sujeción para todo el brazo robótico.

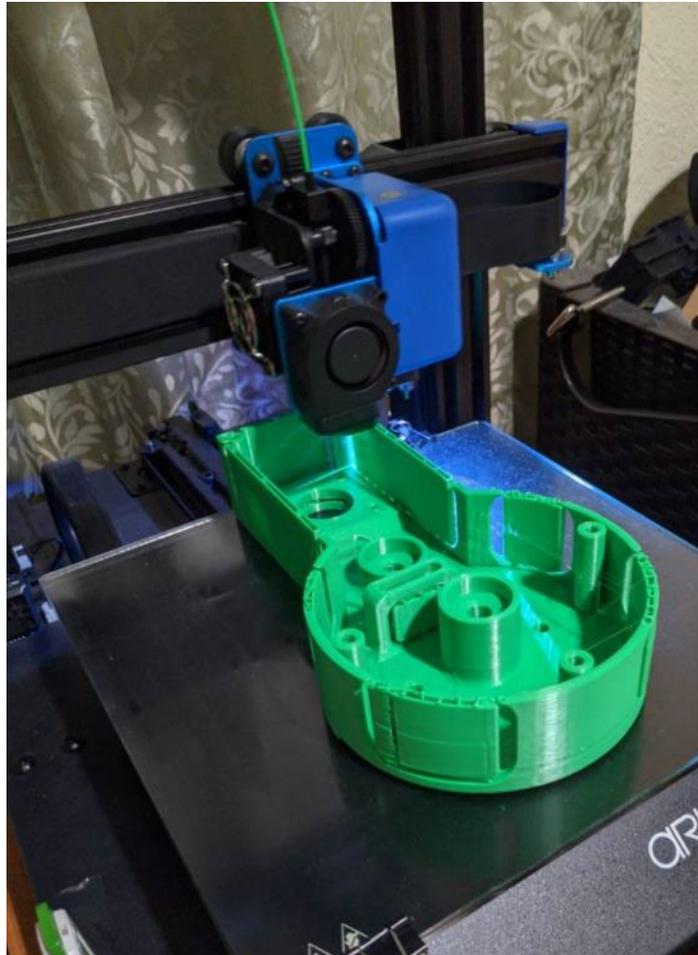
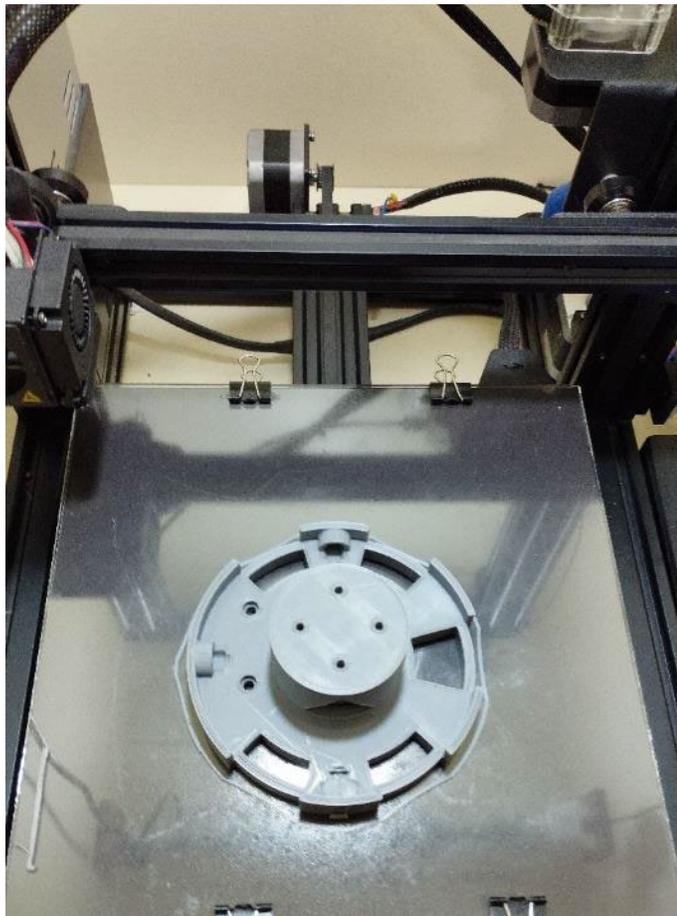


Figura 58

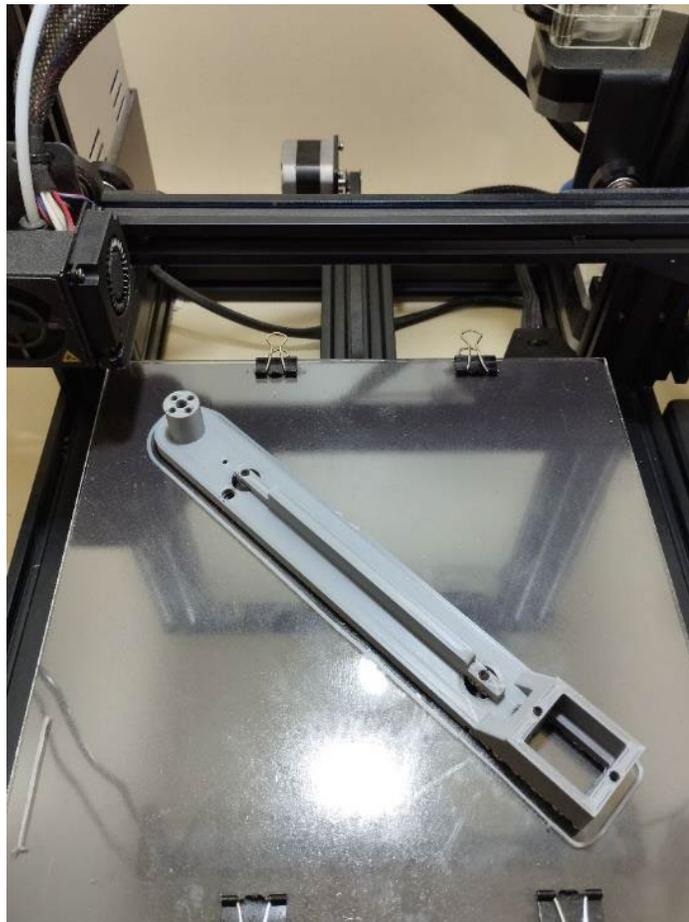
Acople para rodamiento de base.



Para el eslabón final (Figura 59) cabe recalcar una alta consideración en optimizar la estructura para proveer una correcta sujeción hacia los diversos actuadores y estructura total del brazo, todo esto con un grosor y peso mínimos, siendo una pieza con alta cantidad de agujeros para un acople preciso en el ensamblaje.

Figura 59

Eslabón final de brazo robótico.



Con esto fue posible realizar evaluaciones previas, de manera que los eslabones mantengan un movimiento fluido garantizando el menor rozamiento entre piezas y a la vez sujetando correctamente los componentes para aminorar el juego existente. Se realizaron las correcciones pertinentes en el modelo que solamente presentó problemas en la holgura de los agujeros en rodamientos axiales y radiales.

Posteriormente, se efectúa la impresión de partes externas del prototipo, perteneciendo a la estructura de soporte inferior de todo el modelo, al igual que la carcasa externa que contiene a los elementos electrónicos (Figura 60), soporte de la pantalla y carcasa externa de la pantalla, además de

los elementos de soporte inferior (Figura 61). Es necesario destacar que existen varias piezas que fueron divididas en dos partes para así producir una impresión más cómoda con el espacio de trabajo que se posee en las impresoras 3D.

Figura 60

Pieza que forma parte de la carcasa externa del prototipo.

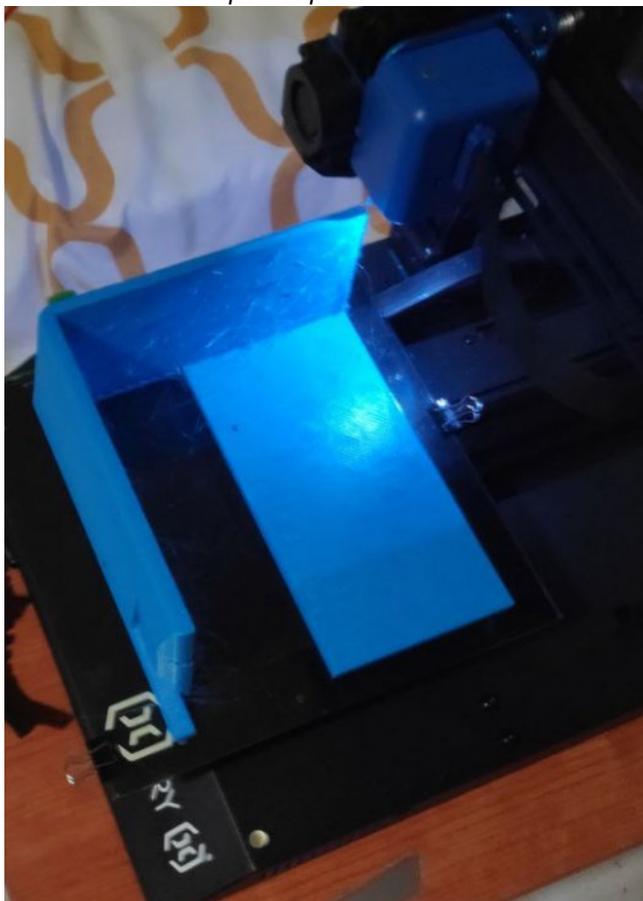


Figura 61

Elemento de soporte inferior.



Finalmente, la cubierta de cada uno de los eslabones fue impresa, esto para asegurar una estética agradable y eliminar la visibilidad de los cables de tal manera que la seguridad del infante no se vea vulnerada.

Cada una de estas partes externas debe cumplir con un post procesado, eliminando cualquier tipo de error visual superficial e incluyendo colores vívidos para el niño que use el prototipo.

Post procesado

El post procesado consta de varias etapas que deben realizarse para lograr los resultados

deseados, estos son, eliminación de irregularidad superficial, adición de masilla o resina, lijado y pintado. Siguiendo un proceso correcto la calidad visual mejora notablemente y es posible personalizar las piezas de acuerdo con las necesidades del usuario.

Como primer punto se lija cada una de las piezas para minimizar las variaciones irregulares en la superficie o mejorarla cuando se colocan soportes en la geometría de la pieza impresa, lo cual se realiza para sostener regiones que se encontrarían en voladizo. Esta etapa al mismo tiempo permite una mejor adhesión del material que se agregará posteriormente. Este proceso debe realizarse sin herramientas externas que se mueven a altas velocidades debido a que el plástico se deforma a causa de las altas temperaturas generadas por la fricción.

Para el siguiente paso, se utiliza resina epoxi, la cual es una sustancia viscosa que consta de dos compuestos, al mezclarse producen solidificación dentro de un período de tiempo en contacto con el aire. Se elige la resina debido a una mayor facilidad de dispersión a través de grandes superficies en comparación con la masilla plástica. Se puede observar en la Figura 62, varias piezas con este tratamiento. Estas deben secarse por varias horas de acuerdo con la cantidad de resina y el tamaño de la pieza.

Figura 62

Piezas con resina epoxi en proceso de secado.



El paso siguiente es el lijado. A pesar de que la resina epoxi mejoró notablemente la calidad superficial, aún existen irregularidades y secciones con picos o valles que producen rugosidad. Así, para eliminar todas estas se realiza un lijado con hojas más finas, se utilizaron con grano 600 y 1000. Para este paso tampoco fueron utilizadas herramientas que giren a altas velocidades por el daño que pueden producir las altas temperaturas generadas por fricción.

En la Figura 63 se observan componentes del prototipo ya lijados, en este proceso ciertas partes tuvieron un tratamiento adicional con masilla plástica, primordialmente en las secciones que se imprimieron en voladizo, con ello fue posible generar superficies completamente lisas.

Figura 63

Piezas con resina epoxi en proceso de lijado.



Finalmente, ya consolidados los anteriores procesos, con todo el material completamente seco y limpio, se procede a la pintura. El pintado se realiza en dos pasos, el primer paso consta de colocar imprimante, que aumenta la capacidad de adhesión de la pintura a la pieza plástica, este imprimante es de color gris y posee un espesor alto. Como segundo paso, la pintura es colocada de acuerdo con el color necesario para el usuario.

En el presente prototipo se utilizaron colores con alto brillo para atraer la atención de los infantes, además de un color blanco como base para la estructura (Figura 64).

Figura 64
Componentes pintados en proceso de secado.



Ensamble del prototipo

Para este paso, las piezas ya poseen un acabado superficial óptimo y con los colores deseados. Se realizó el ensamble en varias partes, inicialmente armando la estructura de soporte para todo el prototipo y también contenedor de los circuitos eléctricos. En la Figura 65 se observa el conjunto inicial, con las paredes blancas como cubierta. Los elementos de sujeción inferiores de color naranja también fueron agregados y a su vez la pieza de MDF trasera que sostendrá el brazo robótico. Finalmente, un tablero preliminar que posteriormente será modificado está colocado como tapa de la estructura rectangular.

Figura 65

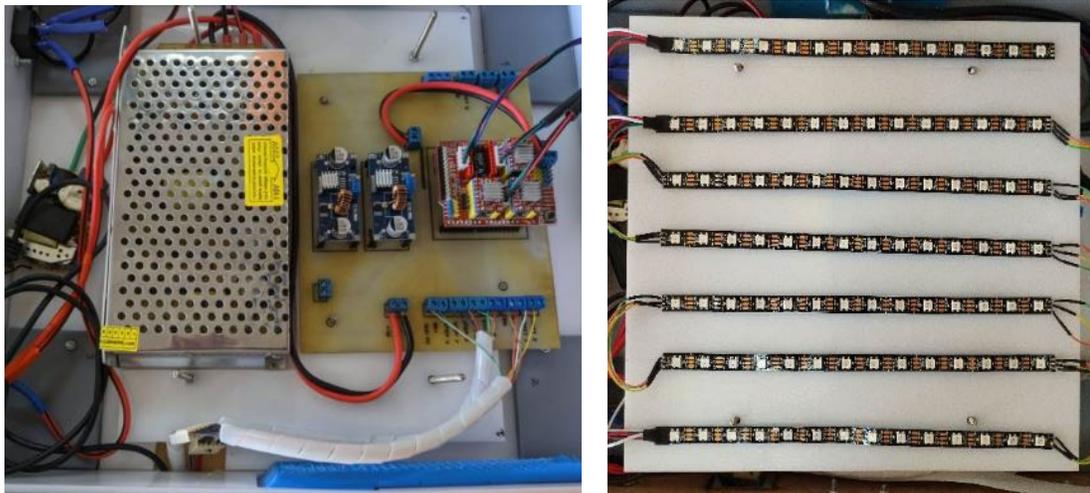
Ensamble inicial de piezas.



El siguiente paso fue colocar todo el cableado interno del proyecto (Figura 66), incluyendo la fuente de alimentación, convertidores de voltaje para una salida de 5 [V], controladores de los motores con entradas digitales, además de las conexiones de señales salientes desde la tarjeta controladora Raspberry Pi, la cual se colocará en la parte frontal (región inferior en Figura 66) del prototipo. Las luces decorativas fueron colocadas en el espacio correspondiente, se organizó verticalmente para un manejo más asequible, de forma que se aproveche el espacio. Además, la distribución de cables para las señales de los motores paso a paso, el servomotor y los fines de carrera será instalada posteriormente al posicionar el brazo robótico en su lugar y con sus componentes.

Figura 66

Instalación de cableado interno en prototipo.

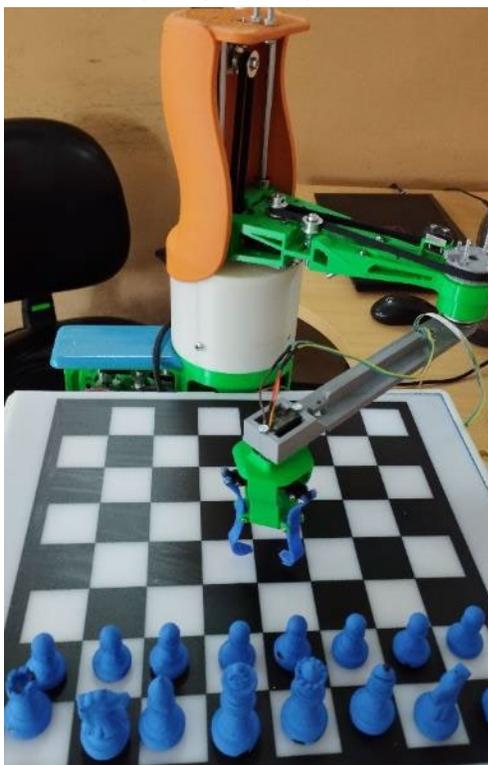


El ensamble del brazo robótico es el siguiente paso, inicialmente fijando su base a la estructura de soporte, para luego colocar todos los componentes internos como motores y fines de carrera, de forma que sea posible la transferencia de movimiento. Este componente al igual que el segundo y tercer eslabón poseen estructuras internas que sirven de sujeción, resistiendo todos los esfuerzos mecánicos, y piezas de recubrimiento, ocultando componentes electrónicos.

La Figura 67 muestra el brazo robótico armado y sujetado, con el cual se realizan pruebas de funcionamiento preliminares, comprobando movimiento fluido, que no exista obstrucción o daño en los cables por el movimiento y sujeción correcta de las piezas por parte del manipulador.

Figura 67

Ensamble de piezas internas del brazo robótico para pruebas preliminares.



A continuación, se colocan todas las carcasas de los eslabones (Figura 68), también se ensamblan las partes que conforma el soporte de la pantalla y que contiene la tarjeta de control Raspberry Pi, con lo cual es posible conectar los componentes evaluando un desempeño correcto y visualización continua en la pantalla de 7 pulgadas. A su vez se realizaron pruebas de movimiento para garantizar un correcto acople sin restricciones. Las piezas de los eslabones finales presentaban problemas por una alta cantidad de fricción en la articulación, de tal manera que se efectuaron cambios en su estructura.

Figura 68

Ensamble de carcasas de eslabones y piezas de soporte de pantalla.



Finalmente, se colocan todas las piezas restantes. Ubicando las carcasas con modificaciones en los eslabones finales, con un movimiento correcto. La cámara y su iluminación fueron situadas en la parte superior del prototipo a una altura suficiente con respecto al tablero de ajedrez, esto con ayuda de un tubo de soporte, de tal manera que la visión artificial se efectúe correctamente.

La pantalla se instaló en la parte frontal del proyecto, agregando decoración para aumentar la estimulación visual del infante. Las piezas de ajedrez finalmente son colocadas con sus colores correspondientes.

Elementos decorativos adicionales fueron dispuestos en los eslabones, laterales del tablero de ajedrez y parte frontal del prototipo. Se observa el ensamble final en la siguiente figura:

Figura 69

Ensamble final con piezas estructurales, componentes electrónicos y elementos decorativos.



Interfaz gráfica humano-máquina

El principal objetivo de diseño de la interfaz gráfica es proporcionar al usuario una experiencia intuitiva, eficiente y agradable al interactuar con la herramienta. Se busca facilitar la comprensión y el uso de las funciones, reducir los errores y generar satisfacción en el usuario.

En la elección de componentes se detalla que el dispositivo tendrá como tarjeta de control una Raspberry Pi 4, y como lenguaje de programación se usa Python, por lo tanto, para mantener la coherencia en la programación se decide usar *PyQt5* que es una biblioteca de enlace de Python para Qt. Qt es un conjunto de herramientas y bibliotecas para el desarrollo de software con capacidad de crear interfaces gráficas de alta calidad. Otra consideración de diseño se debe a la elección de la pantalla, que es táctil, de 7 pulgadas de diagonal y con una resolución de 1024 por 600 píxeles. El propósito específico

de la interfaz gráfica es interactuar con los modos de juego del prototipo.

Entre los objetivos buscados con esta interfaz se encuentran, mejorar la usabilidad, facilitar la comprensión de las lecciones, reducir errores en la interacción y capacitar en el uso del prototipo.

Dado que el prototipo está orientado a niños y adolescentes, la interfaz gráfica también debe estarlo, por esta razón se ha optado por colores y fondos llamativos, simplicidad en la interacción y respuestas sonoras para mejorar la comprensión de las instrucciones. Todo esto tomando en cuenta las recomendaciones proporcionadas en el libro “Superar la dislexia para presentaciones de contenido y texto a población en general” (Rello Sanchez, 2018). Entre estas pautas se encuentran, el uso de fuentes cuyos caracteres carezcan de serifas, el espacio entre caracteres adecuado, colores, léxico, entre otras. Siguiendo estas recomendaciones se eligió para la tipografía la fuente Sans Serif, con tamaños de 36 para los títulos y 18 para otros textos. Los colores y el fondo elegidos, aunque llamativos también intentan ser simples y que generen atracción más no distracción en exceso.

La interfaz gráfica cuenta con 17 pantallas, todas las pantallas tienen el mismo fondo, y en general cada pantalla sigue la disposición mostrada en la Figura 70, en donde: a) Es un acceso a la pantalla de ajustes que se muestra en la Figura 71, en esta pantalla se puede configurar el nivel de volumen de las alertas sonoras (f), activar o desactivar el sonido (g), forzar una puesta a cero de los motores a pasos (h) y cerrar la ventana de configuración (i); b) en esta área se encontrará un botón para cancelar el juego actual, si se está en un juego, o apagar el equipo, si se está en la pantalla de inicio, cualquiera de estas acciones mostrará una ventana emergente de advertencia y confirmación como se muestra en la Figura 72; c) aquí se muestra la instrucción principal de la ventana, como elegir el modo de juego, la dificultad, el color o la lección a aprender; d) esta sección muestra los diálogos principales y los botones de acción, como aceptar, comprobar, mover, etc.; e), finalmente en esta área se encuentran los botones de interacción entre pantallas como ir a inicio o a la pantalla anterior.

Figura 70

Pantalla de selección de lección de movimiento, ilustrando la distribución de objetos y acciones que siguen como norma general todas las pantallas.

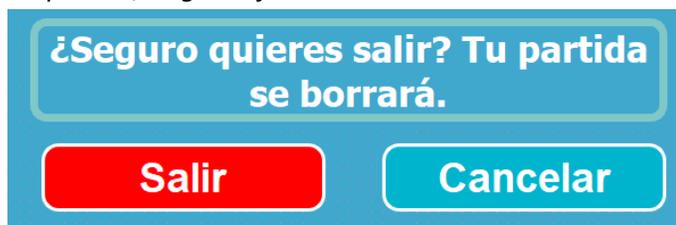
**Figura 71**

Pantalla de ajustes.



Figura 72

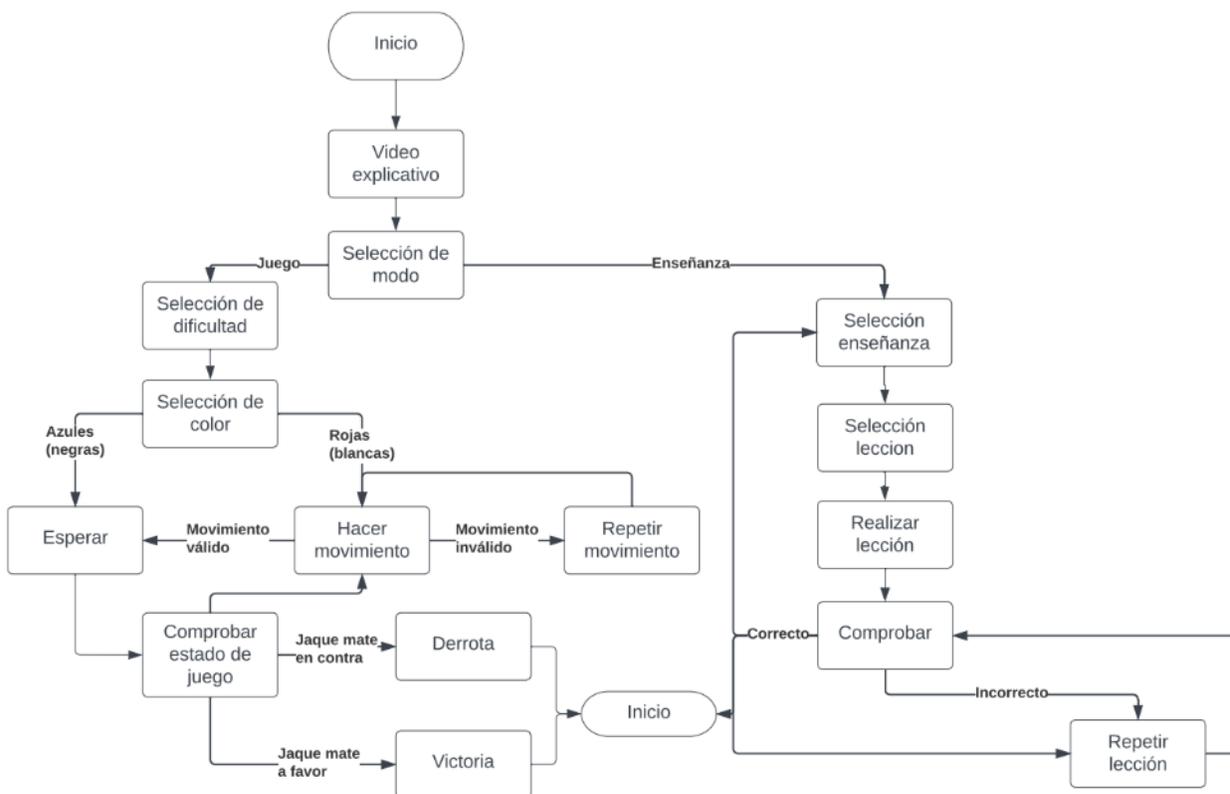
Pantalla emergente de salir de partida, exige confirmación.



La navegación entre pantallas está diseñada para ser intuitiva, al iniciar el prototipo se abrirá automáticamente la interfaz gráfica en la pantalla de inicio, a partir de esta pantalla se mostrarán instrucciones simples de las acciones que se pueden realizar, en todas las pantallas existen los botones de regresar a la pantalla anterior o de volver a inicio. La secuencia de pantallas y la posibilidad de interacción se muestran en el diagrama de la Figura 73. Esta interfaz está diseñada para ser usada únicamente en la pantalla elegida para este prototipo, los tamaños de los textos, botones y objetos en la misma están directamente relacionados con el tamaño de la pantalla y la resolución específica de esta. Se realizaron pruebas de funcionamiento simulando la interacción con la interfaz y se refinaron ciertos aspectos, los botones de acción se agrandaron con la finalidad de facilitar su pulsación, además, se incorporó un cambio de color en el botón pulsado para dar retroalimentación al usuario, así mismo, todos los botones una vez pulsados se desactivan momentáneamente para eliminar los errores causados por doble pulsación.

Figura 73

Diagrama de interacción entre pantallas.



Conexión y pruebas de funcionamiento preliminares

Una vez concluida la etapa de construcción del prototipo se implementa el sistema de control descrito anteriormente, integrando los componentes de reconocimiento mediante visión artificial, motor de ajedrez y las rutinas de movimiento del brazo robótico con la interfaz humano-máquina. Se evalúa el funcionamiento del sistema completo realizando partidas de prueba en modo juego usando todas las opciones de configuración. Se realizan 15 partidas completas sin fallos de reconocimiento ni fallos de movimiento.

Presupuesto final del proyecto

En la siguiente tabla se detalla el presupuesto necesario para la elaboración del proyecto, como primer punto el sistema electrónico, incluyendo las partes necesarias en la automatización, movimiento e interacción directa con el usuario.

Tabla 26

Presupuesto de sistema electrónico.

Elementos	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Financiación	Costo Final (\$)
Motor	35	3	Propia	105
Driver Motor	9	3	Propia	27
Cámara	20	1	Propia	20
Tarjeta de control	90	1	Propia	90
Pantalla 7 pulgadas	80	1	Propia	80
Cable y terminales de conexión	1	-	Propia	15
Interruptores	2	-	Propia	6
LEDs	0.5	-	Propia	35
Otros		-	Propia	5
TOTAL				348

A continuación, se establecen los costos para el sistema mecánico, se detalla el costo de eslabones del brazo robótico y manipulador de eslabón final en la estructura externa, las respectivas sujeciones de piezas y los acabados superficiales de estas.

Tabla 27

Presupuesto de sistema mecánico.

Elementos	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Financiación	Costo Final (\$)
Estructura externa	8	-	Propia	50
Ejes y sujeciones	6	8	Propia	48
Pintura y decoración	10	1	Propia	10
Otros	10	-	Propia	10
TOTAL				118

Finalmente, el presupuesto total del proyecto. Tomando en cuenta una descripción general de cada una de las partes o sistemas que conforman el prototipo.

Tabla 28

Presupuesto de proyecto.

Elementos	Descripción	Financiación	Costo Final (\$)
Licencias de software	-	Software Libre	0
Sistema Electrónico	Actuadores, pre actuadores, tarjeta de control, cámara, otros	Propia	348
Sistema Mecánico	Estructura externa, acoples, ejes, sujeciones, otros	Propia	118
Tablero de ajedrez	-	Propia	20
		TOTAL	486

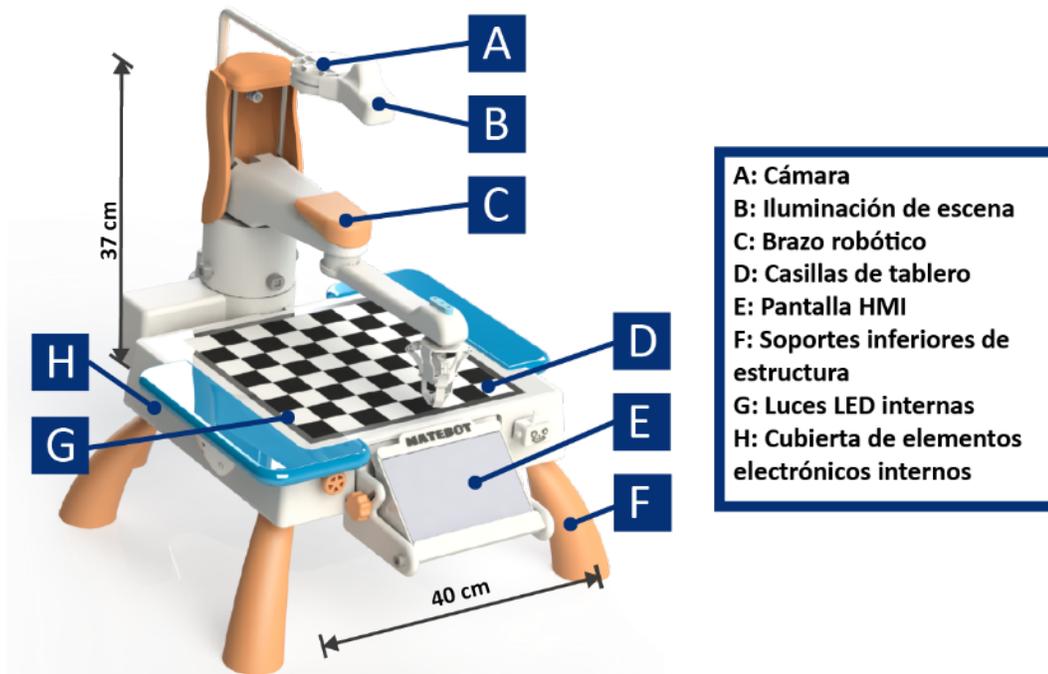
Descripción del proyecto final

Este proyecto consiste en el diseño y construcción de un prototipo de tablero de ajedrez que incluye interacción en tiempo real por medio de un brazo robótico, de manera que sea posible llevar a cabo un juego coherente. Además, se integra una plataforma de enseñanza para los potenciales usuarios, con lo cual en posteriores proyectos se planifique como una ayuda a reducir sus niveles de estrés, emociones como la tristeza, ansiedad o frustración y permitiendo que estimulen su cognición mediante la educación. La selección de la potencial aplicación es realizada para definir las necesidades del sistema.

La adquisición de señales para la respuesta es realizada mediante la detección de posiciones de las piezas de ajedrez en cada uno de los casilleros con la inclusión de visión artificial, posteriormente, estas señales son procesadas e integradas a un motor de juego de ajedrez, que permite obtener los movimientos más pertinentes de acuerdo con el nivel de dificultad especificado por el usuario en la interfaz visual (HMI). El movimiento seleccionado permitirá determinar el tipo de accionamiento del robot en el espacio tridimensional. Un esquema del sistema final se muestra en la Figura 74, con sus partes principales señaladas.

Figura 74

Esquema del sistema creado.



El prototipo incluye un análisis apoyado en la Robótica, de tal manera que puede optimizarse el tipo de movimiento, el alcance y además la distribución de fuerzas. El proyecto cumple con necesidades de los potenciales usuarios, siendo pacientes oncológicos pediátricos, realizando un análisis del contexto hospitalario, enfocando el diseño en la calidez, comodidad, estética agradable y funcionalidad. Por lo cual, este sistema tendrá la capacidad de mantenerse estable, ya sea en la cama hospitalaria u otra superficie donde sea colocado mediante apoyos plegables en su parte inferior.

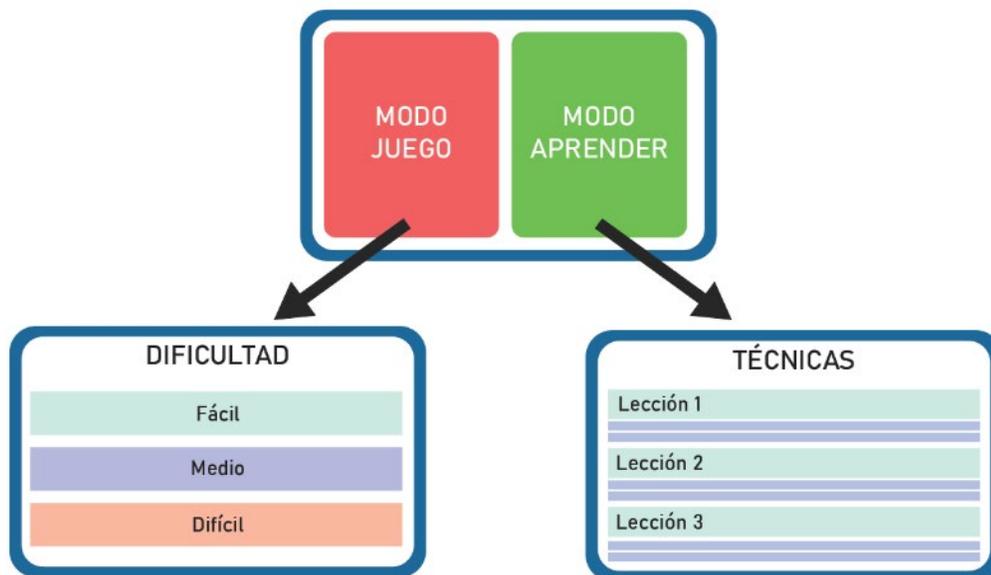
Las funciones serán accesibles mediante una interfaz HMI, aquí el usuario es capaz de seleccionar el modo educacional o de juego competitivo, en el primero se incluirán rutinas de movimiento y una voz agradable para especificar los tipos de movimiento que deberá realizar el

paciente, los cuales serán comprobados por el procesador; en el segundo modo, se genera un juego con dificultad variable de acuerdo con lo seleccionado, colocando como oponentes al paciente y la máquina.

En la Figura 75, se observa de forma general, los modos de uso presentes en el sistema, que serán accesibles mediante la interfaz visual.

Figura 75

Modos de funcionamiento en sistema con HMI.



Con este diseño se propone una mayor inclusión de grupos minoritarios y la adopción de nuevas tecnologías que permitan una mayor sostenibilidad psicológica dentro del ambiente hospitalario en pacientes pediátricos con estadía prolongada, permitiendo mejores avances en tratamientos, cooperación en diversas acciones médicas y menor impacto en la salud por el estrés.

Conclusión

La identificación de requerimientos solventa la relevancia de las diferentes características para el diseño y construcción del prototipo, orientado hacia la interfaz de usuario, precisión de visión artificial y exactitud del movimiento. La selección de material toma en cuenta el uso de modelado por deposición

fundida (FDM por sus siglas en inglés), enfocado en la resistencia a tracción y flexión, y en la facilidad de impresión como puntos principales, con PLA+ como opción más conveniente. La esquematización de tres conceptos permite un direccionamiento correcto del prototipo tomando en cuenta los requerimientos previamente obtenidos. Así, con la herramienta CAD/CAE se generó un modelo con 375 [mm] de altura y 477 [mm] de profundidad máxima para el brazo robótico, el sistema completo posee dimensiones de 532 [mm] de altura, 535 [mm] de ancho y 560 [mm] de largo. El sistema robótico posee rangos de trabajo de -0.5° a 126° , 0 [mm] a 90 [mm] y 25.5° a 180° para los eslabones 1, 2 y 3 respectivamente.

El diseño del circuito de control en conjunto con la selección de componentes electrónicos posibilita el movimiento satisfactorio del brazo con las ecuaciones obtenidas dentro de la cinemática inversa. Se incluyen aceleración y desaceleración, para una acción que se asemeja al ser humano, dividiendo la velocidad en 5 etapas.

La programación con la integración del motor de ajedrez permite la identificación y respuesta con movimientos coherentes dentro del marco de juego normal. En la construcción se adecúa todo el prototipo de tal manera que cada una de sus partes cumpla con una estética denominada agradable y llamativa para cumplir con las necesidades del usuario final, obteniendo un modelo con 3 colores diferentes. En la interfaz humano-máquina se integran satisfactoriamente 17 pantallas que permiten navegar a través de las funciones que se incluyen dentro de los modos de juego y enseñanza, cumpliendo con el diseño con una organización homogénea de objetos dentro de la pantalla, incluyendo botones de configuración, recuadros con títulos e información y botones de navegación.

Capítulo IV

Implementación y Resultados

En este capítulo se explica el tipo de técnicas en las cuales se basan las pruebas realizadas, estas para el sistema robótico incluyen el uso de la norma ISO 9283, presentando resultados de exactitud, precisión y repetibilidad en posición y trayectoria. Además, para el algoritmo de visión artificial, se utiliza clasificación mediante matriz de confusión considerando las características del sistema en el presente proyecto, aquí se generan resultados de precisión y exhaustividad.

Pruebas de sistema robótico

Las pruebas por realizarse se establecen dentro de un marco de uso normal, es decir, para los planos y posiciones en los cuales el sistema robótico funciona regularmente, en este caso, para los puntos en el tablero de ajedrez. El sistema robótico comprende el brazo robótico con un movimiento correcto para las diversas posiciones programadas en el algoritmo, y el efector final capaz de colocar correctamente las piezas de ajedrez en los casilleros existentes.

Norma ISO 9283

Para evaluar el funcionamiento del brazo robótico se usó la norma ISO 9283, la cual establece pruebas y métodos de medición que permiten determinar el desempeño de manipuladores robóticos (ISO, 1998). Las pruebas de esta norma que se proponen para el presente prototipo son las de exactitud de la posición, exactitud de la trayectoria, precisión de la posición, precisión de la trayectoria, repetibilidad de la posición y repetibilidad de la trayectoria. Se tiene en cuenta el propósito del prototipo y que no está orientado a un uso industrial sino únicamente a la aplicación aquí explicada.

Exactitud de la posición y de la trayectoria

La norma propone el uso de uno de los planos indicados en la Figura 76 para medir estos parámetros. Dado el propósito del brazo robótico del prototipo se elige el plano 3, donde se realiza el

posicionamiento de las piezas de ajedrez. Las dimensiones del plano propuesto también son especificadas en la norma, la cual estipula que debe ser el más grande dentro del área de trabajo del robot, por esto se toma el cuadrado que forman los centros de las cuatro casillas de las esquinas del tablero de ajedrez. Este cuadrado tiene dimensiones de 245 [mm] de lado. De acuerdo con la norma, las trayectorias recomendadas son las mostradas en la Figura 77. Sin embargo, el robot está programado para realizar trayectorias solo entre los puntos centrales de cada casilla de ajedrez, por lo tanto, la trayectoria escogida comprende los puntos P1, P2, P3, P4 Y P5. Además, la norma también establece el número de ensayos que deben realizarse y el orden de estos, como se ilustra en la Figura 78.

La ecuación propuesta por la norma para determinar la exactitud de la posición es:

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_r)^2 + (\bar{y} - y_r)^2} \quad (18)$$

Donde AP_p es la exactitud de la posición. \bar{x} y \bar{y} son el promedio de las coordenadas reales medidas del ensayo y las coordenadas x_r y y_r representan la posición programada, es decir, hacia donde debe moverse el efector del robot. Para calcular la trayectoria se tiene una expresión similar (Ecuación 19) con la diferencia de que se analizan todos los puntos que la conforman y se toman en cuenta los máximos.

$$AT = \max\left(\sqrt{(\bar{x} - x_{ri})^2 + (\bar{y} - y_{ri})^2}\right) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

Precisión y repetibilidad de la posición y la trayectoria

Dado que la precisión está relacionada con la dispersión de cada una de las diferencias entre las coordenadas programadas y las obtenidas en los ensayos, se toma la desviación estándar de los 30

ensayos como métrica. La norma ISO 9283 además determina que la repetibilidad de la posición y de la trayectoria se calcula según las ecuaciones 20 y 21:

$$RP_p = AP_p + 3S \quad (20)$$

$$RT = \max(RP_{pi}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

Donde RP_p es la repetibilidad de la posición, RT es la repetibilidad de la trayectoria y S es la precisión de la posición obtenida de la desviación estándar de la muestra.

Los resultados de la exactitud, precisión y repetibilidad para la posición como para la trayectoria se sintetizan en la Tabla 29. Estos resultados satisfacen los requerimientos de exactitud expuestos en el capítulo 3 y son suficientes para la aplicación propuesta. Se destaca una precisión de 0.37 [mm] para la posición, siendo relevante al realizar los movimientos de las piezas.

Tabla 29

Parámetros de exactitud, precisión y repetibilidad para la posición y trayectoria.

Parámetro de posición	Métrica [mm]	Parámetro de trayectoria	Métrica [mm]
Exactitud	2,41	Exactitud	3,19
Precisión	0,37	Precisión	0,57
Repetibilidad	3,52	Repetibilidad	4,9

Figura 76

Definición de los planos para la ubicación de las trayectorias de ensayo según la norma ISO 9283.

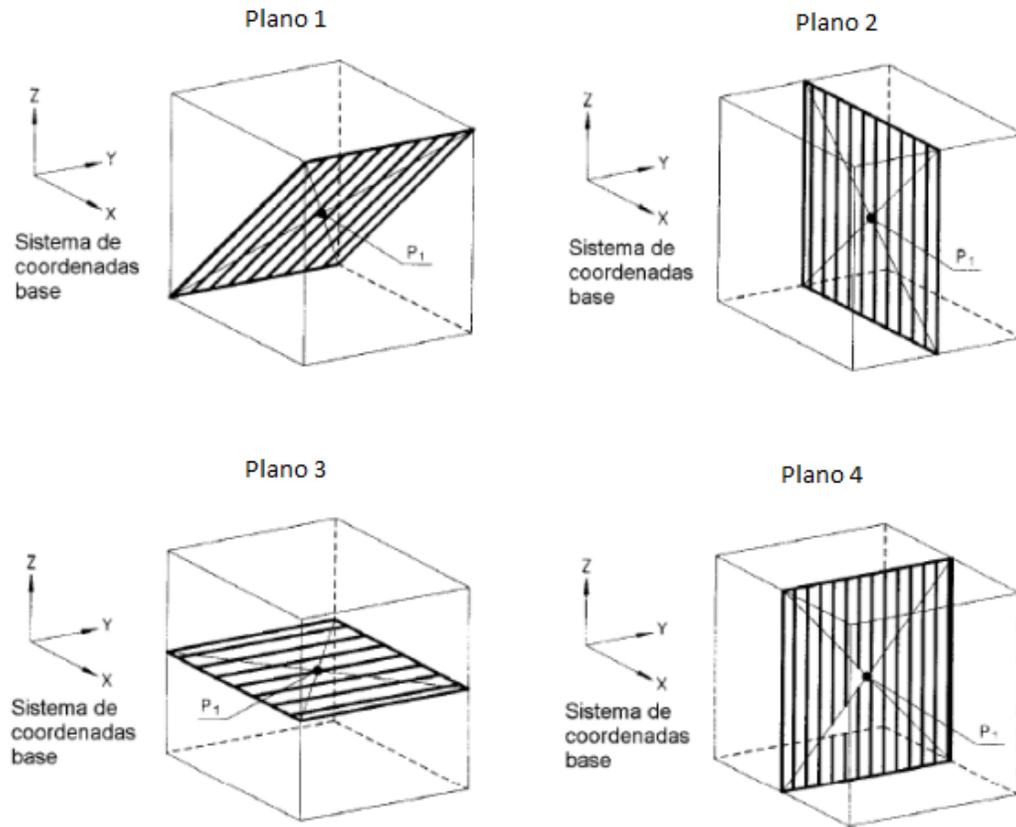


Figura 77

Trayectorias recomendadas para los ensayos según la norma ISO 9283.

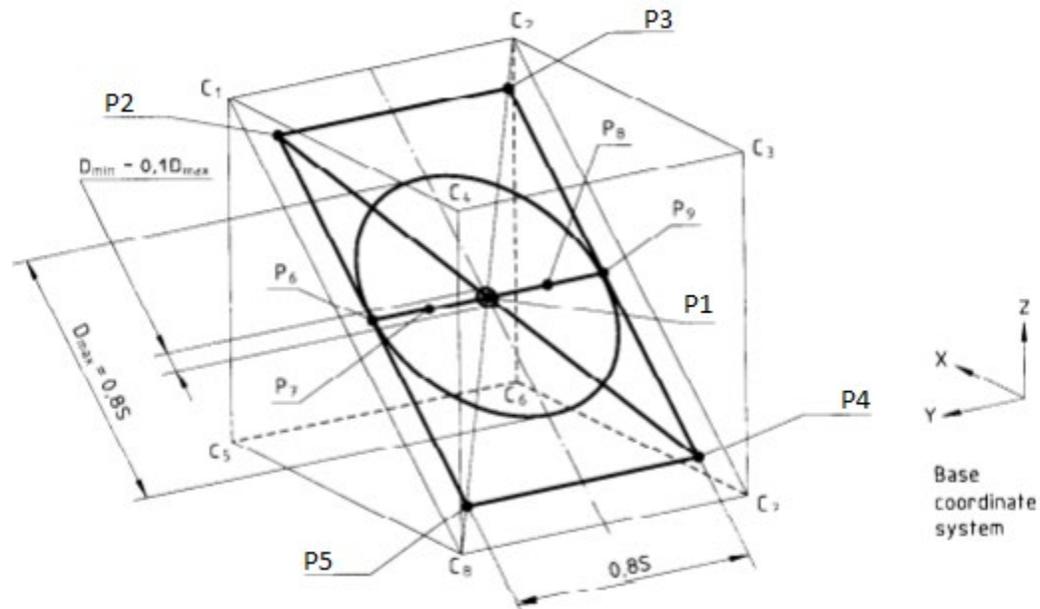
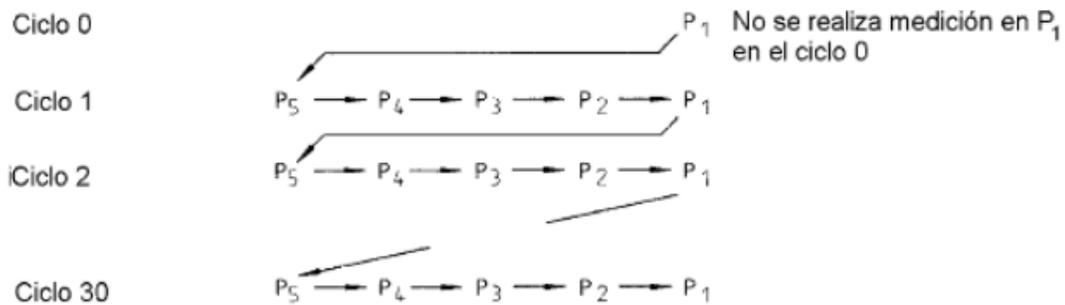


Figura 78

Ciclos propuestos por la norma ISO 9283 para los ensayos.



Tiempo de respuesta del robot

Es el tiempo medido en segundos que le toma al robot realizar un movimiento punto a punto, en las jugadas donde no hay captura existen 3 movimientos, de la posición de reposo a la posición inicial de la ficha a mover, después a la posición final de la ficha, y, por último, el movimiento de vuelta a la posición de reposo. En las jugadas de captura existen 5 movimientos, incluyendo además de los mencionados, el de posicionar en la ficha a capturar y el de mover la ficha capturada a la zona

correspondiente. Los tiempos medidos en 200 pruebas arrojan un promedio de 3.62 [s] por movimiento con un mínimo de 1.74 [s] y un máximo de 5.81 [s]. Estos resultados satisfacen los requerimientos especificados, siendo menores que el valor de 10 [s].

Pruebas de visión artificial

El sistema de visión artificial debe ser comprobado durante un juego normal con el motor de ajedrez integrado y las funcionalidades de pantalla. Las capacidades evaluadas tomarán en cuenta la detección de cada pieza movida en el turno del humano que se encuentre jugando.

Para la evaluación de sistemas de visión artificial se emplean diversas medidas, tomando en cuenta precisión, exactitud, repetibilidad, promedio de precisión, entre otros. Estos dependen del tipo de técnica utilizada como entrenamiento supervisado estadístico, aprendizaje con redes neuronales o método secuencial.

Clasificación y métricas

Para tomar en cuenta los errores presentados en la fase de funcionamiento de forma descriptiva se utiliza una matriz de confusión, esta toma en cuenta la cantidad total de elementos, es decir, de objetos tomados por el sistema de visión artificial. Estos objetos deben colocarse en diversas clases de acuerdo con la medición realizada (detección), los cuales pueden pertenecer o no a cada una de ellas. Estos resultados son cuantificados conforme al tipo de sistema para producir valores de precisión, exactitud, probabilidad, entre otros.

Una matriz de confusión se forma con la siguiente estructura:

$$CM = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1C} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2C} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{C1} & m_{C2} & \dots & m_{CC} \end{bmatrix} \quad (22)$$

En donde m_{ij} es el número de elementos que pertenecen a la clase i -ésima, pero que fueron clasificados como miembros de la clase j -ésima.

Para el presente proyecto se utilizará un caso binario, con 2 clases diferentes, debido a que, para la presente aplicación se detecta si el movimiento fue realizado o no en cada una de las casillas del tablero de ajedrez.

La matriz de confusión contará con 4 elementos: falso negativo, falso positivo, verdadero negativo y verdadero positivo. Sin embargo, el proceso de detección presente implica una clasificación desbalanceada (Luque, Carrasco, Alejandro, & de las Heras, 2019), en donde no se detectan valores negativos. Estos valores negativos implicarían un resultado del tipo “no se ha ejecutado movimiento”, pero la aplicación de este proyecto radica en que siempre se ejecutará un movimiento, por el juego del ajedrez. Cuando no existe movimiento, el software da como resultado un cambio en pantalla, indicando al usuario que debe realizar un movimiento.

Para un análisis de este tipo es necesario utilizar el valor F (Franti, 2023), con el cual se genera mayor ponderación entre precisión, siendo la cantidad de objetos que se detectaron correctamente y exhaustividad o sensibilidad, que se expresa como la cantidad de objetos que pudieron ser detectados. Se utiliza la siguiente expresión para el cálculo:

$$f_{\beta} = \frac{(1+\beta^2)(P \cdot R)}{(\beta^2 \cdot P + R)} \quad (23)$$

Siendo β , el valor para la medición ponderada. Siendo $\beta < 1$ se aumenta el peso hacia la precisión, reduciendo la exhaustividad. P es la precisión y R la exhaustividad.

La precisión es calculada con la fórmula (24) y la exhaustividad se obtiene con el cálculo (25).

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (24)$$

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (25)$$

En donde TP , es la cantidad de verdaderos positivos, FP son los falsos positivos y FN los

objetos clasificados como falsos negativos.

Medición y resultados

Para las pruebas realizadas se efectuó un juego de ajedrez hasta obtener “mate” en cada una de las dificultades del prototipo, siendo fácil, media y difícil. Las luces LED decorativas que se encuentran debajo de cada una de las piezas de ajedrez se encontraban encendidas. Tomando las mediciones en cada detección realizada se cuenta con un total de 92 muestras, estas fueron realizadas con el prototipo ubicado en tres lugares diferentes, para así provocar una variación en la iluminación del ambiente externo. Los resultados se clasifican a continuación en la matriz de confusión:

Figura 79

Matriz de confusión del sistema de visión artificial.

		Predicción	
		Negativo	Positivo
Valor real	Negativo	0 Verdadero negativo	2 Falso positivo
	Positivo	0 Falso negativo	90 Verdadero positivo

Como se mencionó anteriormente, no existen valores de verdaderos negativos o falsos negativos. El cálculo del valor F es realizado con un puntaje β de 0.5. Los resultados se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30

Resultados obtenidos en medición de sistema de visión artificial.

Precisión [%]	Exhaustividad [%]	Valor F (0,5) [%]
95,74	100	96,57

Con un resultado satisfactorio para la precisión, de acuerdo con el objetivo planteado del 95%

en el capítulo 3 con los requerimientos necesarios del prototipo. Se evidencia un número bajo de falsos positivos encontrados en el funcionamiento y la cantidad de positivos acertados es de 90. No existe variación cuantificable a lo largo del juego, ni una alteración de resultados conforme aumenta el tiempo de funcionamiento total del prototipo. Durante la toma de muestras no ocurrió ninguna interrupción del juego de ajedrez, los falsos positivos pudieron ser corregidos mediante la pantalla “Rehacer Movimiento”, en donde se pide al usuario que se repita la acción realizada para así poder detectarla correctamente.

El valor de exhaustividad obtenido es igual al 100% debido a que todos los movimientos fueron clasificados, sin omitir movimientos efectuados.

Conclusión

El análisis del movimiento en el brazo robótico provee de resultados en exactitud con 2.41 [mm] y 3.19 [mm] para la posición y trayectoria respectivamente, cumpliendo satisfactoriamente con los requerimientos establecidos de 10 [mm] mínimos. Por lo tanto, la integración del sistema mecánico fue ejecutada correctamente. Estas pruebas fueron realizadas mediante la norma ISO 9283 para manipuladores robóticos, tomando en cuenta el plano de acción para el funcionamiento normal del brazo robótico. La visión artificial integrada con todo el sistema evidencia una precisión aproximada de 95%, llegando al valor objetivo propuesto en los requerimientos del presente proyecto. Aquí se realizaron ensayos con la matriz de confusión especificada para este tipo de sistemas, considerando la aplicación se efectuó el cálculo del valor F, que integra a la precisión y exhaustividad para una clasificación desbalanceada. Demostrando una apropiada configuración en el sistema de control y visión artificial para la detección de movimientos.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo robótico para la enseñanza y juego del ajedrez centrado en la población pediátrica que se mantiene en entornos hospitalarios. El diseño se basó en las características propias de la población objetivo pretendiendo ser lúdico, resistente, y con una estética que obedece a las recomendaciones de Sequeira (2019). Con este mismo objetivo se usaron colores llamativos tanto en modelo físico como en la interfaz de usuario, también se aplicaron formas redondeadas y elementos interactivos como luces RGB del tablero y estímulos auditivos para mejorar la experiencia en los niños. El prototipo cuenta con dos modos de funcionamiento. El primer modo es de enseñanza, en donde se presentan 27 lecciones que capacitan a un usuario con poca o ninguna experiencia a dar sus primeros pasos en el ajedrez y poder llevar a cabo una partida normal. El segundo modo es el de juego contra el robot, en el cual se pueden elegir parámetros como el color de las fichas y la dificultad. El resultado es un dispositivo con la capacidad de desarrollar juegos completos de ajedrez con una precisión del 95.7% en el reconocimiento de los movimientos y un 100% de precisión en el movimiento de las piezas por parte del brazo robótico en las condiciones establecidas. Esto permite tener partidas enteras de ajedrez, y en caso de algún error, este puede ser fácilmente solucionado mediante la interfaz gráfica, la cual provee de instrucciones simples para volver a intentar la detección. Se realizaron pruebas en tres entornos con distintas condiciones de luz y en todos los modos de dificultad.

La configuración seleccionada fue un SCARA de 3 grados de libertad como modelo del brazo robótico, a partir de esta distribución de los eslabones se creó el modelo matemático del sistema, mediante los parámetros de Denavit-Hartenberg y finalmente, se generó el cálculo de las ecuaciones de

la cinemática directa e inversa. Este modelo generó un volumen de trabajo de 13 777 [cm³], con una aplicación a un tablero de ajedrez de dimensiones máximas de 30 [cm] por lado y un área rectangular de 24 [cm] de largo y 8 [cm] de ancho para colocar las piezas capturadas.

Se utilizó software CAD/CAE para el diseño y modelado de los eslabones del prototipo. En el análisis de resistencia de estos se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 8 y un desplazamiento máximo de 1.45 [mm]. En la construcción fueron usadas técnicas de FDM con material PLA+, y corte láser para acrílico y MDF. En el post procesado se empleó lijado, aplicación de resina epoxi, resina plástica y pintura. Con ello se obtuvieron acabados lisos y homogéneos con buena apariencia estética y suficiente resistencia estructural, atractivo para el usuario final.

El sistema de visión artificial está basado en comandos secuenciales usando la biblioteca OpenCV para el procesamiento de imágenes disponible para Python. El sistema comprende la cámara modelo Raspberry Pi Wide Angle, utilizada para la obtención de las imágenes, un sistema de iluminación led, para homogenizar la imagen y las rutinas de procesamiento. Como resultado, este sistema es capaz de identificar los movimientos hechos por la persona con un 99% de precisión bajo condiciones óptimas. Este sistema provee información del movimiento que será interpretado por el motor de ajedrez para la continuación del juego en tiempo real.

Se dimensionaron los elementos electrónicos del prototipo utilizando matrices de selección. Como alimentación principal se usó una fuente conmutada de 12 [V] y 15 [A] conectada a la red doméstica, se utilizaron convertidores DC-DC a 5 [V] para alimentar la pantalla, la tarjeta de control, las luces decorativas, los controladores de los motores y optoacopladores. Para los actuadores se utilizaron motores a pasos NEMA 17, con los controladores A4988 obteniendo una resolución de 0.225° por paso. Se utilizaron luces RGB WS2812B debajo del tablero con el fin de hacerlo llamativo. Como tarjeta de control se implementó una Raspberry PI 4 de 4 [GB] de memoria RAM y para presentar la GUI se usó una

pantalla táctil LED de 7" IPS. El consumo energético total del prototipo en funcionamiento es de 119 [W]. Esta selección permitió el control del prototipo integrando las funcionalidades sin sufrir interrupciones durante su operación, constatando la selección correcta y dimensionamiento adecuado de las partes.

Se implementó el motor de ajedrez Stockfish debido a ser el más potente y versátil en la actualidad según la CCRL y denominado el más potente por Sójka (2022), además, es de código abierto. Este recibe el mensaje del movimiento detectado, confirma su validez y responde con una jugada, la cual depende del grado de dificultad seleccionado.

El prototipo cuenta con una GUI visualmente atractiva, intuitiva y sencilla de utilizar orientada a niños y adolescentes según las recomendaciones de Rello (2018). Esta GUI está basada en botones de acción con cambios de color para una correcta interacción en una pantalla táctil, permitiendo proporcionar de retroalimentación al usuario. Se siguió una distribución de objetos homogénea en todos los componentes de la interfaz y se usaron alertas sonoras en cada pantalla. Mediante esta GUI, se controlan las funciones del prototipo como el modo de juego o modo enseñanza, el color de las fichas que se desee, la dificultad de la partida, instrucciones para el usuario, descripción de movimientos, entre otros. Se incluye una pantalla de configuración en la cual se puede elegir el volumen del sonido, y tomar referencias de la posición volviendo al cero físico del robot.

Se integraron los diferentes sistemas y se realizaron pruebas de laboratorio para su validación, consiguiendo satisfacer todos los objetivos y requerimientos propuestos. Se realizaron ensayos de exactitud, precisión y repetibilidad del posicionamiento del brazo robótico obteniendo resultados de ± 2.41 [mm], ± 0.37 [mm] y ± 3.52 [mm] respectivamente, los parámetros de trayectoria tienen ponderación de: exactitud en ± 3.19 [mm], precisión con ± 0.57 [mm] y repetibilidad de ± 4.9 [mm], confirmando la capacidad del robot para mover las piezas a cualquiera de las casillas del tablero de

ajedrez sin exceder los límites de cada casilla ni dejar caer ninguna pieza mientras se realiza el movimiento.

Recomendaciones

Para el desarrollo de un prototipo que incluya el procesamiento de jugadas de ajedrez, con la finalidad de optimizar los tiempos de implementación de un motor, se recomienda una selección basada en características como la compatibilidad con el lenguaje de programación del sistema, la posibilidad de alterar la dificultad de juego, y una gran documentación disponible.

Es importante realizar un análisis adecuado de la geometría de las piezas a mover por el efector final, dado que el caballo tiene una forma y tamaño significativamente diferente al resto de piezas lo que provoca errores al sujetarlo, se recomienda modificarlo, brindando más anchura en el cuerpo y reduciendo las dimensiones de su cabeza.

El uso de la máxima velocidad de los motores NEMA 17 produce ruido en la transmisión y vibración en todo el sistema, es recomendable usar una curva de aceleraciones de acuerdo con la cantidad de ángulo movido, lo que proporciona un ritmo de movimiento variable, con secciones iniciales y finales más lentas. Esto simula el movimiento de un brazo humano al involucrar mayor naturalidad, reducción de fuerzas en la aceleración y desaceleración, al igual que mejora en la seguridad para el usuario.

Para evitar holguras en los eslabones que se encuentran en voladizo, causando pérdida de exactitud en el posicionamiento se recomienda usar tolerancias finas en el diseño y construcción de las piezas.

Trabajos Futuros

El prototipo fue desarrollado considerando la potencial aplicación a pacientes oncológicos pediátricos, se recomienda en futuros trabajos ponerlo a prueba en un ambiente real y medir el efecto de este en el estado anímico de los usuarios con pruebas a mediano y largo plazo.

Utilizando la plataforma de enseñanza ya diseñada, se propone programar e implementar nuevas lecciones, con una mayor diversidad de movimientos o estrategias. Aprovechando los recursos visuales y auditivos provistos por la iluminación led inferior y los altavoces incorporados de la pantalla.

Se pueden implementar otras funcionalidades que se integren con la programación presente en el prototipo, que fue realizada en Python y tiene capacidades como reconocimiento de voz, integración con plataformas online para un juego en línea en tiempo real, reconocimiento de gestos, entre otros.

Este proyecto está estructurado de tal manera que se acople a un juego fluido y continuo con el usuario en tiempo real, se propone en futuros trabajos implementar varios tipos de juego, no solamente ajedrez, estos pueden ser damas chinas, parchís, shogi, entre otros.

Bibliografía

- Aciego, R., García, L., & Betancort, M. (2011). *Los beneficios de la práctica del ajedrez en el enriquecimiento intelectual y socioafectivo en escolares*. La Laguna: Universidad de La Laguna.
- Adams, T. C. (2012). Chess from Square a1: Incorporating chess into the gifted class. *Gifted child today*, 243-251.
- AFNOR. (26 de 07 de 2009). *French Standardization Association*. Obtenido de AFNOR Groupe: <https://www.afnor.org/en/legal-information/>
- Aldinhas, M., & Silva, J. (2016). Designing a robotic interface for children: The monarch robot example. *Advances in Cooperative Robotics* (págs. 652-659). Lisboa: World Scientific.
- Aparicio Antón, J., & Gómez Romero, E. (2006). *Sistema de visión artificial para el reconocimiento automático de cartas. Aplicación al juego de la brisca*. Cataluña. Obtenido de <https://www.recercat.cat/handle/2072/345341>
- Asiain, J. (2018). *Integración de métodos de inteligencia artificial y procesamiento de imágenes para jugar ajedrez en el robot Baxter*. Concepción. Obtenido de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3383>
- Ayperí, D. S. (2016). An investigation on the effectiveness of chess training on creativity and theory of mind development at early childhood. *Academic Journals*, 1056-1063.
- Báez Sánchez, X. (5 de 2018). *Efectividad del "Robot Milo" en el desarrollo de habilidades sociales y comunicación en niños de 5 a 7 años con trastorno del espectro del autismo de grado 1*. Quito.
- Bulsink, B. (7 de 1998). *Device for detecting playing pieces on a board*. US Patents. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/US6168158B1/en>
- Byte Magazine. (10 de Diciembre de 1978). *Byte Magazine Volume 03 Number 12 - Life*. Obtenido de Internet Archive: <https://archive.org/details/byte-magazine-1978-12/mode/2up>
- Cannan, J., & Hu, H. (2011). *Human-Machine Interaction (HMI): A Survey*. University of Essex, Colchester.

Carrera, L. D., & Morales, N. F. (2017). *Diseño e implementación de un módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez en la empresa INVESPOL Cía. Ltda.* Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Chen, A. T.-Y., & Wang, K. I.-K. (2019). Robust computer vision chess analysis and interaction with a humanoid robot. *Computers*, 1-16.

CLR. (6 de Octubre de 2020). *Motor paso a paso: Cuándo y por qué utilizarlo*. Obtenido de CLR: <https://clr.es/blog/es/motor-paso-a-paso-cuando-utilizarlo/>

Constante, P., Chimbo, C., Jiménez, V., & Gordón, A. (5 de 2019). *Realidad aumentada con asistente robótico para el mejoramiento del aprendizaje en niños de educación primaria*. Obtenido de https://media.proquest.com/media/hms/PFT/1/fo6LC?_s=kEF3yeOnyM83nPOSNTnKzU8uUZw%3D

de la Hera Conde-Pumpido, T. (2018). The persuasive role of digital games: the case of cancer games. *Media and Communication*, 103-111.

de Maria Lima Nascimento, C., Conceição de Almeida Barbosa, E., Do Carmo Silva, B. R., Martins Almeida de Araújo, K. Q., Dantas Florencio, G. L., Gomes Canário, A. C., & de Almeida Neto, P. F. (2019). Child Oncology and Hospital Recreation. *Journal of Cancer Therapy*, 157-165.

Durán Navarro, V., & Limones Perero, G. (2020). *Diseño de un prototipo robótico recogedor de pelotas de tenis usando visión artificial*. Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49564>

ESPE. (2021). *Filosofía de nuestra Universidad*. Obtenido de <https://www.espe.edu.ec/filosofia/>

EVICIV. (10 de Septiembre de 2023). *EVICIV 702*. Obtenido de EVICIV: <https://m.media-amazon.com/images/I/A11JRd05MTL.pdf>

Franti, P. (2023). Soft precision and recall. *Pattern Recognition Letters*, 115-121.

- García-Salguero, M., Monroy, J., & González-Jiménez, J. (9 de 2018). *¿JUGAMOS? MEJORA DE LA INTERACCIÓN HUMANO-ROBOT MEDIANTE JUEGOS DE MESA*. Málaga: Instituto de Investigación Biomédica. Obtenido de https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/8287/1/978-84-09-04460-3_291.pdf
- Gómez Bustamante, J., & Martínez Cogollo, A. (1 de 2018). *Robótica educativa como propuesta de innovación pedagógica*. Barranquilla. Obtenido de <https://pca.edu.co/editorial/revistas/index.php/gci/article/view/41/39>
- Gómez, B., Antonio, J., & Martínez Cogollo, A. L. (2018). Robótica educativa como propuesta de innovación pedagógica. *Revista Gestión, Competitividad e Innovación*, 1-12.
- Gonçalves, D., & Arsenio, A. (2015). Human-Driven Multi-Robot Design Process. *6th International Conference on Automation, Robotics and Applications* (págs. 70-76). Queenstown: IEEE.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2002). *Digital image processing*. New Jersey: Prentice Hall.
- González-González, C., Violant Holz, V., Infante Moro, A., Cáceres García, L., & Guzmán Franco, M. D. (2021). Robótica educativa en contextos inclusivos: el caso de las aulas hospitalarias. *Educación XX1*, 375-403.
- Greeled Electronic. (26 de Noviembre de 2020). *APA104 Datasheet*. Recuperado el 2023, de Datasheet 4U: <https://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/GreeledElectronic/APA104/pdf.php?id=976927>
- Guarín, N. (2009). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de tablero de Ajedrez con sistema de identificación de tipo y posición de las piezas en tiempo real*. Medellín. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Nicolas-Guarin-Zapata/publication/258837854_Disenio_construccion_y_evaluacion_de_un_prototipo_de_tablero_de_Ajedrez_con_sistema_de_identificacion_de_tipo_y_posicion_de_las_piezas_en_tiempo_

real/links/00b49529243295afda000000/Diseno-construccion-y-evaluacion-de-un-prototipo-de-tablero-de-Ajedrez-con-sistema-de-identificacion-de-tipo-y-posicion-de-las-piezas-en-tiempo-real.pdf

- H. Rodrigues, K. R., F. Conrado, D. B., & A. Neris, V. (2018). Lessons learned in designing a digital therapeutic game to support the treatment and well-being of children with cancer. *International Conference of Design, User Experience, and Usability* (págs. 231-243). California: Springer International Publishing AG.
- IGNITE Online. (15 de Mayo de 2020). *Robótica educativa, nuevo modelo de enseñanza*. Obtenido de Ignite Online: <https://igniteonline.la/3670/>
- ISO. (1998). *ISO 9283:1998 Manipulating industrial robots — Performance criteria and related test methods*. Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>
- Ivec, I., & Vojnovic, I. (2022). Bayesian statistics approach to chess engines optimization. *arXiv preprint*.
- Jiménez, C. (2019). *Diseño de un sistema robótico educativo para jugar al ajedrez con robots industriales*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Kantar, K. (2013). *Design and analysis of a material feeding robot for an aluminium die casting system*. Doctoral dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kopec, D. (1988). *A computer science reader* (1 ed., Vol. 1). New York: Springer. Obtenido de https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8726-6_17
- Lopes Amaral de Souza, R., Flores Mutti, C., Passos dos Santos, R., Calegari de Oliveira, D., Cavicchioli Okido, A. C., Bigolin Jantsch, L., & Tatsch Neves, E. (2021). Hospitalization perceived by children and adolescents undergoing cancer treatment. *Revista Gaúcha de Enfermagem*.
- Luna Marín, E. (8 de 2018). *Diseño y construcción de un asistente robótico y una aplicación móvil lúdica para brindar soporte educativo a niños de 3 a 7 años*. Cuenca.

- Luque, A., Carrasco, A., Alejandro, M., & de las Heras, A. (2019). The impact of class imbalance in classification performance metrics based on the binary confusion matrix. *Pattern Recognition*, 216-231.
- Maharaj, S., Polso, N., & Turk, A. (2022). Chess AI: Competing Paradigms for Machine Intelligence. *Entropy*, 24(4), 550.
- Marín, F. (Abril de 2015). Ajedrez social y terapéutico. *La revista del club de ajedrez Magic Extremadura*(10).
- Markopoulos, P., & Giannakos, M. (2021). Design of digital technologies for children. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 1287-1301.
- Marques da Rosa, V., Daudt, F., Miletto Tonetto, L., Brust-Renck G., P., Phipps Reed, J., & Sanson Fogliatto, F. (2022). Playful interventions to promote the subjective wellbeing of pediatric cancer inpatients during laboratory and imaging exams: A qualitative study. *European Journal of Oncology Nursing*.
- Micropap. (20 de Febrero de 2021). *Motores paso a paso vs Servos*. Obtenido de Micropap: <https://www.micropap.com/index.php/blog/motores/item/19-motores-paso-a-paso-vs-servos>
- Milat, M. (1997). *The role of chess in modern education*. Obtenido de Chesshouse: http://chessedu.org/wp-content/uploads/Role_Chess_Education.pdf
- Ministerio de Salud Pública. (15 de Febrero de 2022). *Crónica de una guerrera, de 11 años, que enfrenta el cáncer*. Obtenido de Ministerio de Salud Pública Noticias: <https://www.salud.gob.ec/cronica-de-una-guerrera-de-11-anos-que-enfrenta-el-cancer/#:~:text=En%20Ecuador%2C%20la%20prevalencia%20o,informaci%C3%B3n%20publicada%20en%20Globocan%2C%202020>
- Monge Yasbek, M. (2020). *Implementación del juego como herramienta terapéutica en pacientes*

- oncológicos preescolares hospitalizados*. Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/51527/1/CD-105-MONGE%20YASBEK.pdf>
- Noboa Parreño, M. (2015). *Incidencia del juego terapéutico en la modificación del estado emocional en niños, niñas y adolescentes diagnosticados con cáncer que acuden al Hospital Pediátrico Baca Ortiz, al Programa de Aulas Hospitalarias de la Fundación Juan José Martínez de la Ciudad de Quito*. Quito. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/7455/1/T-UCE-0007-63pi.pdf>
- Nuncira, T., González, N., Alvarado, M., Lozano, J., Robayo, L., Ovalle, C., . . . Acevedo, J. (4 de 2019). *Implementación del método STEM a través de la robótica educativa como terapia coadyuvante para mejorar la calidad de vida en pacientes pediátricos oncológicos del Hospital Militar Central, Bogotá, Colombia*. Cancún. Obtenido de <https://conferences.eagora.org/index.php/edutechno/2019/paper/view/9398/0>
- Oliveros, E., & Mosquera, J. (2011). *Interfaz humano máquina audiovisual*. Tesis de pregrado, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Omran, A. H., & Yaser , M. A. (2018). Design of smart chess board that can predict the next position based on FPGA. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems (ASTES)*, 193-200.
- Organización Panamericana de la Salud. (24 de 07 de 2020). *Cáncer*. Obtenido de OPS/OMS - Organización Panamericana de Salud: <https://www.paho.org/es/temas/cancer>
- Organización Panamericana de la Salud. (29 de 01 de 2021). *Día mundial contra el cáncer*. Obtenido de OPS/OMS - Organización Panamericana de Salud: <https://www.paho.org/es/campanas/dia-mundial-contra-cancer-2021-yo-soy-voy>
- Organización Panamericana de la Salud. (16 de Septiembre de 2021). *Perfiles de país en cáncer en la niñez - Ecuador*. Obtenido de OPS/OMS - Organización Panamericana de Salud:

<https://www.paho.org/es/documentos/perfiles-pais-cancer-ninez-ecuador>

Pajankar, A. (2022). *Raspberry Pi Image Processing Programming*. Nashik: Apress Berkeley.

doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8270-0>

Parrales Ramos, M. (9 de 2018). *TÉCNICAS PSICOTERAPÉUTICAS APLICADAS EN PACIENTE CON LEUCEMIA EN FASE DE TRATAMIENTO DE LA UNIDAD PEDIÁTRICA HEMATO-ONCOLOGÍA DEL HOSPITAL DR. FRANCISCO DE ICAZA BUSTAMANTE DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL*. Babahoyo. Obtenido de <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/5091/E-UTB-FCJSE-PSCLIN-000081.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pérez Peña, L. E. (2015). El ajedrez en el desarrollo intelectual de la primera infancia. *Universidad Pedagógica Enrique José Varona*, 54-60.

Ponsa, P., & Díaz, M. (2007). Creation of an Ergonomic Guideline for Supervisory Control Interface Design. *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*. 4562, págs. 137-146. Berlin: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-540-73331-7_15

Portillo Raya, A. (2019). *FUNDAMENTOS DE IA PARA EL AJEDREZ*. Sevilla. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11441/93632>

Portillo, A. (2019). *Fundamentos de IA para el ajedrez*. Sevilla. Obtenido de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/93632/Portillo%20Raya%20Alberto%20TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=99&zoom=100,166,788>

Ranganathan, G. (2020). An economical robotic arm playing chess using visual servoing. *Journal of Innovative Image Processing (JIIP)*, 141-146.

Rello Sanchez, M. L. (2018). *Superar la dislexia*. Barcelona: Paidós.

Revista UNIR. (26 de Noviembre de 2019). *Robótica educativa: ¿qué es y cuáles son sus ventajas?* Obtenido de Revista UNIR: <https://www.unir.net/educacion/revista/robotica-educativa/>

- Reyes Cortés, F. (2011). *Robótica, control de robots manipuladores*. México D.F.: Alfaomega.
- Saha, S. K. (2014). *Introducción a la robótica*. México, D.F.: McGraw Hill.
- Salichs, M., Alonso-Martín, F., Malfaz, M., Castillo, J., Salichs, E., Castro-González, Á., . . . Fernández Rodicio, E. (6 de 2017). *Interacción humano robot en el proyecto ROBSEN*. Valencia. Obtenido de <http://jnr2017.ai2.upv.es>
- Salinas Gaona, S. (2020). *Caracterización del pensamiento complejo y propuesta curricular para la asignatura de Robótica Educativa en estudiantes, Ecuador 2020*. Piura. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/48229/Salinas_GSE-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Salinas Salinas, L., Carrera Chamorro, E., Yáñez Lozada, P., & Granizo Jiménez, C. (9 de 2019). *PUSAHQ, un robot inteligente para la enseñanza a niños de etapa inicial*. Editorial Ciencia Digital. Obtenido de <https://www.cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/842>
- Sanabria S, J., & Archila D, J. (12 de 2011). *Detección y análisis de movimiento usando visión artificial*.
- Sánchez Sánchez, T. (2019). *La influencia de la motivación y la cooperación del alumnado de primaria con robótica educativa: un estudio de caso*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Sánchez Sánchez, T. (10 de 2019). LA INFLUENCIA DE LA MOTIVACIÓN Y LA COOPERACIÓN DEL ALUMNADO DE PRIMARIA CON ROBÓTICA EDUCATIVA: UN ESTUDIO DE CASO. *PANORAMA*, vol. 13, núm. 25, 117-150. Obtenido de <https://doi.org/10.15765/pnrm.v13i25.1132>
- Sánchez, A. (7 de 2015). *Diseño mecatrónico de un robot para guía de biblioteca*. Lima. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6138>
- Scientific Imaging. (13 de Marzo de 2021). *Choosing a Lens to meet FOV and WD requirements*. Obtenido de Scientific Imaging: <https://scientificimaging.com/knowledge-base/choosing-a-lens-to-meet->

fov-and-wd-requirements/

Sequeira, J. (2019). Developing a social robot - A case study. En J. Silva, *Robotics in Healthcare. Advances in experimental medicine and biology* (págs. 103-125). Suiza: Springer.

Shannon, C. (3 de 1950). *XXII. Programming a Computer for Playing Chess*. New Jersey. Obtenido de <https://vision.unipv.it/IA1/ProgrammingaComputerforPlayingChess.pdf>

Siemens. (2022). *6AV6647-0AK11-3AX0 - Industry Support Siemens*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2022, de Siemens: <https://support.industry.siemens.com/cs/pd/434461?pdtd=td&dl=es&lc=es-EC>

Silva Freire, K. (8 de 2020). *Desarrollo de aplicaciones interactivas mediante robótica persuasiva para adultos mayores utilizando el robot humanoide NAO*. Quito.

Simplify3D. (29 de Marzo de 2019). *Ultimate 3D Printing Material Properties Table*. Obtenido de Simplify3D: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>

Sobrado, E. (2003). *Sistema de visión artificial para el reconocimiento y manipulación de objetos utilizando un brazo robot*. Lima. Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/1012aed86f88feec968e80c5af36dbb6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>

Sójka, M. (2022). Performance comparison between selected chess engines. *Journal of Computer Sciences Institute*, 228-235.

Suárez Zapata, A., García Costa, D., Martínez Delgado, P. A., & Martos Torres, J. (2018). *Contribución de la robótica educativa en la adquisición de conocimientos de matemática en la Educación Primaria*. Valencia: Universitat de València.

Tabuenca, D. (1 de 2017). *Implantación de robots colaborativos en línea de producción*. Valladolid. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/23076/TFG-I->

584.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Texas Instruments. (3 de Julio de 2020). *TLC5947*. Obtenido de All Datasheet:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/240361/TI/TLC5947.html>

Viera, G. I. (2017). *Procesamiento de imágenes usando OpenCV aplicado en Raspberry Pi para la clasificación del cacao*. Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura.

Villacrés-Montesdeoca, L., Villarroel, N., Quinde, M., Silva, E., & Camino, A. (2018). Depresión en el paciente oncológico en Quito, Ecuador. *Journal of Cancerology*, 5, 111-117. Obtenido de www.journalofcancerology.com

Vivas Fernandez, L., & Sáez López, J. M. (2019). Integración de la robótica educativa en Educación Primaria. *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*, 107-128.

World Health Organization. (2020). *Ecuador - Cancer Country Profile 2020*. Genova.

Worldsemi. (13 de Agosto de 2019). *WS2812*. Obtenido de All Datasheet:

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/553088/ETC2/WS2812.html>

Zhang, W., Feltner, D., Shirley, J., Kaber, D., & Neubert, M. (2020). Enhancement and application of a UAV control interface evaluation technique: modified GEDIS-UAV. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 9(2), 1-20.

Zuñiga, P. (2021). *Diseño y construcción de un robot social para la enseñanza de ajedrez a niños de 6 a 9 años*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Zurange, K. H. (2020). Professional AI Chess Board Autonomous Chess Board (Human Vs. Robot). *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 135-138.