



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ENTRENADOR INTELIGENTE DE
LA PRIMERA FORMA DE TAEKWON-DO (TAEGUK IL JANG)**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

CHELSEA ALIET ACHIG ARMIJOS

DIRECTOR: ING. GABRIELA ANDALUZ, Msc.


D. M. Quito,

2022

DECLARACIÓN

Yo Chelsea Aliet Achig Armijos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.

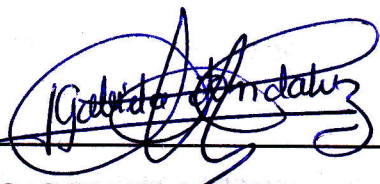


Chelsea Aliet Achig Armijos

C.I. 171663979-2

CERTIFICACIÓN

La docente de la Facultad de Ciencias Técnicas, escuela de Ingeniería Mecatrónica Ingeniera Gabriela Andaluz Ortiz encargada de la revisión del documento final, CERTIFICA QUE: El proyecto de investigación denominado "Diseño y Construcción de un Entrenador Inteligente de la Primera Forma de Taekwon-do (Taeguk Il Jang)", fue desarrollado por la Srta. Chelsea Aliet Achig Armijos y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.



ING. GABRIELA ANDALUZ, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

A mis padres, que son lo más importante que tengo en la vida

A mi abuelita Kay, que me ha motivado y acompañado en todo este camino

A mi abuelito Luis y tía Laura, que me guían en cada paso que doy

Agradecimientos

A mis padres, por el amor que siempre me entregan, su apoyo en los momentos más difíciles, sus enseñanzas, consejos, regañadas, por todo el esfuerzo que hacen para brindarme lo mejor y por siempre estar pendientes de mí.

A mis abuelitos, por su sacrificio, sabiduría y por enseñarme a esforzarme siempre en todo lo que haga.

A Carlitos, Sebas y demás compañeros de la universidad por su amistad, apoyo, motivación, por todos los buenos momentos vividos, pero sobre todo por estar en los más difíciles. No me habría sido posible seguir adelante sin ustedes.

A mis amigos del colegio, por motivarme y acompañarme durante todos estos años de amistad.

A mis docentes, por todo el conocimiento que me han impartido y por ser parte de mi proceso de formación como profesional siempre como persona de bien.

A Esteban, por su amor, apoyo y confianza depositados en mí, pero sobre todo paciencia a lo largo de todos estos años juntos. Por enseñarme a no rendirme, dar todo de mí y recordarme que soy capaz de realizar todo lo que me proponga.

Y finalmente, quiero agradecerme a mí misma por no haber renunciado y por todo el esfuerzo que puse en realizar este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Tema	1
2	Objetivos	1
	2.1 General	1
	2.2 Específicos	1
3	Problema	1
4	Hipótesis	2
5	Evolución del entrenamiento deportivo	2
6	Taekwon-Do	3
	6.1 Ventajas del Taekwon-Do	3
	6.2 Poomsae	4
	6.2.1 Taeguk Il Jang	4
7	Inteligencia Artificial	7
	7.1 Aprendizaje Automático	8
	7.1.1 Aprendizaje Profundo	8
	7.2 Visión por Computadora	8
	7.2.1 Estimación de Pose	9
8	Trabajos Existentes	9
9	Análisis de Alternativas	11
	9.1 Matriz de prioridad	13
	9.2 Criterios de diseño	14
10	Diseño Mecatrónico	15
	10.1 Diseño Mecánico	16
	10.1.1 Selección del Material	16
	10.1.2 Dimensionamiento de la Plataforma de la Cámara	18

10.1.2.1	Análisis de Cargas Aplicadas a la Plataforma de la Cámara	19
10.1.2.2	Diseño por Resistencia de la Plataforma de la Cámara	20
10.1.2.3	Diseño por Rigidez de la Plataforma de la Cámara .	26
10.1.2.4	Análisis de Elementos Finitos de la Plataforma de la Cámara	28
10.1.2.5	Diseño Final de la Plataforma de la Cámara	28
10.1.3	Selección del Tornillo de Potencia	29
10.1.3.1	Análisis de Cargas Aplicadas al Tornillo de Potencia	29
10.1.3.2	Par de Torsión Requerido	31
10.1.4	Dimensionamiento de Ejes Guía	35
10.1.4.1	Análisis de Cargas Aplicadas al Eje	35
10.1.4.2	Selección del Material del Eje	38
10.1.4.3	Diseño por Resistencia del Eje	38
10.1.4.4	Diseño por Rigidez del Eje	44
10.1.4.5	Análisis de Elementos Finitos del Eje	45
10.1.5	Selección de Rodamientos Lineales	46
10.1.6	Dimensionamiento del Piñón	51
10.1.6.1	Análisis de Cargas Aplicadas al Piñón	51
10.1.6.2	Sistema de dientes	54
10.1.6.3	Diseño Final del Mecanismo Piñón-Cremallera	58
10.1.7	Dimensionamiento de la Base y Plataforma Móvil	59
10.1.7.1	Análisis de Cargas Aplicadas a la Tapa	59
10.1.7.2	Diseño por Resistencia de la Tapa	61
10.1.7.3	Diseño por Rigidez de la Tapa	66
10.1.7.4	Análisis de Elementos Finitos de la Tapa	67
10.1.7.5	Diseño Final de la Caja Base, Tapa y Plataforma Móvil	68
10.2	Diseño Electrónico	72
10.2.1	Selección de la Cámara Web	73
10.2.2	Selección del Motor	74

10.2.3	Selección del Final de Carrera	79
10.2.3.1	Activación del Final de Carrera	81
10.2.4	Selección del Controlador	83
10.2.5	Selección del Indicador Visual del Funcionamiento del Sistema	86
10.2.6	Selección de la Fuente de Alimentación	87
10.2.7	Resumen de Selección de Componentes Electrónicos	89
10.3	Programación	92
10.3.1	Selección de Modelos de Detección y Estimación de Pose Humana	92
10.3.2	Selección de Herramientas Orientadas a la Estimación de Pose Humana	95
10.3.3	Desarrollo de la Aplicación Web	98
10.3.3.1	Arquitectura de Software	98
10.3.3.1.1	Patrones de Arquitectura de Software	98
10.3.3.2	Capa de Presentación	99
10.3.3.2.1	Página de Registro e Inicio de Sesión	101
10.3.3.2.2	Cierre de Sesión	101
10.3.3.2.3	Página de Inicio	102
10.3.3.2.4	Proceso de Entrenamiento	103
10.3.3.3	Capa de Aplicación	105
10.3.3.3.1	Flujos de Funciones de la Capa de Aplicación	107
10.3.3.4	Integración Capa de Presentación y Capa de Aplicación	117
10.3.3.4.1	Acceso a la aplicación web	117
10.3.3.4.2	Cierre de Sesión	118
10.3.3.4.3	Proceso de Entrenamiento	119
10.3.3.5	Capa de Datos	120
10.3.3.5.1	Selección de Base de Datos	120
11	Pruebas y Resultados	124
11.1	Detección de Puntos Clave del Cuerpo	124

11.1.1	Interiores con Luz Azul	124
11.1.2	Exteriores con Alta Luminosidad	125
11.1.3	Exteriores con Baja Luminosidad	126
11.1.4	Interiores de Noche con Luz Blanca	127
11.1.5	Exteriores de Noche con Baja Luminosidad	128
11.1.6	Interiores con Alto Contraste	129
11.1.7	Exteriores con Bajo Contraste	130
11.2	Modelo de Calificación	131
12	Análisis de Costos	155
13	Conclusiones y Recomendaciones	157

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Primera Forma de Taekwon-Do (Taeguk Il Jang)	7
2	Diseño del Entrenador Inteligente	15
3	Factores de seguridad para el diseño de máquinas	19
4	Diseño por Resistencia de Plataforma de la Cámara: Diagrama de Cuerpo Libre	20
5	Cortante, Momento y Deflexión de Vigas en Voladizo con Carga en Extremo	21
6	Diseño por Resistencia de Plataforma de la Cámara: Diagramas de Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores	22
7	Variables a Considerar para el Cálculo del Espesor de la Plataforma de la Cámara	22
8	Fórmulas de Esfuerzo Cortante Máximo debido a Flexión	23
9	Valor de Resistencia a la Fluencia para Probetas de PLA con Mallado Cuadrado	25
10	Límites de Deflexión Recomendados	26
11	Análisis de Elementos Finitos de la Plataforma de la Cámara	28
12	Diseño Final de la Plataforma de la Cámara	29
13	Masa de Plataforma de la Cámara para el Análisis de Cargas Aplicadas al Tornillo de Potencia	30
14	Tornillo Sin Fin 8mm y Tuerca	31
15	Coeficientes de Fricción de Pares Roscados	33
16	Diseño de Guía para el Tornillo	34
17	Diseño del Acople del Tornillo	35
18	Masa de Elementos Impresos en 3D para el Análisis de Cargas Aplicadas al Eje	36
19	Masa de Tornillo de Potencia y Tuerca para el Análisis de Cargas Aplicadas al Eje	36

20	Masa de Cojinete para el Análisis de Cargas Aplicadas al Eje	37
21	Equivalentes de Grados de Acero	38
22	Catálogo de Ejes CROMSTEEL	38
23	Diseño por Resistencia del Eje: Diagrama de Cuerpo Libre	39
24	Cortante, Momento y Deflexión de Vigas en con Carga Central y Apoyos en Extremos	39
25	Diseño por Resistencia del Eje: Diagramas de Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores	40
26	Variables a Considerar para el Cálculo del Diámetro del Eje	41
27	Resistencia a la Fluencia del Acero AISI1050	43
28	Análisis de Elementos Finitos del Eje	45
29	Diagrama del Factor de Dureza	47
30	Factor de Temperatura	47
31	Factor para Carrera Corta	48
32	Valores orientativos de horas de servicio de los diferentes tipos de máquinas	48
33	Diagrama para el Factor de Duración de Vida	49
34	Selección de Rodamientos Lineales	50
35	Dimensionamiento del Piñón: Diagrama de Cuerpo Libre	51
36	Coeficiente de fricción del PLA	53
37	Coeficiente de fricción del cojinete lineal	53
38	Sistema de dientes estándar para engranes rectos	55
39	Perfiles Básicos de Dientes de Cremallera	55
40	Factor de Lewis	58
41	Diseño Final del Mecanismo Piñón-Cremallera	59
42	Masa de Eje para el Análisis de Cargas Aplicadas a la Tapa	60
43	Masa de Mecanismo Piñón-Cremallera para el Análisis de Cargas Aplicadas a la Tapa	60
44	Diseño por Resistencia de la Tapa: Diagrama de Cuerpo Libre	62
45	Diseño por Resistencia de la Tapa: Diagramas de Fuerzas Cortantes y Mo- mentos Flectores	63

46	Variables a Considerar para el Cálculo del Espesor de la Tapa	63
47	Análisis de Elementos Finitos de la Tapa	67
48	Diseño Final de la Tapa	68
49	Soporte para Ejes	69
50	Análisis de Elementos Finitos del Soporte del Eje	69
51	Diseño Final de la Caja Base	70
52	Centro de Masa de la Caja Base	71
53	Diseño Final de la Plataforma Móvil	71
54	Diagrama de Bloques del Sistema Electrónico	72
55	Módulo ULN2003a	79
56	Masa Requerida para la Activación del Final de Carrera	81
57	Prueba de Activación del Final de Carrera	81
58	Masa de la Plataforma para la Activación del Final de Carrera	83
59	Placa Raspberry Pi 3 Modelo B	85
60	Voltajes y Corrientes de los Diodos LED	86
61	Diodo LED verde	87
62	Módulo Convertidor Buck	88
63	Patrón de Arquitectura de Software en Capas	99
64	Esquema del Sistema de Registro e Inicio de Sesión	101
65	Página de Registro e Inicio de Sesión	101
66	Esquema del Proceso de Cierre de Sesión	102
67	Botón de Cierre de Sesión	102
68	Esquema del Proceso de Inicio de Sesión del Sistema	103
69	Página de Inicio	103
70	Esquema del Proceso de Ejecución del Sistema de Entrenamiento	104
71	Página de Selección de Posición	104
72	Página de Práctica	105
73	Ventana de Reintento o Finalización de Práctica	105
74	Diagrama de Flujo del Programa Principal	107
75	Diagrama de Flujo del Proceso de Acceso a la Aplicación Web	108

76	Diagrama de Flujo del Proceso de Registro de Nuevo Usuario	109
77	Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de Lista de Posiciones	110
78	Diagrama de Flujo del Proceso de Entrenamiento	110
79	Diagrama de Flujo del Proceso de Inicio de Entrenamiento	111
80	Diagrama de Flujo del Proceso de Posicionamiento de la Cámara	112
81	Diagrama de Flujo del Proceso de Transmisión de Video	113
82	Diagrama de Flujo del Proceso de Finalización de Entrenamiento	114
83	Diagrama de Flujo del Proceso de Evaluación de Posición	115
84	Diagrama para Cálculo de Ángulos entre Puntos Clave del Cuerpo	116
85	Diagrama para Cálculo de Distancias entre Puntos Clave del Cuerpo	117
86	Diagrama de Flujo de Acceso a la Aplicación Web de Usuario Registrado . .	118
87	Diagrama de Flujo de Acceso a la Aplicación Web de Usuario No Registrado	118
88	Diagrama de Flujo de Cierre de Sesión	119
89	Diagrama de Flujo de Proceso de Entrenamiento	120
90	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de Hombres y Mujeres en Interiores con Luz Azul	125
91	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Atuen- do Oscuro	125
92	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Atuen- do Claro	126
93	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Baja Luminosidad	126
94	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de Hombres y Mujeres en Interiores con Luz Blanca y Atuendo Oscuro	127
95	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de Hombres y Mujeres en Interiores de Noche con Luz Blanca y Atuendo Claro	128
96	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores de Noche con Baja Luminosidad	129
97	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Interiores con Alto Contraste	130

98	Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Bajo Contraste	130
99	Posiciones de la Primera Forma de Taekwon-Do Realizadas por Taekwon-Doka Cinturón Negro Segundo Dan	131
100	Calificación de la Posición Oreun Ap Chagi	134
101	Calificación de la Posición Oen Ap Chagi	136
102	Calificación de la Posición Oreun Ap Kubi	137
103	Calificación de la Posición Oen Ap Kubi	139
104	Calificación de la Posición Oreun Ap Seogi	140
105	Calificación de la Posición Oen Ap Seogi	142
106	Calificación de la Posición Oreun Ap Chagi	143
107	Calificación de la Posición Oren Arae Makki	145
108	Calificación de la Posición Oreun Momtong Makki	146
109	Calificación de la Posición Oen Momtong Makki	148
110	Calificación de la Posición Oreun Olgul Makki	149
111	Calificación de la Posición Oen Olgul Makki	151
112	Calificación de la Posición Oreun Momtong Jireugi	152
113	Calificación de la Posición Oreun Momtong Jireugi	154

ÍNDICE DE TABLAS

1	Posiciones y Patadas básicas de la Primera Forma	4
2	Trabajos Existentes	10
3	Alternativas de Diseño	12
4	Alternativas de Materiales	13
5	Requerimientos del Proyecto	14
6	Componentes Principales del Entrenador Inteligente	16
7	Alternativas de Materiales	17
8	Especificaciones Técnicas de una Cámara Web	18
9	Selección de Cámara	73
10	Selección de Motor de Corriente Continua	77
11	Selección de Finales de Carrera	80
12	Selección de Controlador	84
13	Puertos Raspberry Pi 3 Modelo B	85
14	Fuentes de Alimentación	87
15	Características Módulo Convertidor Buck	89
16	Lista de Componentes Electrónicos	89
17	Modelos de Estimación de Pose Humana	93
18	Herramientas orientadas a la Estimación de Pose Humana	95
19	Marcos de Trabajo para Desarrollo Frontend	100
20	Marcos de Trabajo para Desarrollo Backend	106
21	Bases de Datos Relacionales y No Relacionales	121
22	Ventajas y Desventajas de MongoDB y Firebase	123
23	Parámetros de Evaluación del modelo de Calificación según la Posición	132

24	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Ap Chagi: Modelo vs. Taekwon-Doka	133
25	Verificación de Calificación de la Posición Oen Ap Chagi: Modelo vs. Taekwon-Doka	135
26	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Ap Kubi: Modelo vs. Taekwon-Doka	136
27	Verificación de Calificación de la Posición Oen Ap Kubi: Modelo vs. Taekwon-Doka	138
28	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Ap Seogi: Modelo vs. Taekwon-Doka	139
29	Verificación de Calificación de la Posición Oen Ap Seogi: Modelo vs. Taekwon-Doka	141
30	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Arae Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka	142
31	Verificación de Calificación de la Posición Oen Arae Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka	144
32	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Momtong Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka	145
33	Verificación de Calificación de la Posición Oen Momtong Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka	147
34	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Olgul Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka	148
35	Verificación de Calificación de la Posición Oen Olgul Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka	150
36	Verificación de Calificación de la Posición Oreun Momtong Jireugi: Modelo vs. Taekwon-Doka	151
37	Verificación de Calificación de la Posición Oen Momtong Jireugi: Modelo vs. Taekwon-Doka	153
38	Precisión del Modelo de Calificación	154
39	Análisis de Costos del Entrenador Inteligente	155

40	Análisis de Consumo Eléctrico del Entrenador Inteligente	156
41	Comparación de Productos y Servicios	157

Entrenador Inteligente de la Primera Forma de Taekwon-Do (Taeguk Il Jang)

1. Tema

El tema del proyecto planteado es el Diseño y Construcción de un Entrenador Inteligente de la Primera Forma de Taekwon-Do (Taeguk Il Jang).

2. Objetivos

2.1. General

Diseñar y construir un entrenador inteligente de la primera forma de Taekwon-Do (Taeguk Il Jang).

2.2. Específicos

- Investigar y documentar acerca de la estimación de pose humana aplicada a las artes marciales con aprendizaje profundo.
- Diseñar y seleccionar los elementos del mecanismo de soporte y posicionamiento automático del sistema.
- Dimensionar y seleccionar los componentes electrónicos adaptables al mecanismo y los dispositivos de entrada del entrenador inteligente.
- Implementar una aplicación web que permita una interacción intuitiva entre el usuario y el entrenador.
- Realizar pruebas de funcionamiento del entrenador.

3. Problema

La pandemia ha causado un gran impacto a nivel mundial al limitar las actividades físicas grupales que las personas pueden realizar en espacios cerrados, una de ellas siendo el Taekwon-Do, lo que afecta directamente a su salud y estado de ánimo. Al hablar de

Taekwon-Do se piensa solamente en aprender un estilo de defensa personal y participar en competencias de combate mientras que otras modalidades de entrenamiento que son igual de importantes como, por ejemplo, las formas, no son tomadas en cuenta. Es importante que esta actividad se la realice bajo la supervisión de un instructor ya que, de lo contrario, los practicantes pueden sufrir algún tipo de lesión al momento de ejercitar las diferentes posturas. Se puede contar con entrenadores que imparten sus clases de manera virtual o con videos pregrabados; no obstante, se requiere de un tiempo definido para asistir a ellas y sus costos y metodología no resultan ser completamente efectivos, pues no existe una supervisión. Es por ello que existe un entrenador inteligente de la primera forma de Taekwon-Do que permite a las personas desempeñar esta actividad sin la necesidad de salir de sus hogares y sin la guía de un profesional.

4. Hipótesis

El entrenador inteligente tendrá la capacidad de reconocer las posiciones que se realizan en la primera forma de Taekwon-Do. El sistema se adaptará a la estatura de la persona para poder obtener una mejor imagen de la misma al momento que realice el ejercicio. La aplicación web brindará una retroalimentación de las distintas posiciones al usuario para que pueda mejorar su entrenamiento.

5. Evolución del entrenamiento deportivo

Las actividades relacionadas con el entrenamiento deportivo han cambiado a lo largo del tiempo desde que iniciaron hace varios siglos con los Juegos Olímpicos, hasta lo que hoy se podría describir como el entrenamiento en casa. En la antigua Grecia, la preparación física tenía un lugar importante, pues el objetivo era lograr la belleza corporal; además, cuando una persona ganaba alguna competición se le otorgaba reconocimiento social y económico. Sin embargo, con el cambio de era, estos aspectos fueron perdiendo vigencia y el entrenamiento ya no tenía valoración. A comienzos del siglo XX, las teorías desarrolladas por la escuela soviética de entrenadores toman fuerza. En su evolución, traspasaron la filosofía social al deporte lo que permitió avanzar en muchos aspectos. Un libro clave fue "Tratado de fisiología de ASTRAND," en el que se explica a los técnicos cuáles son las

respuestas del organismo al ejercicio. A partir de los años 80 nace el profesionalismo en el deporte. Se da inicio a la creación de centros con instalaciones preparadas y especializadas donde los deportistas puedan entrenar. El deporte pasaba de ser un pasatiempo a ser una profesión. Finalmente, en la época actual, la industria del deporte alcanza su auge con el surgimiento del culturismo, el uso de tecnologías sofisticadas como relojes deportivos y entrenamientos a domicilio o en línea con profesionales, [1].

6. Taekwon-Do

El Taekwon-Do es un arte marcial originario de Corea del Sur y su significado está conformado por tres términos: "Tae", que hace referencia a los pies, "Kwon", a los puños, y "Do", de manera filosófica, al camino hacia la perfección. Por lo tanto, la frase Taekwon-Do se puede traducir como "el camino hacia el perfeccionamiento de los puños y los pies". Al Taekwon-Do se lo puede dividir en tres modalidades de entrenamiento que son: Kyorugi (combate), Kyupa (rompimiento) y Poomsae (formas).

En el Taekwon-Do, así como en el resto de las artes marciales tradicionales, se puede identificar el nivel de aprendizaje del practicante por medio de un sistema de cinturones llamados "obi". Existen 10 niveles de aprendizaje que se dividen en: KUP, siendo los niveles básicos, y DAN, los avanzados. A medida que el practicante asciende, aprende diferentes técnicas y posiciones de defensa y ataque cada vez más complicadas. Para poder progresar de nivel, el practicante debe someterse a una serie de pruebas de combate, formas y rompimiento que le permitirán obtener el siguiente cinturón. En la mayoría de las instituciones se suele comenzar con un cinturón blanco que significa el inicio y la inexperiencia del practicante, [2].

6.1. Ventajas del Taekwon-Do

El Taekwon-Do además de ser un entrenamiento completo en el que se aprende un estilo de defensa personal, ayuda a mejorar la disciplina, coordinación y atención de la persona. La meta final del Taekwon-Do es la superación personal, es decir, ganar conciencia del potencial que cada uno tiene y convertirse en su mejor versión, [3].

6.2. Poomsae




Las formas de Taekwon-Do, también llamadas "Poomsae", son series de movimientos básicos que simulan un combate real. Cada nivel del Taekwon-Do tiene su correspondiente poomsae comenzando por la más fácil del nivel básico, Taeguk Il Jang, hasta llegar a la más difícil del nivel avanzado, Ilyo, siendo un total de 17 poomsaes, [4].




6.2.1. Taeguk Il Jang

Taeguk Il Jang es el nombre de la primera forma de Taekwon-Do y consta de 14 posiciones diferentes: 4 de parada, 6 de defensa, 2 de ataque y 2 patadas. Se caracteriza por su facilidad y consiste en realizar las técnicas y posiciones de defensa y ataque esenciales. En la Tabla 1, se enumeran las posiciones y patadas básicas utilizadas en la primera forma, [5].

Tabla 1: Posiciones y Patadas básicas de la Primera Forma [4]

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
Ap Seogi	Posición de marcha	

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
Ap Kubi	Posición alargada	
Ap Chagi	Patada frontal	
Arae Makki	Defensa baja	

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
Momtong Makki	Defensa media	
Olgul Makki	Defensa alta	
Momtong Jireugi	Ataque medio con puño	

En la Figura 1, se puede observar la secuencia movimientos de la primera forma.

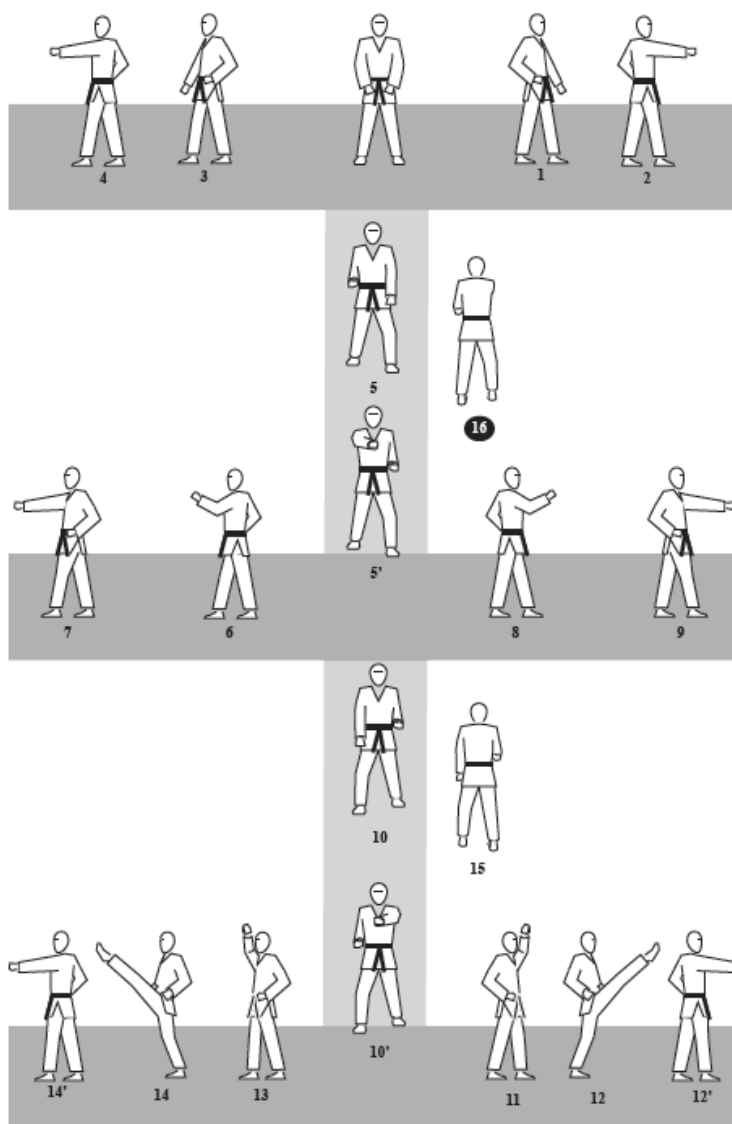


Figura 1: Primera Forma de Taekwon-Do (Taeguk Il Jang) [6]

7. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial es un subcampo de la informática que busca comprender e imitar la inteligencia humana, el comportamiento inteligente y la ley de comportamiento inteligente. Su principal propósito es hacer que una computadora logre actuar como una persona; es decir, que sea capaz de juzgar, razonar, identificar, percibir, comprender, comunicar, pensar, aprender y resolver problemas. El estudio de la inteligencia artificial está relacionado a áreas determinadas, entre las que destacan los sistemas expertos, el aprendizaje automático, el reconocimiento de patrones dentro de imágenes, la comprensión del lenguaje natural, la robótica, entre otros, [7].

7.1. Aprendizaje Automático

El aprendizaje automático, se puede describir como un tipo de inteligencia artificial en el que, dado un problema, para el cual se disponga de una gran cantidad de información y un modelo entrenado, el sistema aprende de forma autónoma a tomar decisiones correctas. Un programa que tenga un comportamiento similar al humano puede considerarse como Inteligencia Artificial, pero a menos que sus parámetros se aprendan automáticamente a partir de datos recopilados, no se lo puede denominar como Aprendizaje Automático. Muchos aspectos de la sociedad moderna como las búsquedas y recomendaciones en sitios web son potenciados por la tecnología de aprendizaje automático, y está cada vez más presente en productos como cámaras y teléfonos inteligentes, [8].

7.1.1. Aprendizaje Profundo

El aprendizaje profundo es una rama del aprendizaje automático que permite que los modelos computacionales que se componen de varias capas de procesamiento aprendan representaciones de datos con múltiples niveles de abstracción. El aprendizaje profundo lleva a cabo el proceso usando una red neuronal artificial que se compone de un número de niveles jerárquicos. En el nivel inicial de la jerarquía la red aprende algo simple y luego envía esta información al siguiente nivel, el siguiente nivel toma esta información, la combina, compone una información un poco más compleja y se lo pasa al tercer nivel, y así sucesivamente hasta que la red logra aprender funciones complejas. El aprendizaje profundo ha generado avances en el procesamiento de imágenes, video, voz y audio y muchos otros dominios como el descubrimiento de fármacos y la genómica, [9].

7.2. Visión por Computadora

La visión por computadora es un tipo de Inteligencia Artificial que utiliza aprendizaje profundo y su objetivo principal es reconstruir e interpretar escenas naturales en función del contenido de imágenes capturadas por cámaras digitales. La visión artificial se utiliza hoy en día en una amplia variedad de aplicaciones del mundo real, que incluyen: reconocimiento de objetos, detección de personas, inspección de máquinas, logística de almacén, imágenes médicas, vehículos autónomos, entre otros, [10].


7.2.1. Estimación de Pose


La estimación de pose es un problema de investigación dentro del área de la visión por computadora. Su objetivo es predecir la ubicación de puntos clave específicos del cuerpo humano, como articulaciones o rasgos faciales, para crear una representación de este a partir de datos de entrada visuales como imágenes o video. Por lo general, se utiliza un enfoque basado en modelos para describir e inferir poses del cuerpo humano y representarlos en 2D o 3D. La mayoría de los métodos utilizan un modelo cinemático rígido de N articulaciones en el que el cuerpo humano se representa como una entidad con articulaciones y extremidades, que contiene información sobre la estructura cinemática y la forma del cuerpo. Un modelo popular que utiliza redes neuronales para la estimación de pose humana en 3D en tiempo real es OpenPose, [11]. La estimación de pose humana en imágenes fijas es la base de la estimación de pose en imágenes en movimiento; sin embargo, todavía existe una serie de desafíos que incluyen oclusión en primer plano, caos de fondo, iluminación, complejidad de poses, superposiciones de varias personas, complejidad de cálculo, etc, [12]. La estimación de pose a partir de video cumple un papel fundamental al permitir la incorporación de información sobre el mundo físico en realidad aumentada, el reconocimiento de lenguaje de señas, control de gestos de cuerpo completo, el reconocimiento de acciones y cuantificación de ejercicios físicos como, por ejemplo, yoga, pilates, baile, artes marciales, entre otros. En esta última aplicación, la estimación de pose es particularmente desafiante debido a la amplia diversidad de poses posibles, oclusiones y una variedad de apariencias o atuendos, [11].

8. Trabajos Existentes

En la Tabla 2, se describen dispositivos de entrenamiento inteligentes ya existentes en el mercado.

Tabla 2: Trabajos Existentes

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
The Mirror	<p>The Mirror es una pantalla-espejo que permite al usuario realizar ejercicio con entrenadores personales en tiempo real al mismo tiempo que puede observarse a sí mismo ejercitándose. Además, permite guardar registros de cada entrenamiento para que el usuario observe su progreso y mejore su rendimiento. The Mirror es fácil de instalar ya que solamente requiere de una pared en donde colocarlo y ofrece varios tipos de ejercicios como: yoga, boxeo, baile, pilates, entre otros, [13].</p>	 <p>The image shows a person in a blue tank top and dark shorts standing in a gym, facing a large mirror. The mirror displays a virtual instructor. The gym environment includes various pieces of equipment like a barbell, weights, and a red and blue exercise ball.</p>

Nombre	Descripción	Representación Gráfica
OTARI	<p>OTARI es un tapete para entrenamiento interactivo que incluye una pantalla y un brazo de cámara inteligente, la cual logra analizar y capturar con gran precisión la forma del usuario de manera continua mientras realiza el ejercicio. OTARI brinda al usuario un entrenamiento efectivo en todo momento y en cualquier lugar ya que es un equipo portátil. Adicionalmente, el usuario puede guardar información acerca de sus entrenamientos, ya que estos registros, junto con la guía y retroalimentación personalizada de instructores, le permiten mejorar su rendimiento, [14].</p>	

9. Análisis de Alternativas

En la Tabla 3 se presentan algunas alternativas planteadas para el diseño del entrenador inteligente.

Tabla 3: Alternativas de Diseño

Alternativa	Imagen	Descripción
Alternativa 1	 	<p>El diseño consiste en un pedestal que tenga la capacidad de posicionarse automáticamente según la altura del usuario en sentido vertical. Se incluye una pantalla para la visualización de la aplicación web y presenta ruedas que permiten una fácil transpor-tación.</p>
Alternativa 2		<p>El diseño consiste en una mesa sobre la cual se encuentran los compo-nentes electrónicos que permiten el posicionamiento automático de la cá-mara en sentido horizontal, su interior permite la colocación de una panta-lla e implementos adicionales para el entrenamiento y presenta ruedas que permiten una fácil transpor-tación.</p>
Alternativa 3		<p>El diseño consiste en una caja de fácil transpor-tación que incluye en su inte-rior los componentes necesarios pa-rra el posicionamiento automático de la cámara en sentido vertical y hori-zontal e incluye una adaptación para trípode.</p>

9.1. Matriz de prioridad

Se realiza una matriz de prioridad para respaldar la decisión del diseño tomando en cuenta los siguientes criterios y pesos:

- Portabilidad 35 %.
- Recurso financiero 25 %.
- Complejidad 20 %.
- Tiempo de implementación 10 %.
- Conocimiento requerido 10 %.

Cada opción tiene una puntuación de 1 a 5 por cada criterio, siendo 1 la puntuación más baja y 5 la más alta. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Alternativas de Materiales

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Portabilidad	4	1	5
Total	0,28	0,07	0,35
Recurso Financiero	4	2	4
Total	0,2	0,1	0,2
Complejidad	3	3	4
Total	0,16	0,12	0,16
Tiempo de Implementación	4	2	3
Total	0,08	0,04	0,06
Conocimiento Requerido	4	3	4
Total	0,08	0,06	0,08
Total	0,8	0,39	0,85

Se selecciona la alternativa 3 ya que, ofrece las mejores cualidades de diseño para el entrenador inteligente.

9.2. Criterios de diseño

El entrenador inteligente que se propone integra características de los trabajos existentes previamente presentados puesto que, es necesario incorporar un dispositivo de entrada de imágenes para la detección de posiciones y brindar una retroalimentación al usuario por medio de una aplicación web.

El primer parámetro es la portabilidad y posicionamiento automático del sistema, para lo cual se propone una estructura que considere el uso de motores y de dimensiones pequeñas que permitan el fácil transporte del dispositivo.

El siguiente parámetro es la selección del dispositivo de entrada de imágenes. Tomando en cuenta las dimensiones propuestas del sistema, se opta por hacer uso de una cámara web.

La primera forma de Taekwon-Do consiste en la ejecución de 14 diferentes posiciones, por lo que, el sistema debe ser capaz de reconocer cada una de ellas.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los requerimientos necesarios para el diseño del entrenador inteligente.

Tabla 5: Requerimientos del Proyecto

Parámetro	Descripción
Portabilidad	Transportar el dispositivo a cualquier espacio
Actuadores para el posicionamiento automático del sistema	Motores a Pasos
Dispositivo de entrada de imágenes	Cámara Web

Parámetro	Descripción
Posiciones a detectar	<ul style="list-style-type: none"> ■ 4 posiciones de parada ■ 6 posiciones de defensa ■ 2 posiciones de ataque ■ 2 posiciones de patadas

10. Diseño Mecatrónico

Se realiza un diseño 3D del entrenador inteligente tomando en consideración los requerimientos del proyecto. Este se puede observar en la Figura 2 y en la Tabla 6 se detallan sus componentes principales.

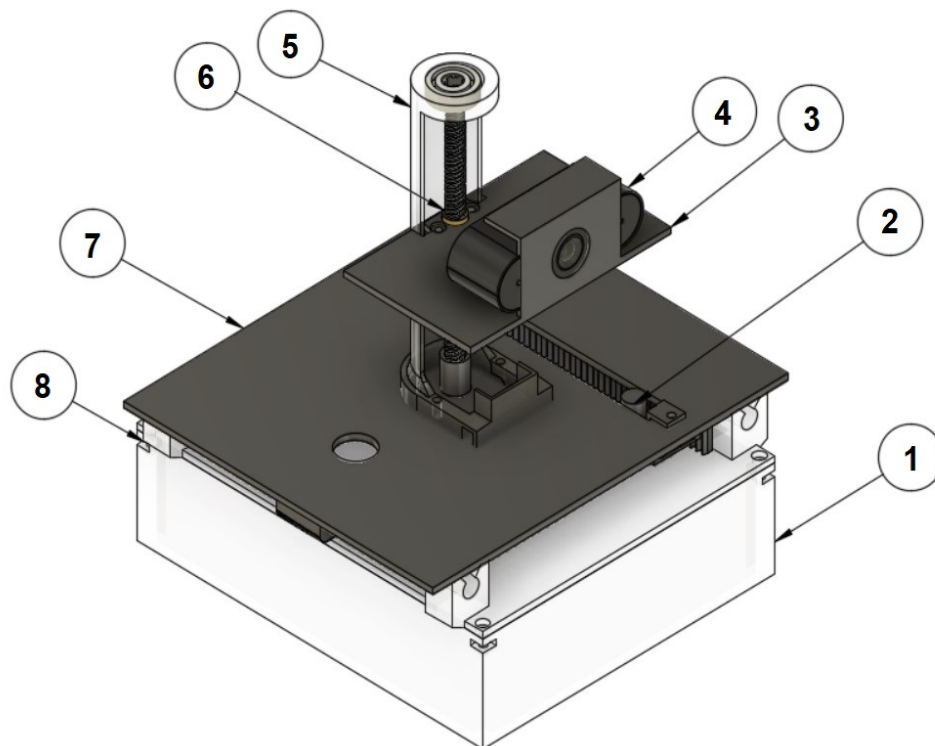


Figura 2: Diseño del Entrenador Inteligente

Tabla 6: Componentes Principales del Entrenador Inteligente

Numeración	Descripción
1	Base del entrenador inteligente
2	Mecanismo piñón-cremallera
3	Plataforma para cámara web
4	Cámara web
5	Base guía para tornillo sin fin
6	Tornillo sin fin
7	Base móvil
8	Sistema de guía y soporte

10.1. Diseño Mecánico

El diseño del entrenador inteligente se divide en 3 partes; la primera es la plataforma en la que se coloca la cámara y el tornillo de potencia que la impulsa; la segunda es la plataforma móvil, que utiliza un mecanismo piñón-cremallera y un sistema de guía y soporte para su movimiento y la tercera es la base, que contiene en su interior los componentes electrónicos. A continuación, se procede con el dimensionamiento mecánico de cada componente.

10.1.1. Selección del Material

Se decide realizar la construcción del prototipo por medio de impresión 3D. La ventaja de este proceso de manufactura es que se pueden elaborar piezas de diversas geometrías y el material que se utiliza es ligero y se encuentra con facilidad en el mercado. En la Tabla 7, se presentan los materiales de impresión 3D más ocupados.

Tabla 7: Alternativas de Materiales

Material	Descripción	Propiedades Mecánicas
ABS	<p>El ABS es un termoplástico de bajo costo que se mecaniza, fabrica y termoforma con facilidad. Es un material muy utilizado en automoción y otras aplicaciones tanto industriales como domésticas, [15].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Densidad: 1,38g/cm³. ■ Resistencia a la fluencia: 51Mpa. ■ Esfuerzo último de tensión: 55Mpa. ■ Módulo de Young: 1,19GPa. ■ Elongación a la rotura: 6 %.
PLA	<p>El PLA es un tipo de poliéster elaborado a partir de almidón vegetal fermentado procedente de maíz, yuca, caña de azúcar o pulpa de remolacha azucarera. Es un biomaterial que tiene numerosas aplicaciones tanto en la medicina como en la industria que sustituye a los polímeros petroquímicos convencionales, [16].</p>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Densidad: 1,24g/cm³. ■ Resistencia a la fluencia: 70Mpa. ■ Esfuerzo último de tensión: 73Mpa. ■ Módulo de Young: 1,28Gpa. ■ Elongación a la rotura: 7 %.

Para esta aplicación se decide utilizar PLA al contar con mayor experiencia realizando impresiones 3D con este material.

10.1.2. Dimensionamiento de la Plataforma de la Cámara

Para el dimensionamiento de la plataforma, es necesario conocer la masa y dimensiones de la cámara web ya que, es la que se encuentra sobre este componente. En la Tabla 8 se presentan las especificaciones técnicas generales de una cámara web.

Tabla 8: Especificaciones Técnicas de una Cámara Web [17], [18], [19], [20]

Especificación	Descripción
Masa aproximada	70g
Altura aproximada	50mm
Ancho aproximado	100mm
Profundidad aproximada	50mm

Por lo tanto, se realiza la base de la plataforma con las siguientes dimensiones:

$$a_p = 0,11\text{m}$$

$$p_p = 0,05\text{m}$$

Donde:

a_p : Ancho de la plataforma de la cámara, en m

p_p : Profundidad de la plataforma de la cámara, en m.

A continuación, se obtiene el espesor con el cual la plataforma es capaz de soportar la carga de la cámara. Para ello, se realiza dos tipos de análisis: de resistencia y rigidez, puesto que son dos de los parámetros más importantes dentro del diseño de estructuras, para asegurar que el material no solo no se fracture sino que también se mantenga sin deflexiones.

10.1.2.1 Análisis de Cargas Aplicadas a la Plataforma de la Cámara

Para obtener la carga total de la cámara se considera una masa de 0,07m y se aplica (1).

$$C_{tp} = m_c \cdot g \quad (1)$$

Donde:

C_{tp} : Carga total aplicada sobre la plataforma de la cámara, en N

m_c : Masa de la cámara, en kg

g : Aceleración gravitacional, en m/s^2 .

$$C_{tp} = 0,07 \cdot 9,81 = 0,6867N$$

A este resultado se le aplica un factor de seguridad de 1,5, debido a que las cargas y tensiones del prototipo pueden determinarse con facilidad de acuerdo a como se señala en la Figura 3.

Factor de Seguridad	Aplicación
1,25 – 1,5	Para materiales excepcionalmente fiables utilizados en condiciones controlables y sometidos a cargas y tensiones que se pueden determinar con certeza. Se usa casi invariablemente cuando el bajo peso es una consideración particularmente importante.
1,5 – 2	Para materiales bien conocidos bajo condiciones ambientales razonablemente constantes, sujetos a cargas y tensiones que pueden determinarse fácilmente.
2 – 2,5	Para materiales promedio operados en ambientes ordinarios y sujetos a cargas y tensiones que se pueden determinar.
2,5 – 3	Para materiales menos probados y quebradizos en condiciones medias de entorno, carga y estrés.
3 - 4	Para materiales no probados utilizados en condiciones medias de medio ambiente, carga y tensión. También se puede usar con materiales más conocidos que se van a usar en ambientes inciertos o sujetos a esfuerzos inciertos.

Figura 3: Factores de seguridad para el diseño de máquinas, p. 40, [21]

Por lo tanto, la carga total corregida aplicada sobre la plataforma se determina mediante (2):

$$C_{tcp} = C_{tp} \cdot f_{se} \quad (2)$$

Donde:

C_{tcp} : Carga total corregida aplicada sobre la plataforma de la cámara, en N

f_{se} : Factor de seguridad para el diseño de elementos, adimensional.

$$C_{tcp} = 0,6867 \cdot 1,5 = 1,03N$$

Se concluye que la carga total corregida aplicada sobre la plataforma de la cámara es de 1,03N.

10.1.2.2 Diseño por Resistencia de la Plataforma de la Cámara

Se elabora un diagrama de cuerpo libre tomando en cuenta la carga obtenida. En este caso, se analiza una carga puntual en un extremo de la base de 0,05m, considerando que la cámara se encuentra en un extremo de la plataforma, con una sujeción fija al otro extremo que representa al tornillo de potencia. En la Figura 4 se presenta el diagrama de cuerpo libre.



Figura 4: Diseño por Resistencia de Plataforma de la Cámara: Diagrama de Cuerpo Libre

Aplicando (3) y (4), de la Figura 5 en la que se presentan las ecuaciones para el caso de viga en voladizo con carga en extremo, se determinan las reacciones y momentos generados:

1 En voladizo: carga en extremo

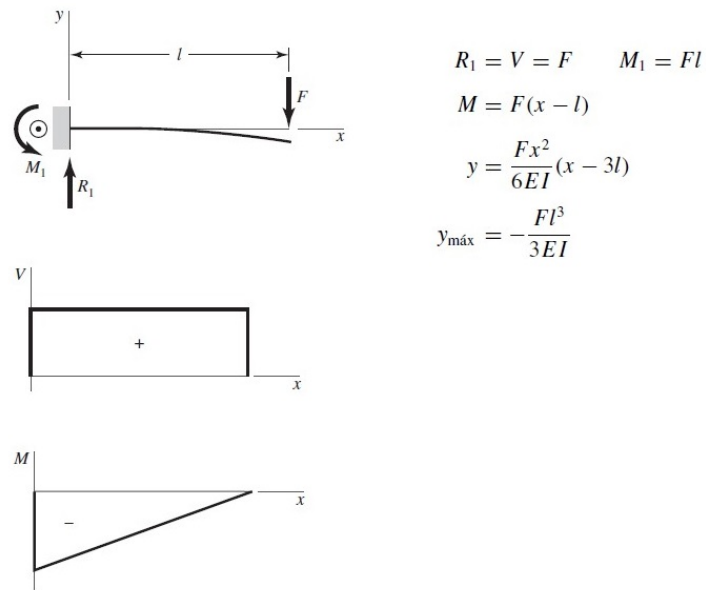


Figura 5: Cortante, Momento y Deflexión de Vigas en Voladizo con Carga en Extremo, p. 977, [22]

$$R_p = C_{tcp} \quad (3)$$

Donde:

R_p : Fuerza de reacción de la sección de la plataforma de la cámara, en N.

$$R_p = 1,03\text{N}$$

$$\Sigma M_p \odot (+) = 0$$

$$M_p = C_{tcp} \cdot L_v \quad (4)$$

Donde:

M_p : Momento flector de la sección de la plataforma de la cámara, en Nm

L_v : Longitud de la viga, en m.

$$M_p = 1,03 \cdot 0,05$$

$$M_p = 0,051\text{Nm}$$

En la Figura 6 se presentan los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores de la sección de la plataforma de la cámara.

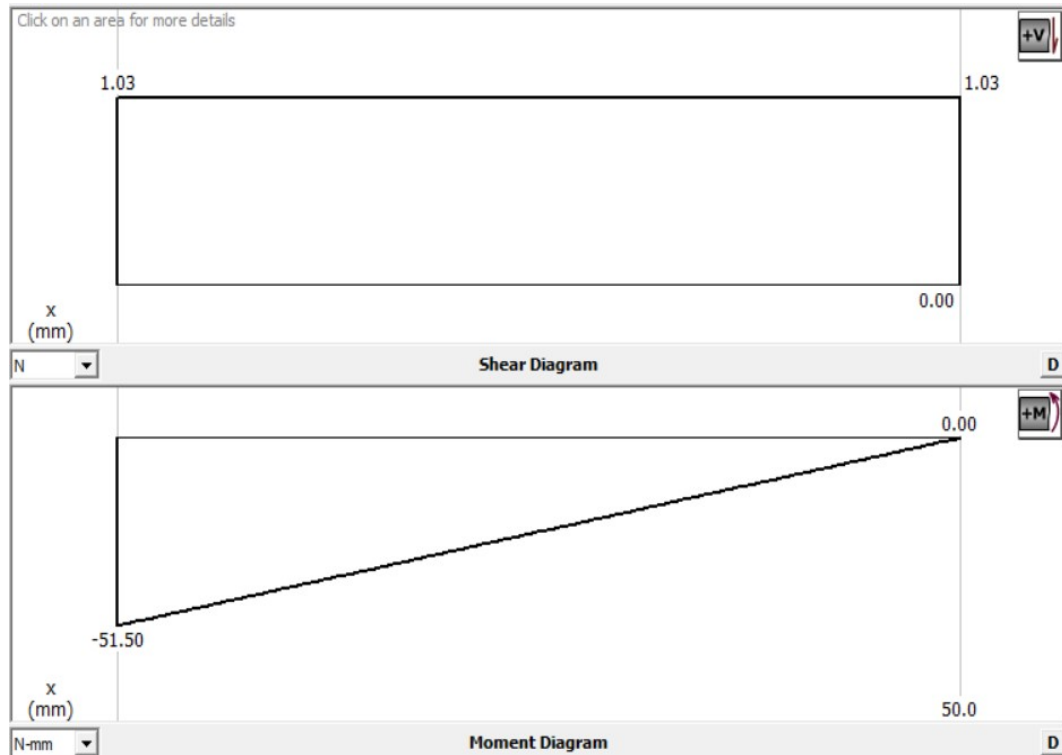


Figura 6: Diseño por Resistencia de Plataforma de la Cámara: Diagramas de Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores

A continuación, se determina el espesor de la plataforma. En la Figura 7 se presentan algunas variables que se consideran para este cálculo.

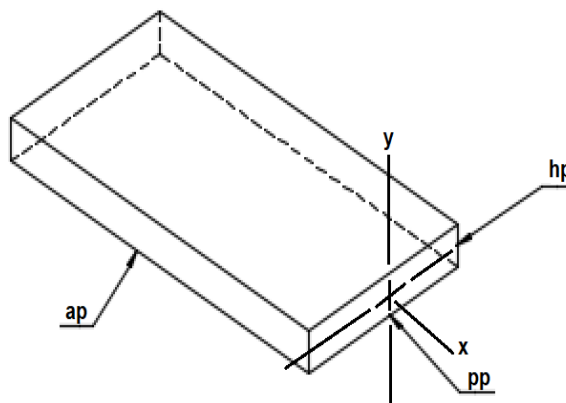


Figura 7: Variables a Considerar para el Cálculo del Espesor de la Plataforma de la Cámara

El esfuerzo en flexión se determina con (5), [22]:

$$\sigma_{fp} = \frac{M_p \cdot c}{I_p} \quad (5)$$

$$c = \frac{h_p}{2}$$

Donde:

σ_{fp} : Esfuerzo flector de la plataforma de la cámara, en MPa

I_p : Segundo momento de área de la sección transversal de la plataforma de la cámara, en m^4

c : Distancia desde el eje neutro en y , en m

h_p : Espesor de la plataforma, en m.

El segundo momento de área de la plataforma se calcula con (6), [22], debido a su geometría rectangular.

$$I_p = \frac{p_p \cdot h_p^3}{12} \quad (6)$$

Por lo que se obtiene (7):

$$\sigma_{fp} = \frac{M_p \cdot \frac{h_p}{2}}{\frac{p_p \cdot h_p^3}{12}}$$

$$\sigma_{fp} = \frac{6 \cdot M_p}{p_p \cdot h_p^2} \quad (7)$$

En el caso de una sección rectangular, el esfuerzo cortante se determina con (8), de la tabla de fórmulas del esfuerzo cortante máximo debido a flexión presentadas en la Figura 8:

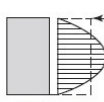
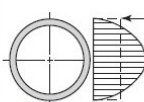
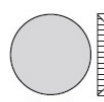
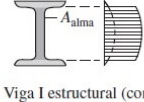
Forma de la viga	Fórmula	Forma de la viga	Fórmula
 Rectangular	$\tau_{\text{máx}} = \frac{3V}{2A}$	 Circular hueca con pared delgada	$\tau_{\text{máx}} = \frac{2V}{A}$
 Circular	$\tau_{\text{máx}} = \frac{4V}{3A}$	 Viga I estructural (con pared delgada)	$\tau_{\text{máx}} \doteq \frac{V}{A_{\text{alma}}}$

Figura 8: Fórmulas de Esfuerzo Cortante Máximo debido a Flexión, p. 94, [22]

$$\tau_p = \frac{3 \cdot V_p}{2 \cdot A_p} \quad (8)$$

Donde:

τ_p : Esfuerzo cortante de la plataforma de la cámara, en MPa

V_p : Fuerza cortante aplicada a la plataforma de la cámara, en N

A_p : Área de la sección transversal de la plataforma de la cámara, en m².

$$V_p = C_{tcp}$$

$$A_p = p_p \cdot h_p$$

Reemplazando V_p y A_p en (8) se tiene (9):

$$\tau_p = \frac{3 \cdot C_{tcp}}{2 \cdot p_p \cdot h_p} \quad (9)$$

Finalmente, se obtiene el esfuerzo equivalente presentado en (10), [22].

$$\sigma_{eqp} = \sqrt{\sigma_{fp}^2 + 3\tau_p^2} \quad (10)$$

Donde:

σ_{eqp} : Esfuerzo equivalente de la plataforma de la cámara, en MPa.

Se conoce que el valor de resistencia a la fluencia del PLA es de 70MPa; sin embargo, una vez que el material ha sido utilizado en la impresión de un componente, sus propiedades mecánicas cambian por diferentes factores como el ambiente, el tipo de impresora 3D, entre otras, por lo tanto, se utiliza un valor de resistencia a la fluencia de 65,46MPa, de las pruebas a flexión a las probetas de PLA semirrígidas con mallado cuadrado presentadas en la Figura 9, y aplicando (11) y (12), [22], se especifican valores de esfuerzo flector y cortante máximo de la plataforma de la cámara:

Probeta PLA Mallada	Resistencia a la Flexión a la Fluencia [MPa]	Resistencia última a la Flexión [MPa]	Módulo de Chord [MPa]	% de Deformación a la Flexión
Cuadrada 1	66,00	65,80	462,00	4,86
Cuadrada 2	67,50	67,50	515,00	4,99
Cuadrada 3	60,80	60,20	500,00	4,77
Cuadrada 4	66,30	66,10	514,00	4,89
Cuadrada 5	66,70	66,30	486,00	4,72
\bar{x}	65,46	65,18	495,40	4,84
σ	2,67	2,86	19,77	0,09

Figura 9: Valor de Resistencia a la Fluencia para Probetas de PLA con Mallado Cuadrado, p. 88, [23]

$$\sigma_{fp} = \frac{S_{yPLA}}{fse} \quad (11)$$

$$\tau_p = \frac{S_{yPLA}}{2 \cdot fse} \quad (12)$$

Donde:

S_{yPLA} : Valor de resistencia a la fluencia de PLA con mallado cuadrado, en MPa.

$$\sigma_{fp} = \frac{65,46}{1,5} = 43,64 \text{MPa}$$

$$\tau_p = \frac{65,46}{2 \cdot 1,5} = 21,82 \text{MPa}$$

Por lo tanto, el esfuerzo equivalente es igual a:

$$\sigma_{eqp} = \sqrt{43,64^2 + 3(21,82)^2}$$

$$\sigma_{eqp} = 57,73 \text{MPa}$$

Al reemplazar (7) y (9) en (10) se obtiene el espesor que requiere la plataforma de la cámara:

$$\sigma_{eqp} = \sqrt{\left(\frac{6 \cdot M_p}{p_p \cdot h_p^2}\right)^2 + 3 \left(\frac{3 \cdot C_{tcp}}{2 \cdot p_p \cdot h_p}\right)^2}$$

$$57,73 \cdot 10^6 = \sqrt{\left(\frac{6 \cdot 0,051}{0,05 \cdot h_p^2}\right)^2 + 3 \left(\frac{3 \cdot 1,03}{2 \cdot 0,05 \cdot h_p}\right)^2}$$

$$h_p = 3,26 \cdot 10^{-4} \text{m}$$

$$h_p = 0,326\text{mm}$$

Se puede observar que el espesor mínimo que la plataforma requiere, obtenido por medio del diseño por resistencia, es de 0,326mm. A continuación, se procede con el diseño por rigidez.

10.1.2.3 Diseño por Rigidez de la Plataforma de la Cámara

La deflexión máxima permisible depende de la aplicación del elemento dentro del sistema; por lo tanto, para determinar un valor estimado inicial se recomienda utilizar los lineamientos de deflexión recomendados presentados en la Figura 10.

	Deflexión debido a la flexión	Deflexión debido a la torsión
<i>Partes de máquina en general</i>	$\frac{L_i}{300} \text{ a } \frac{L_i}{2000}$	$\frac{L_i}{100} \text{ a } \frac{L_i}{1000}$
<i>Precisión moderada</i>	$\frac{L_i}{2000} \text{ a } \frac{L_i}{10000}$	$\frac{L_i}{2500} \text{ a } \frac{L_i}{50000}$
<i>Alta precisión</i>	$\frac{L_i}{10000} \text{ a } \frac{L_i}{100000}$	$\frac{L_i}{50000} \text{ a } \frac{L_i}{100000}$

Figura 10: Límites de Deflexión Recomendados, p. 793, [24]

En este caso, la existencia de una baja deflexión en la plataforma no tiene impacto en el funcionamiento general del prototipo por lo que, el elemento se encuentra dentro de la categoría de partes de máquina en general, y su deflexión es causada por flexión puesto que, el elemento tiende a doblarse debido a la carga aplicada, por lo tanto, se ocupa (13) para determinar la deflexión máxima permisible.

$$y_{pmax} = \frac{L_i}{300} \quad (13)$$

Donde:

y_{pmax} : Deflexión máxima permisible de la plataforma de la cámara, en in

L_i : Longitud de la viga, en in.

$$L_i = p_p$$

$$L_i = 0,05\text{m} = 1,96\text{in}$$

$$y_{pmax} = \frac{1,96}{300} = 6,53 \cdot 10^{-3} \text{in}$$

$$y_{pmax} = 6,53 \cdot 10^{-3} \text{in} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{m}$$

De la Figura 5 se toma (14):

$$y_{pmax} = \frac{P \cdot L_v^3}{3 \cdot E_{PLA} \cdot I} \quad (14)$$

$$P = C_{tcp}$$

$$L_v = p_p$$

$$I = I_p$$

Donde:

P : Carga aplicada al elemento, en N

L_v : Longitud de la vida, en m

I : Segundo momento de área de la sección transversal, en m^4

E_{PLA} : Módulo de Young del PLA, de la Tabla 7, en GPa.

Reemplazando P , L_v e I en (14) se obtiene (15):

$$y_{pmax} = \frac{C_{tcp} \cdot p_p^3}{3 \cdot E_{PLA} \cdot I_p} \quad (15)$$

$$y_{pmax} = \frac{C_{tcp} \cdot p_p^3}{3 \cdot E_{PLA} \cdot \frac{p_p \cdot h_p^3}{12}}$$

$$1,65 \cdot 10^{-4} = \frac{1,03 \cdot 0,05^3}{3 \cdot 1,28 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,05 \cdot h_p^3}{12}}$$

$$h_p = 3,65 \cdot 10^{-3} \text{m} \approx 3,7 \text{mm}$$

El espesor mínimo que la plataforma requiere, obtenido por medio del diseño por rigidez, es de 3,7mm. Se decide utilizar este resultado en el diseño del elemento puesto que, de esta manera se asegura que no exista una deflexión significativa.

10.1.2.4 Análisis de Elementos Finitos de la Plataforma de la Cámara

Una vez obtenido el espesor de la plataforma, se realiza un análisis de elementos finitos con el software Fusion 360 aplicando la carga de 1,03N. En la Figura 11 se verifica que la deflexión resultante de 0,12mm difiere un poco de la máxima calculada de 0,16mm, esto se debe a las propiedades del material seleccionado para el análisis en el software y al espesor de 3,7mm en lugar de 3,65mm; sin embargo, indica que el resultado obtenido es correcto.

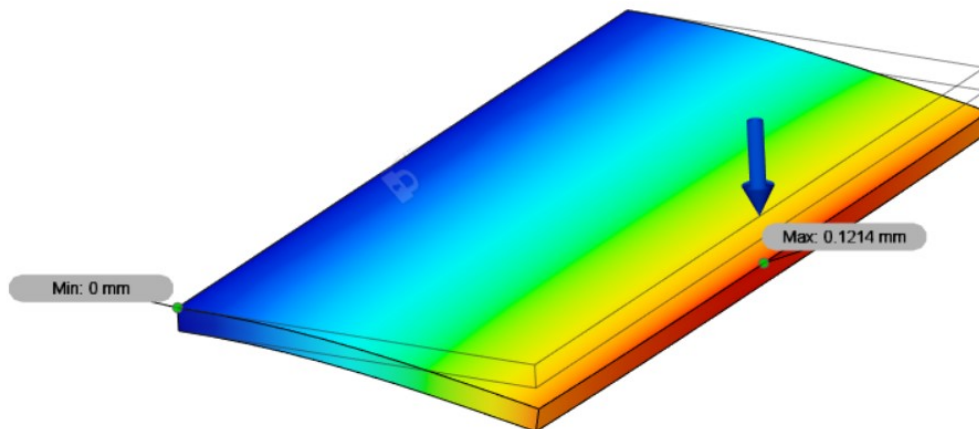


Figura 11: Análisis de Elementos Finitos de la Plataforma de la Cámara

10.1.2.5 Diseño Final de la Plataforma de la Cámara

En la Figura 12 se presenta el diseño final de la plataforma de la cámara, la cual tiene las siguientes dimensiones:

$$a_p = 0,11\text{m}$$

$$p_p = 0,05\text{m}$$

$$h_p = 0,0037\text{m}$$

Adicionalmente, se agrega un espacio de sujeción para la cámara y tuerca del tornillo de potencia.

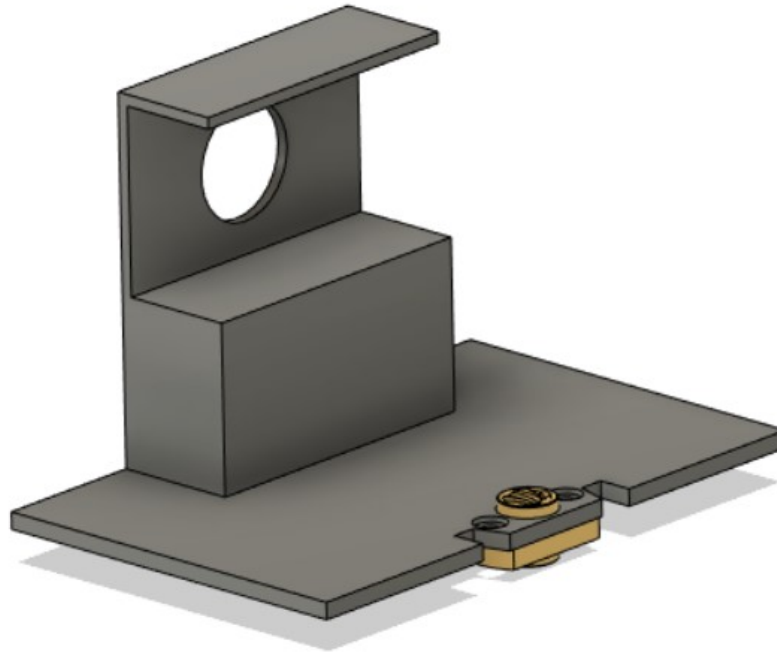


Figura 12: Diseño Final de la Plataforma de la Cámara

10.1.3. Selección del Tornillo de Potencia

A continuación, se selecciona el tornillo de potencia, el cual permite el movimiento vertical de la plataforma de la cámara.

10.1.3.1 Análisis de Cargas Aplicadas al Tornillo de Potencia

Para obtener la carga total aplicada sobre el tornillo de potencia se considera la masa de la cámara y de la plataforma de la cámara y se aplica (16).

$$C_{ttn} = m_{tn} \cdot g \quad (16)$$

Donde:

C_{ttn} : Carga total aplicada sobre el tornillo de potencia, en N

m_{tn} : Masa total para el análisis de cargas aplicadas al tornillo de potencia, en kg.

Para obtener m_{tn} se utiliza (17):

$$m_{tn} = m_c + m_{plat} \quad (17)$$

Donde:

m_{plat} : Masa de la plataforma de la cámara, en kg.

La masa de la plataforma de la cámara se obtiene mediante el software ideaMaker y su valor se presenta en la Figura 58

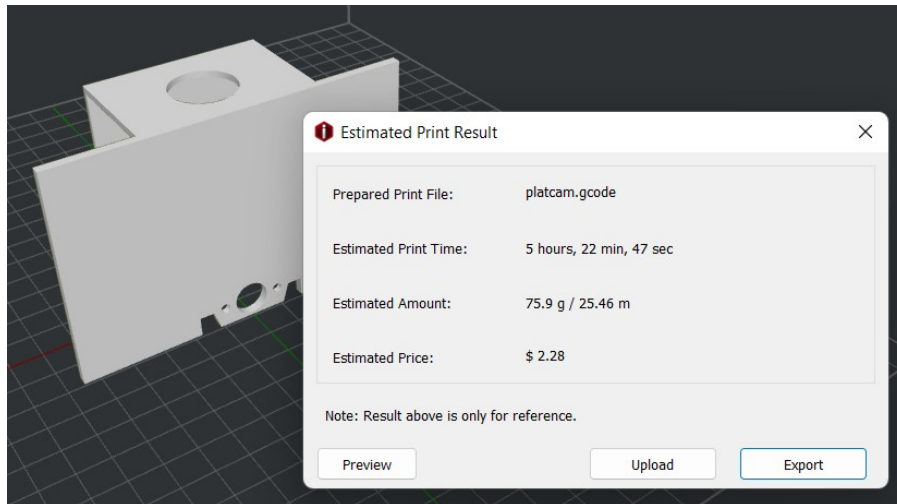


Figura 13: Masa de Plataforma de la Cámara para el Análisis de Cargas Aplicadas al Tornillo de Potencia

$$m_{tn} = 0,07 + 0,076$$

$$m_{tn} = 0,146\text{kg}$$

Por lo tanto, reemplazando en 16, la carga total aplicada al tornillo es igual a:

$$C_{ttn} = 0,146 \cdot 9,81 = 1,43\text{N}$$

La carga total corregida aplicada sobre el tornillo se determina mediante (18):

$$C_{tctn} = C_{ttn} \cdot f_{se} \quad (18)$$

Donde:

C_{tctn} : Carga total corregida aplicada sobre el tornillo de potencia, en N.

$$C_{tctn} = 1,43 \cdot 1,5 = 2,1\text{N}$$

Se concluye que la carga total corregida aplicada sobre el tornillo de potencia es de 2,1N.

10.1.3.2 Par de Torsión Requerido

Para determinar el par de torsión requerido por el motor para elevar la carga total corregida aplicada sobre el tornillo se requiere conocer sus características principales. Por lo tanto, se selecciona el tornillo, y tuerca, de mayor disponibilidad en el mercado, el cual presenta las siguientes propiedades, [25], y se presenta en la Figura 14:

$$d_t = 0,008\text{m}$$

$$p_t = 0,002\text{m}$$

$$l_t = 0,3\text{m}$$

$$n = 4 \text{ entradas}$$

Acero AISI304

Donde:

d_t : Diámetro mayor del tornillo, en m

p_t : Paso del tornillo, en m

l_t : Longitud del tornillo, en m

n : Número de roscas del tornillo, adimensional.



Figura 14: Tornillo Sin Fin 8mm y Tuerca [25]

El par de torsión que se requiere para hacer girar el tornillo contra la carga total corregida

aplicada se determina con (19), [22]:

$$T_R = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{l + (\mu \cdot \pi \cdot d_m)}{(\pi \cdot d_m) - (\mu \cdot l)} \right) \quad (19)$$

Donde:

T_R : Par de torsión requerido para elevar la carga, en Nm

F : Fuerza de compresión axial, en N

d_m : Diámetro medio del tornillo, en m

l : Avance del tornillo, en m

μ : Coeficiente de fricción entre tornillo y tuerca, adimensional.

La fuerza de compresión axial es igual a:

$$F = C_{tctn}$$

El avance del tornillo se determina con (20):

$$l = n \cdot p_t \quad (20)$$

$$l = 4 \cdot 0,002 = 0,008\text{m}$$

Para obtener el diámetro medio se aplica (21):

$$d_m = d_t - \frac{p_t}{2} \quad (21)$$

$$d_m = 0,008 - \frac{0,002}{2} = 0,007\text{m}$$

El coeficiente de rozamiento entre el tornillo de potencia y la tuerca se obtiene de la tabla de coeficientes de fricción de pares roscados presentados en la Figura 15:

Material del tornillo	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero, seco	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
Acero, aceite para máquina	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
Bronce	0.08-0.12	0.04-0.06	—	0.06-0.09

Figura 15: Coeficientes de Fricción de Pares Roscados, p. 404, [22]

Se conoce que el material del tornillo es acero mientras que el de la tuerca bronce, por lo tanto:

$$\mu = 0,15$$

Reemplazando los datos en 19 se obtiene el par de torsión requerido:

$$T_R = \frac{2,1 \cdot 0,007}{2} \left(\frac{0,008 + (0,15 \cdot \pi \cdot 0,007)}{(\pi \cdot 0,007) - (0,15 \cdot 0,008)} \right)$$

$$T_R = 0,0039\text{Nm}$$

Se transforma el par obtenido en Nm a gf.cm aplicando (22):

$$1\text{Nm} = 10197,2\text{gf.cm} \quad (22)$$

$$T_r = 0,0039\text{Nm} = 40,68\text{gf.cm}$$

Se determina que el par de torsión requerido para hacer girar el tornillo contra la carga total corregida aplicada es 0,0039Nm.

La característica de autoblocancia se calcula con (23):

$$\mu \cdot \pi \cdot d_m \begin{cases} > l \longrightarrow \text{Existe Autoblocancia} \\ < l \longrightarrow \text{No Existe Autoblocancia} \end{cases} \quad (23)$$

$$0,15 \cdot \pi \cdot 0,007 = 3,29 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$3,29 \cdot 10^{-3}\text{m} < 0,008\text{m} \longrightarrow \text{No hay autoblocancia}$$

Se debe considerar que al no haber autoblocancia el motor debe mantenerse polarizado

una vez que la plataforma de la cámara se encuentre en la posición final.

Para determinar la eficiencia global al elevar el sistema se aplica (24), [22]:

$$e_t = \frac{F \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot T_R} \cdot 100 \quad (24)$$

Donde:

e_t : Eficiencia global del sistema, adimensional.

$$e_t = \frac{2,1 \cdot 0,008}{2 \cdot \pi \cdot 0,0039} \cdot 100$$

$$e_t = 69\%$$

La eficiencia global al elevar el sistema es 69%.

Adicionalmente, se diseña una pieza guía en la que se incluye un cojinete de diámetro igual al tornillo, es decir 8mm, para brindarle estabilidad y disminuir la fricción de este al rotar. La pieza, además, limita el giro de la plataforma de la cámara al ascender y descender debido al movimiento del motor. Finalmente, se diseña un acople para que el tornillo pueda adaptarse al eje del motor. En las Figuras 16 y 17 se presentan los diseños de estos elementos.

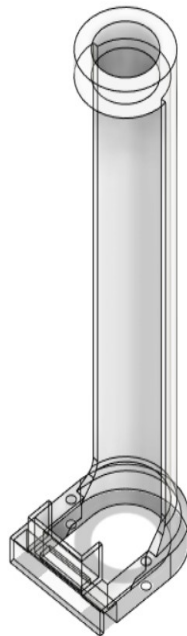


Figura 16: Diseño de Guía para el Tornillo

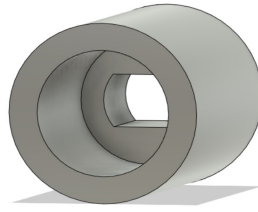


Figura 17: Diseño del Acople del Tornillo

10.1.4. Dimensionamiento de Ejes Guía

La plataforma móvil se apoya sobre 2 ejes, que en este caso son los ejes guía, los cuales a su vez cuentan cada uno con dos soportes en sus extremos. Para obtener el espesor requerido de uno de los ejes se realiza el análisis de resistencia y rigidez sobre este elemento y el resultado se aplica para ambos.

10.1.4.1 Análisis de Cargas Aplicadas al Eje

Para obtener la carga total aplicada sobre uno de los ejes se aplica (25):

$$C_{te} = \frac{m_e \cdot g}{2} \quad (25)$$

Donde:

C_{te} : Carga total aplicada sobre el eje, en N

m_e : Masa total para el análisis de cargas aplicadas al eje, en kg.

Para obtener m_e se utiliza (26):

$$m_e = m_{ei} + m_{tr} + m_{cj} + m_c \quad (26)$$

Donde:

m_e : Masa total para el análisis de cargas aplicadas al eje, en kg

m_{ei} : Masa de los elementos impresos en 3D para el análisis de cargas aplicadas al eje, en kg

m_{tr} : Masa del tornillo de potencia y tuerca para el análisis de cargas aplicadas al eje, en kg

m_{cj} : Masa del cojinete para el análisis de cargas aplicadas al eje, en kg.

El software ideaMaker brinda una masa aproximada de los elementos impresos en 3D. En la Figura 18 se presenta un valor aproximado de la masa de la base móvil, torre de sujeción para el tornillo de potencia y plataforma de la cámara.

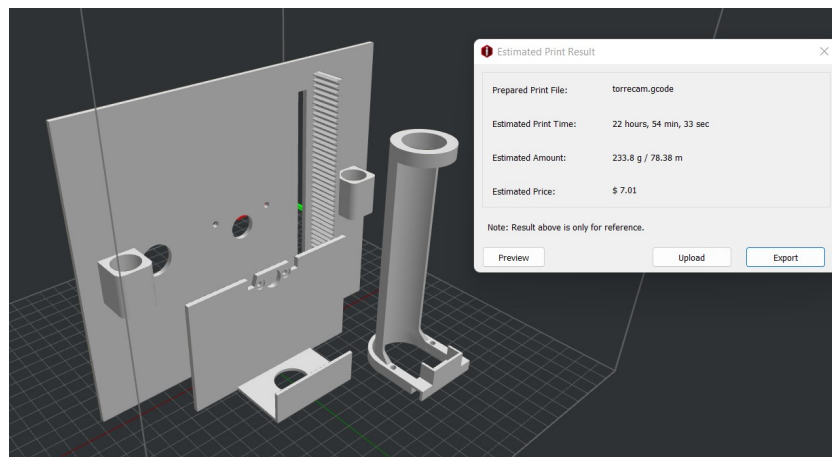


Figura 18: Masa de Elementos Impresos en 3D para el Análisis de Cargas Aplicadas al Eje

Adicionalmente, se obtiene la masa del tornillo de potencia, tuerca y cojinete mediante el software Fusion360. En las Figuras 19 y 20 se presentan estos valores.

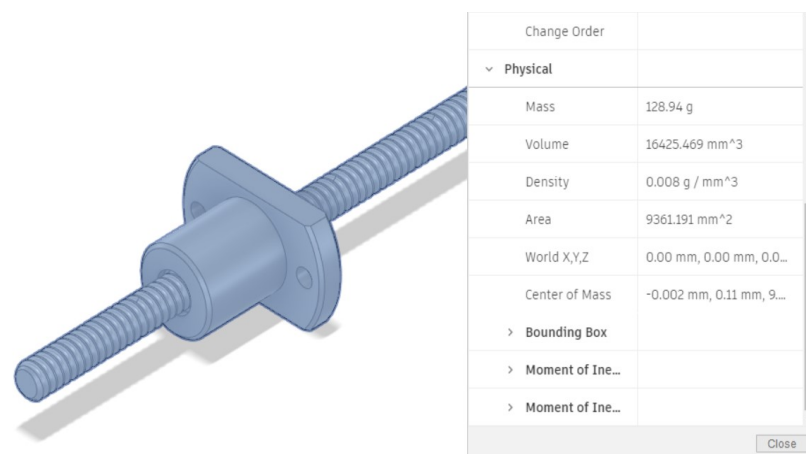


Figura 19: Masa de Tornillo de Potencia y Tuerca para el Análisis de Cargas Aplicadas al Eje

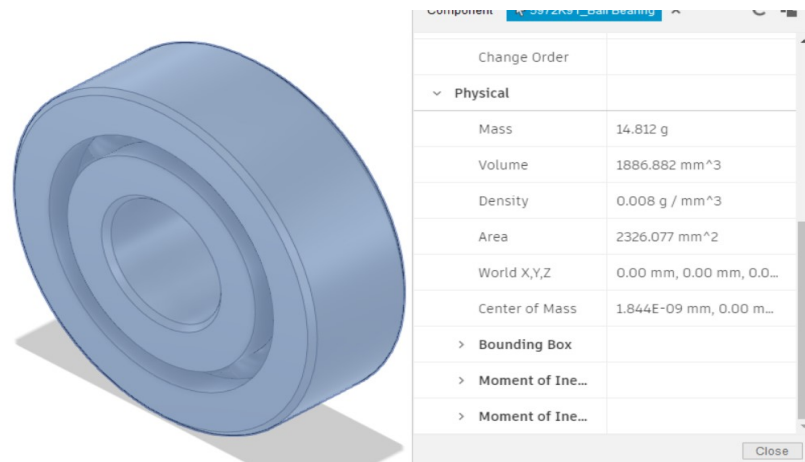


Figura 20: Masa de Cojinete para el Análisis de Cargas Aplicadas al Eje

$$m_e = 0,233 + 0,129 + 0,015 + 0,07$$

$$m_e = 0,447\text{kg}$$

La masa total para el análisis de cargas aplicadas al eje es de 0,447kg.

Reemplazando m_e en (25) se obtiene carga total aplicada sobre el eje:

$$C_{te} = \frac{0,447 \cdot 9,81}{2}$$

$$C_{te} = 2,19\text{N}$$

Se determina que la carga total aplicada sobre el eje es de 2,19N.

Para obtener la carga total corregida aplicada sobre el eje se aplica (27):

$$C_{tce} = C_{te} \cdot f_{se} \quad (27)$$

Donde:

C_{tce} : Carga total corregida aplicada sobre el eje, en N.

$$C_{tce} = 2,19 \cdot 1,5 = 3,28\text{N}$$

Se determina que la carga total corregida aplicada sobre el eje es de 3,28N.

10.1.4.2 Selección del Material del Eje

El material de los ejes que se encuentran disponibles en el mercado es acero. En la Figura 21 se presenta el equivalente al material mencionado en la Figura 22, del catálogo de ejes de precisión CROMSTEEL.

General technical specifications


Steel grade equivalents*

Euronorm	DIN	Werkstoff Nr.	AFNOR	BS	UNI	JIS	ASTM
C53 EN 10083-2	Cf53 DIN 17212	1.1213	XC48TS	070MS	C53	—	1050
C60 EN 17200	C60 DIN 17200	1.0601	1C60	60HS	C60	S58C	1060
X46Cr13 EN 10088-3	X46Cr13 DIN 17440	1.4034	Z44Cr13	420S45	X40Cr14	—	420C

Figura 21: Equivalentes de Grados de Acero, p. 4, [26]

Induction hardened and ground linear shafts

Steel grade
Cf53



Diameter	Weight	Product code	Standard length	Hardness depth SHD DIN ISO 15787	Standard tolerance	Roundness ISO/TR 5460 § 9.4.2	Parallelism	Straightness
D	Kg/m		L	mm	h6	t ₁	t ₂	t ₃
mm			mm	mm	μm	μm	μm	mm/m
4	0,10	W 4	2000/4000	0,5 - 0,8	0/-8	4	6	0,16
5	0,15	W 5	6000	0,5 - 0,8	0/-8	4	6	0,16
6	0,22	W 6	6000	0,5 - 0,8	0/-8	4	6	0,16
8	0,39	W 8	6000	0,6 - 0,9	0/-9	4	6	0,16
10	0,62	W 10	6000	0,7 - 1,0	0/-9	4	6	0,12
12	0,89	W 12	6000	0,8 - 1,2	0/-11	5	8	0,12
13	1,04	W 13	6000	0,8 - 1,2	0/-11	5	8	0,12

Figura 22: Catálogo de Ejes CROMSTEEL, p. 8, [26]

10.1.4.3 Diseño por Resistencia del Eje

Se elabora un diagrama de cuerpo libre considerando la carga total corregida que se aplica sobre el eje y las dimensiones requeridas de la estructura. En este caso, se consi-

dera una carga puntual en el centro del elemento de 0,2m de largo con dos apoyos en los extremos. En la Figura 23 se presenta el diagrama de cuerpo libre.

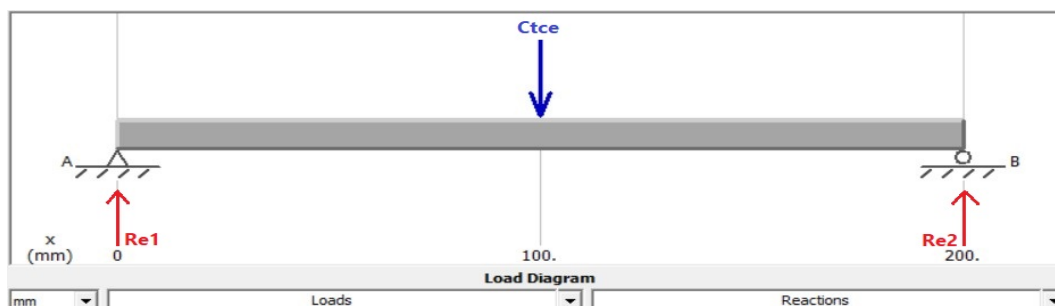


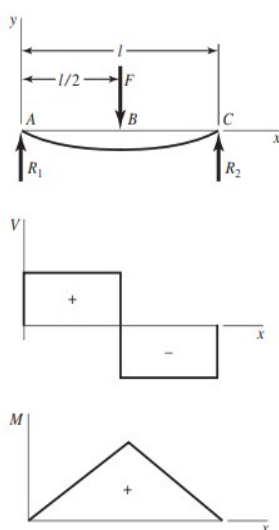
Figura 23: Diseño por Resistencia del Eje: Diagrama de Cuerpo Libre

Aplicando (28) y (29), de la Figura 24 en la que se presentan las ecuaciones para el caso de viga con apoyos simples y carga central, se determinan las reacciones y momentos generados:

Tabla A-9

Cortante, momento y deflexión de vigas (continuación)
(Nota: La fuerza y las reacciones de momento son positivas en las direcciones que se muestran; las ecuaciones de la fuerza cortante \$V\$ y el momento cortante \$M\$ siguen las convenciones de signos que se dieron en la sección 3-2.)

5 Apoyos simples: carga central



$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2}$$

$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

$$M_{AB} = \frac{Fx}{2} \quad M_{BC} = \frac{F}{2}(l-x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fx}{48EI}(4x^2 - 3l^2)$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

Figura 24: Cortante, Momento y Deflexión de Vigas en con Carga Central y Apoyos en Extremos, p. 979, [22]

$$R_{e1} = R_{e2} = \frac{C_{tce}}{2} \quad (28)$$

Donde:

\$R_{e1}\$: Fuerza de reacción en el extremo inicial del eje, en N

\$R_{e2}\$: Fuerza de reacción en el extremo final del eje, en N.

$$R_{e1} = R_{e2} = \frac{3,28}{2} = 1,64\text{N}$$

$$\Sigma M_e \circlearrowleft (+) = 0$$

$$M_e = \frac{C_{tce}}{2} \cdot \frac{L_v}{2} \quad (29)$$

Donde:

M_e : Momento flector de la sección del eje, en Nm.

$$M_e = 1,64 \cdot 0,1$$

$$M_e = 0,164\text{Nm}$$

En la Figura 25 se presenta los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores de la sección de la tapa.

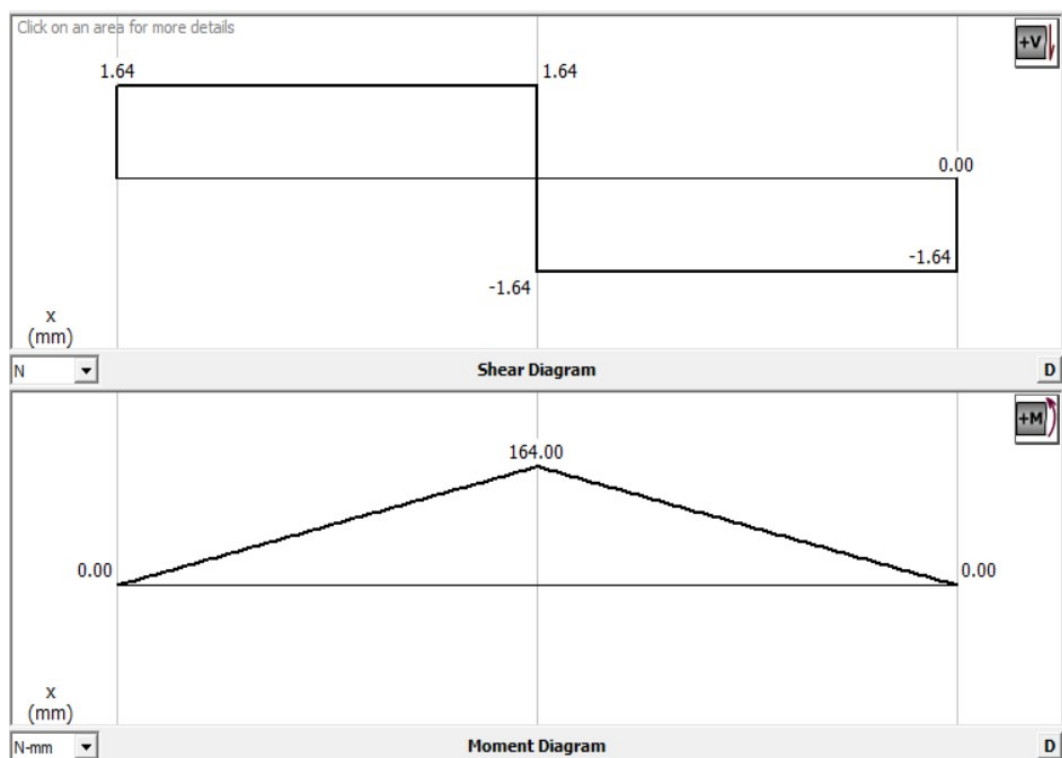


Figura 25: Diseño por Resistencia del Eje: Diagramas de Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores

A continuación, se determina el diámetro del eje. En la Figura 26 se presentan algunas variables que se consideran para este cálculo.

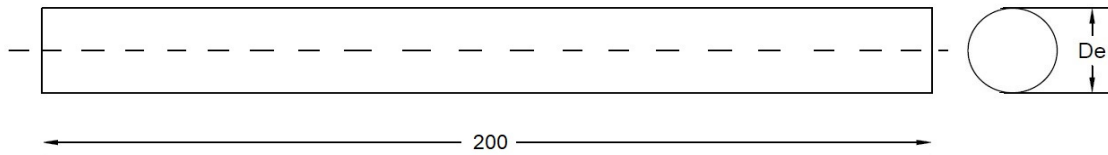


Figura 26: Variables a Considerar para el Cálculo del Diámetro del Eje

El esfuerzo en flexión se determina con (30), [22]:

$$\sigma_{fe} = \frac{M_e \cdot c}{I_e} \quad (30)$$

$$c = \frac{D_e}{2}$$

Donde:

σ_{fe} : Esfuerzo flector del eje, en MPa

I_e : Segundo momento de área de la sección transversal del eje, en m^4

D_e : Diámetro del eje, en m.

El segundo momento de área del eje se calcula con (31), [22], debido a su geometría circular.

$$I_e = \frac{\pi \cdot D_e^4}{64} \quad (31)$$

Por lo que se obtiene (32):

$$\sigma_{fe} = \frac{M_e \cdot \frac{D_e}{2}}{\frac{\pi \cdot D_e^4}{64}}$$

$$\sigma_{fe} = \frac{32 \cdot M_e}{\pi \cdot D_e^3} \quad (32)$$

En el caso de una sección circular, el esfuerzo cortante se determina con (33), [22]:

$$\tau_e = \frac{4 \cdot V_e}{3 \cdot A_e} \quad (33)$$

Donde:

τ_e : Esfuerzo cortante del eje, en Mpa

V_e : Fuerza cortante aplicada al eje, en N

A_e : Área de la sección transversal del eje, en m^2 .

$$V_e = C_{tce}$$

$$A_e = \pi \cdot \frac{D_e^2}{4}$$

Reemplazando V_e y A_e en (33) se tiene (34):

$$\tau_e = \frac{4 \cdot C_{tce}}{3 \cdot \pi \cdot \frac{D_e^2}{4}} \quad (34)$$

Finalmente, se obtiene el esfuerzo equivalente presentado en (35), [22].

$$\sigma_{eqe} = \sqrt{\sigma_{fe}^2 + 3\tau_e^2} \quad (35)$$

Donde:

σ_{eqe} : Esfuerzo equivalente del eje, en MPa.

En este caso, al no existir un momento flector, el esfuerzo equivalente es igual a (36):

$$\sigma_{eqe} = \sqrt{3\tau_e^2} \quad (36)$$

Aplicando (37), [22], se obtiene el valor de esfuerzo cortante máximo del eje:

$$\tau_e = \frac{S_{yacero}}{2 \cdot f_{se}} \quad (37)$$

Donde:

S_{yacero} : Valor de resistencia a la fluencia del acero AISI1050, de la Figura 27 del catálogo de ejes de precisión CROMSTEEL, en MPa.

General technical specifications

Mechanical properties

Product code	Steel grade	Diameter	Tensile strength (Rm)	Yield strength (Rp0.2)	Elongation (A5)	Core hardness	Surface hardness
		mm	MPa	MPa	%	HB	HRC
W	Cf53	$\varnothing \leq 18$	610 - 850	min. 475	min. 8		
WV		$18 < \varnothing \leq 100$	610 - 760	min. 340	min. 16	max. 223	62±2
WZ							
WVZ		$\varnothing > 100$	min. 560	min. 275	min. 16		

Figura 27: Resistencia a la Fluencia del Acero AISI1050, p. 5, [26]

$$\tau_e = \frac{475}{2 \cdot 1,5} = 316,66 \text{MPa}$$

Reemplazando τ_e en (36) se obtiene el esfuerzo equivalente:

$$\sigma_{eqe} = \sqrt{3(316,66)^2} = 548,47 \text{MPa}$$

Al reemplazar (34) y σ_{eqe} en (36) se obtiene el diámetro requerido del eje:

$$\sigma_{eqe} = \sqrt{3 \left(\frac{4 \cdot C_{tce}}{3 \cdot \pi \cdot \frac{D_e^2}{2}} \right)^2}$$

$$548,47 \cdot 10^6 = \sqrt{3 \left(\frac{4 \cdot 3,28}{3 \cdot \pi \cdot \frac{D_e^2}{2}} \right)^2}$$

$$D_e = 9,37 \cdot 10^{-5} \text{m}$$

$$D_e = 0,0937 \text{mm}$$

Se puede observar que el diámetro mínimo que requiere el eje, obtenido por medio del diseño por resistencia, es de 0,0937mm. A continuación, se procede con el diseño por

rigidez.

10.1.4.4 Diseño por Rigidez del Eje

En este caso, la existencia de una baja deflexión en el eje genera impacto en el funcionamiento general del prototipo por lo que, el elemento se encuentra dentro de la categoría de alta precisión, de la Figura 10, y su deflexión es causada por flexión puesto que, el elemento tiende a doblarse debido a la carga aplicada, por lo tanto, se ocupa (38) para determinar la deflexión máxima permisible.

$$y_{emax} = \frac{L_i}{10000} \quad (38)$$

Donde:

y_{emax} : Deflexión máxima permisible del eje, en in

L_i : Longitud de la viga, en in.

$$L_i = l_e$$

$$L_i = 0,2\text{m} = 7,87\text{in}$$

$$y_{emax} = \frac{7,87}{10000} = 7,87 \cdot 10^{-4}\text{in}$$

$$y_{emax} = 7,87 \cdot 10^{-4}\text{in} = 2 \cdot 10^{-5}\text{m}$$

De la Figura 24 se toma (39):

$$y_{emax} = \frac{P \cdot L_v^3}{48 \cdot E_{acero} \cdot I} \quad (39)$$

Donde:

E_{acero} : Módulo de Young del acero, [27], en GPa.

$$P = C_{tce}$$

$$L_v = l_e$$

$$E_{acero} = 210\text{GPa}$$

$$I = I_e$$

Reemplazando P , L_v , E_{acero} e I en (39) se obtiene (40):

$$y_{emax} = \frac{C_{tce} \cdot l_e^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot \frac{\pi \cdot D_e^4}{64}} \quad (40)$$

$$2 \cdot 10^{-5} = \frac{3,28 \cdot 0,2^3}{48 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot \frac{\pi \cdot D_e^4}{64}}$$

$$h_t = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{m} \approx 7 \text{mm}$$

El diámetro mínimo que el eje requiere, obtenido por medio del diseño por rigidez, es de 7mm; sin embargo, el diámetro más próximo disponible en el mercado, de acuerdo a la Figura 22, es de 8mm. Se decide utilizar este resultado puesto que, de esta manera se asegura que no exista una deflexión significativa de los ejes.

10.1.4.5 Análisis de Elementos Finitos del Eje

Una vez obtenido el diámetro del eje, se realiza un análisis de elementos finitos con el software Fusion 360 aplicando la carga de 3,28, N. En la Figura 28 se verifica que la deflexión resultante de $9,26 \cdot 10^{-4} \text{mm}$ difiere de la máxima calculada de $2 \cdot 10^{-5} \text{mm}$, esto se debe a las propiedades del material y diámetro seleccionado para el análisis en el software de 8mm en lugar de 7,26mm; sin embargo, indica que el resultado obtenido es correcto.

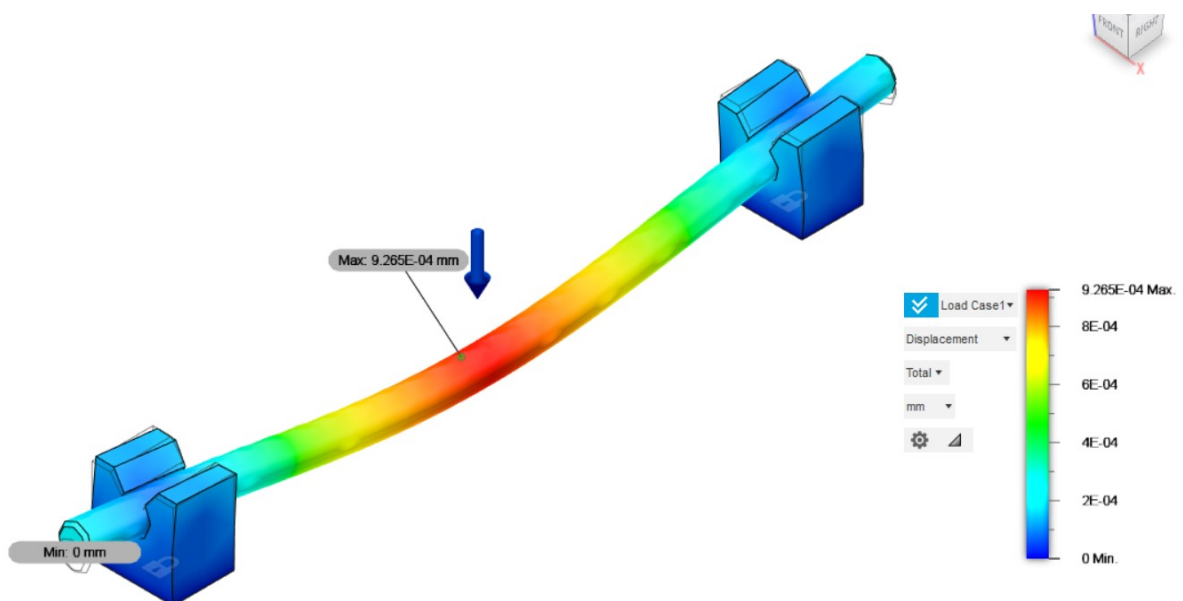


Figura 28: Análisis de Elementos Finitos del Eje

10.1.5. Selección de Rodamientos Lineales

El criterio de selección del rodamiento lineal se basa en la capacidad de carga dinámica requerida. Utilizando (41), [28], se determina se determina este valor:

$$C_{req} = \frac{F_m}{f_H \cdot f_t \cdot f_s \cdot f_L} \quad (41)$$

Donde:

C_{req} : Carga dinámica requerida, en N

F_m : Carga dinámica equivalente para cada rodamiento, en N

f_H : Factor de dureza para la dureza de ejes, adimensional

f_t : Factor de temperatura, adimensional

f_s : Factor para carrera corta, adimensional

f_L : Factor de duración de vida, adimensional.

Considerando los requerimientos de las dimensiones de la estructura, se requiere un rodamiento lineal para cada eje; por lo tanto, la carga dinámica equivalente se obtiene con (42):

$$F_m = C_{tce} \quad (42)$$

$$F_m = 3,28\text{N}$$

De la Figura 27 se conoce que la HRC del eje es:

$$HRC = 62$$

Por lo tanto, el factor de dureza, de la Figura 29 del catálogo de rodamientos lineales Rexroth Bosch Group, es igual a:

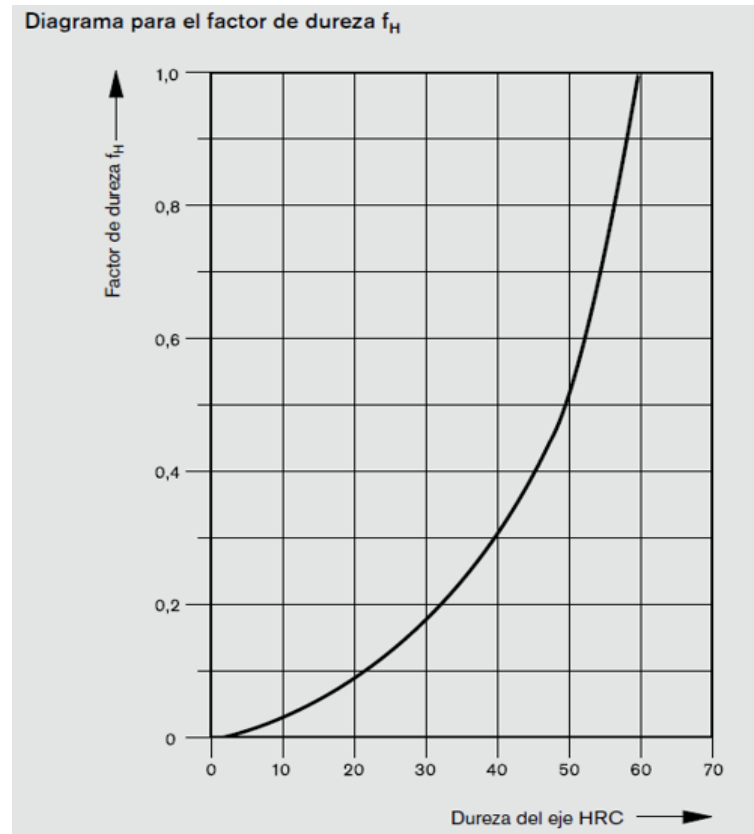


Figura 29: Diagrama del Factor de Dureza, p. 16, [28]

$$f_H = 1$$

La temperatura a la que va a operar el prototipo se encuentra en el rango de 20° y 30° , por lo que el factor de temperatura, de acuerdo a la Figura 30 del catálogo de rodamientos lineales Rexroth Bosch Group, es igual a:

Temperatura del rodamiento ($^\circ\text{C}$)	100	125	150	175	200
Factor de temperatura f_t	1	0,92	0,85	0,77	0,70

Figura 30: Factor de Temperatura, p. 16, [28]

$$f_t = 1$$

Se conoce que la longitud de carrera es igual a la longitud del eje; es decir, $0,2\text{m}$, lo que se considera como carrera larga. Entonces el factor para carrera corta, de acuerdo a la Figura 31 del catálogo de rodamientos lineales Rexroth Bosch Group, es igual a:

Si la carrera en los rodamientos lineales eLINE, Compactos, Super y Segmentarios es menor a tres veces la longitud de los rodamientos, se considera una carrera corta. En este caso, la duración de vida del eje es inferior a la de los rodamientos lineales. Para mayor información, véanse los datos técnicos correspondientes a cada rodamiento lineal. Para una carrera mayor a tres veces la longitud del rodamiento línea, el factor de carrera corta es $f_s = 1$.

Figura 31: Factor para Carrera Corta, p. 16, [28]

$$f_s = 1$$

Finalmente, el factor de vida se obtiene con (43), [28]:

$$L = L_h \cdot 2 \cdot s \cdot n_s \cdot 60 \quad (43)$$

Donde:

L : Vida nominal del rodamiento, en m

L_h : Factor de vida nominal, en horas

s : Longitud de carrera, en m

n_s : Frecuencia de carrera doble, en min^{-1} .

De la Figura 32, del catálogo de rodamientos lineales SKF, se determina que el entrenador se encuentra dentro de la categoría de máquinas usadas por cortos períodos, por lo tanto:

Clase de máquinas	Horas de servicio L_h
Electrodomésticos, aparatos para uso médico	300-3000
Máquinas usadas por cortos períodos, máquinas para la construcción	3000-8000
Ascensores, grúas para mercancías embaladas	8000-12000
Transmisiones por engranajes para uso general, motores eléctricos para uso industrial, machacadoras giratorias	10000-25000
Máquinas para la industria mecánica general, ventiladores, cintas transportadoras, centrífugos	20000-30000
Maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40000-50000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas cableadoras, maquinaria de propulsión para trasatlánticos	60000-100000
Centrales eléctricas, ventiladores y bombas para minas, rodamientos para la línea de eje de trasatlánticos	≈ 100000

Figura 32: Valores orientativos de horas de servicio de los diferentes tipos de máquinas, p. 88, [29]

$$L_h = 3000h$$

Se determina que el prototipo tiene una frecuencia de carrera doble y longitud de carrera equivalentes a:

$$s = 0,2m$$

$$n_s = 2\text{min}^{-1}$$

Reemplazando en (43) se obtiene:

$$L = 3000 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 2 \cdot 60$$

$$L = 144000m$$

De la Figura 33, del catálogo de rodamientos lineales Rexroth Bosch Group, se determina que el factor de vida es:

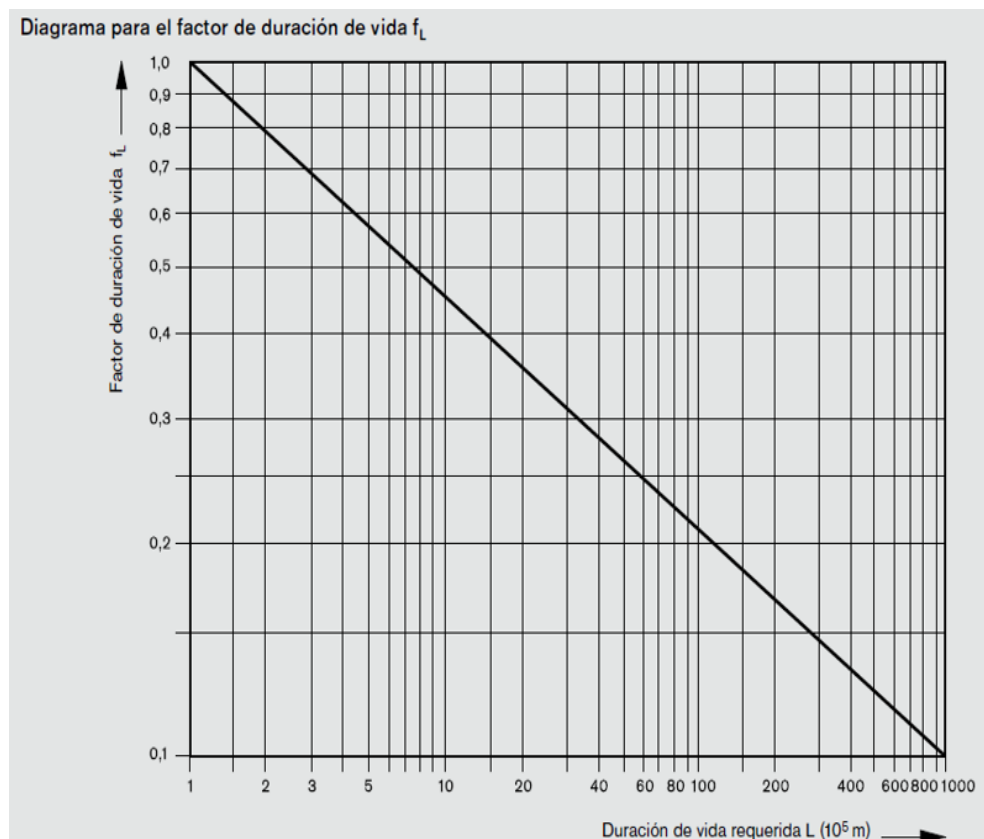


Figura 33: Diagrama para el Factor de Duración de Vida [28]

$$f_L = 0,88$$

Reemplazando estos datos en (41) se obtiene:

$$C_{req} = \frac{3,28}{1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,88}$$

$$C_{req} = 2,88N$$

Se determina que la carga dinámica requerida es igual a 2,88N.

Para la selección de rodamiento lineal se utiliza el catálogo IKO, [30]. En la Figura 34 se presentan opciones de rodamientos lineales estándar, ajustables y de tipo abierto tomando en cuenta el diámetro requerido de los ejes y la carga dinámica requerida.

IKO Linear Bushing (With Seal)

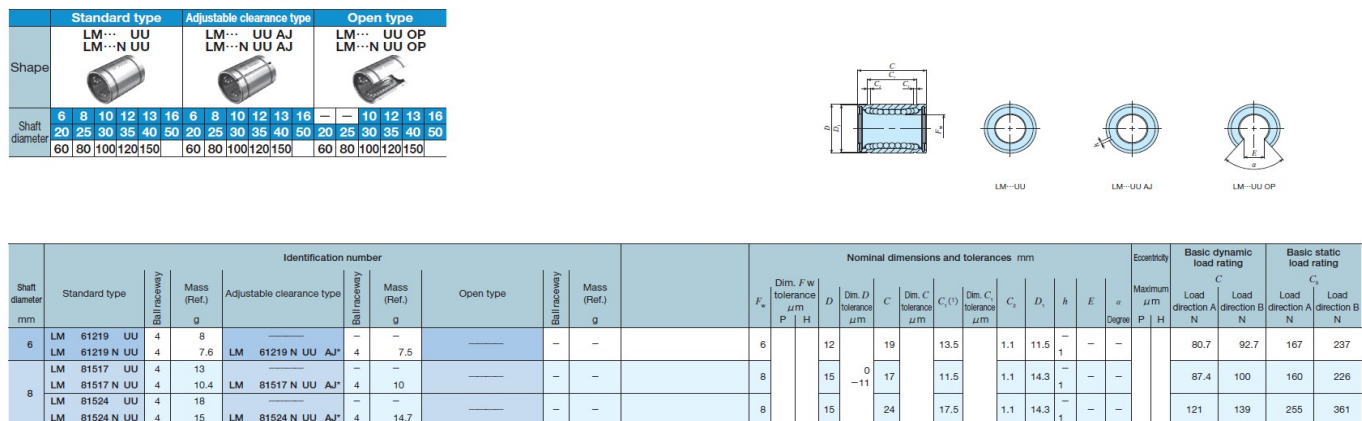


Figura 34: Selección de Rodamientos Lineales [30], pág 91

Se selecciona el rodamiento lineal estándar LM 81517 UU puesto que, se encuentra con mayor facilidad en el mercado.

A continuación, se verifica que el rodamiento seleccionado cumpla con la vida nominal requerida utilizando (44), [28]:

$$L = \left(\frac{C_{din}}{F_m} \cdot f_H \cdot f_t \cdot f_s \right)^3 \cdot 10^5 \tag{44}$$

Donde:

C_{din} : Capacidad de carga dinámica del rodamiento, de la Figura 34, en N.

$$L = \left(\frac{87,4}{3,28} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \right)^3 \cdot 10^5$$

$$L = 18919 \cdot 10^5 \text{m}$$

Se determina que el rodamiento LM 81517 UU cubre la vida nominal requerida de 144000m.

10.1.6. Dimensionamiento del Piñón

A continuación, se procede con el dimensionamiento del piñón para lo cual se realiza un análisis de las cargas aplicadas a este elemento.

10.1.6.1 Análisis de Cargas Aplicadas al Piñón

En la Figura 35 se presenta el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el punto de contacto entre el piñón y la cremallera, las cuales son: fuerza normal, carga a desplazar, fuerzas de rozamiento, debido al contacto del piñón con la cremallera y a los rodamientos con los ejes, y fuerza transmitida del piñón.

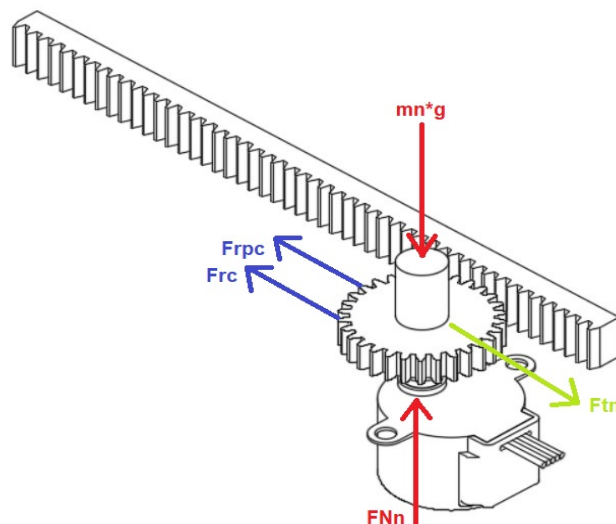


Figura 35: Dimensionamiento del Piñón: Diagrama de Cuerpo Libre

Para obtener m_n se utiliza (26) ya que, al encontrarse el eje y el piñón sobre la tapa de

la base, la masa de los elementos que se encuentran sobre estos es la misma:

$$m_3 = m_n = 0,233 + 0,129 + 0,015 + 0,07$$

$$m_n = 0,447\text{kg}$$

La masa total para el análisis de cargas aplicadas al piñón es de 0,447kg.
Se determinan las fuerzas que actúan sobre el elemento en el eje y con (45):

$$\Sigma Fy_n = 0 \quad (45)$$

$$F_{Nn} = m_n \cdot g$$

Donde:

Fy_n : Sumatoria de fuerzas en el eje y del diagrama de cuerpo libre del piñón, en N

F_{Nn} : Fuerza normal del piñón, en N.

$$F_{Nn} = 0,447 \cdot 9,81 = 4,385\text{N}$$

Se determina que la fuerza normal del piñón es de 4,385N.

Se determinan las fuerzas que actúan sobre el elemento en el eje x con (46):

$$\Sigma Fx_n = 0 \quad (46)$$

$$F_{tn} = F_{rpc} + F_{rc}$$

$$F_{tn} = m_n \cdot g \cdot \mu_{pc} + m_n \cdot g \cdot \mu_l$$

Donde:

Fx_n : Sumatoria de fuerzas en el eje x del diagrama de cuerpo libre del piñón, en N

F_{tn} : Fuerza transmitida del piñón, en N

F_{rpc} : Fuerza de rozamiento del piñón-cremallera, en N

F_{rc} : Fuerza de rozamiento del rodamiento lineal, en N

μ_{pc} Coeficiente de rozamiento del piñón-cremallera, adimensional

μ_l : Coeficiente de rozamiento del rodamiento lineal, adimensional.

Los coeficientes de rozamiento μ_{pc} y μ_l se obtienen de las Figuras 36, [31], y 37, del catálogo de rodamientos lineales IKO.

Tab. 2: Wear of samples of PLA Natural and PLA Graphite 50%

Sample	Wear value	Coefficient of friction
PLA Natural	15.2 $\mu\text{m}/\text{km}$	0.492
PLA Graphite 50%	3.73 $\mu\text{m}/\text{km}$	0.288

Figura 36: Coeficiente de fricción del PLA, p. 4, [31]

Series name	Dynamic friction coefficient μ (*)
Crossed Roller Way	0.0010~0.0030
Linear Slide Unit	0.0010~0.0020
Linear Ball Spline	0.0020~0.0040
Linear Bushing	0.0020~0.0030
Stroke Rotary Bushing	0.0006~0.0012
Roller Way	0.0020~0.0040
Flat Roller Cage	0.0010~0.0030

Note (*) These friction coefficients do not include seal.

Figura 37: Coeficiente de fricción del cojinete lineal, p. 164, [30]

$$F_{tn} = m_n \cdot g (\mu_{pc} + \mu_l)$$

$$F_{tn} = 0,447 \cdot 9,81 (0,492 + 0,002)$$

$$F_{tn} = 2,16\text{N}$$

Se determina que la fuerza transmitida del piñón es de 2,16N.

La fuerza transmitida corregida se determina mediante (47):

$$F_{tcn} = F_{tn} \cdot f_{se} \quad (47)$$

Donde:

F_{tcn} : Fuerza transmitida corregida del piñón, en N.

$$F_{tcn} = 2,16 \cdot 1,5 = 3,24\text{N}$$

Se determina que la fuerza transmitida corregida del piñón es de 3,17N.

10.1.6.2 Sistema de dientes

El sistema de dientes es una norma que especifica las relaciones que involucran la cabeza, raíz, la profundidad de trabajo, espesor del diente y ángulo de presión del piñón, [22].

La tabla de sistemas de dientes estándar para engranes rectos de la Figura 38 contiene las normas más empleadas para engranes rectos de las cuales, de acuerdo a la norma DIN-867 presentada en la Figura 39, se seleccionan los siguientes valores:

$$\phi_p = 20^\circ$$

$$m_p = 1\text{mm}$$

Donde:

ϕ_p : Ángulo de presión del piñón, en $^\circ$

m_p : Módulo del piñón, en mm.

Sistema de dientes	Ángulo de presión ϕ , grados	Cabeza (addendum) a	Raíz (dedendum) b
Profundidad total	20	$1/P_d$ o bien $1m$	$1.25/P_d$ o bien $1.25m$
			$1.35/P_d$ o bien $1.35m$
	$22\frac{1}{2}$	$1/P_d$ o bien $1m$	$1.25/P_d$ o bien $1.25m$
			$1.35/P_d$ o bien $1.35m$
	25	$1/P_d$ o bien $1m$	$1.25/P_d$ o bien $1.25m$
			$1.35/P_d$ o bien $1.35m$
Dientes recortados	20	$0.8/P_d$ o bien $0.8m$	$1/P_d$ o bien $1m$

Paso diametral

Basto	2, $2\frac{1}{4}$, $2\frac{1}{2}$, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16
Fino	20, 24, 32, 40, 48, 64, 80, 96, 120, 150, 200

Módulos

Preferidos	1, 1.25, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50
Siguiente elección	1.125, 1.375, 1.75, 2.25, 2.75, 3.5, 4.5, 5.5, 7, 9, 11, 14, 18, 22, 28, 36, 45

Figura 38: Sistema de dientes estándar para engranes rectos, p. 670, [22]

α_p	Pressure angle	°	4.2 Pressure angle The pressure angle, α_p , is formed by the straight flanks and a line perpendicular to the datum line. The two flanks of a tooth are symmetrical about the midline of the tooth. α_p is equal to 20° for a basic rack tooth profile as specified in this standard.
	Angle given in formulae	rad	
q_{aPo}	Tip rounding radius of tool basic rack tooth profile	mm	
q_{fP}	Fillet radius of basic rack tooth profile	mm	
q_{fP}	Fillet radius coefficient	—	

Continued on pages 2 and 3

Beuth Verlag GmbH, Berlin, has the exclusive right of sale for German Standards (DIN-Normen).
Copyright Deutsches Institut Für Normung E.V.
Provided by IHS under license with DIN
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Sold to: MAGNA INTERNATIONAL INC, 01692188
2008/4/3 18:54:1 GMT

DIN 867 Engl. Price group 5
Sales No. 0105

Figura 39: Perfiles Básicos de Dientes de Cremallera, p. 1, [32]

Debido a los requerimientos de las dimensiones de la estructura del prototipo y al espacio que existe entre el motor que acciona el tornillo de potencia y los eje guía se decide utilizar un diámetro de paso de 17mm.

Para obtener el número de dientes del piñón se utiliza (48), [22]:

$$d_p = N_p \cdot m_p \quad (48)$$

Donde:

d_p : Diámetro de paso del piñón, en mm

N_p : Número de dientes del piñón, adimensional.

$$N_p = \frac{d_p}{m_p}$$

$$N_p = \frac{17}{1} = 17 \text{ dientes}$$

Se determina que el número de dientes es 17.

El addendum y dedendum se calculan con (49) y (50), [22]:

$$a_p = 1 \cdot m_p \quad (49)$$

$$b_p = 1,25 \cdot m_p \quad (50)$$

Donde:

a_p : Addendum del piñón, en mm

b_p : Dedendum del piñón, en mm.

$$a_p = 1 \cdot 1 = 1\text{mm}$$

$$b_p = 1,25 \cdot 1 = 1,25\text{mm}$$

Se determina que el addendum es igual a 1mm y el dedendum 1,25mm.

La altura del diente es igual a la suma del addendum y dedendum y se obtiene con (51), [22]:

$$h_D = a_p + b_p \quad (51)$$

Donde:

h_D : Altura del diente del piñón, en mm.

$$h_D = 1 + 1,25 = 2,25\text{mm}$$

La altura del diente es igual a 2,25mm.

El paso circular se obtiene con (52), [22]:

$$p_{cp} = \pi \cdot m_p \quad (52)$$

Donde:

p_{cp} : Paso circular del piñón, en mm.

$$p_{cp} = 3,14 \cdot 1 = 3,14\text{mm}$$

Se determina que el paso circular es 3,14mm.

Finalmente se obtiene el ancho de cara del piñón aplicando (53), [22]:

$$\sigma_p = \frac{F_{tcn}}{F_p \cdot m_p \cdot Y_p} \quad (53)$$

Donde:

σ_p : Esfuerzo flector del piñón, en MPa

F_p : Ancho de cara del piñón, en m

Y_p : Factor de forma de Lewis, adimensional.

El esfuerzo flector del piñón se determina con (54):

$$\sigma_p = \frac{S_{yPLA}}{f_{se}} \quad (54)$$

$$\sigma_p = \frac{65,46}{1,5} = 43,64\text{MPa}$$

El factor de forma de Lewis se obtiene de la tabla de valores del factor de forma de Lewis Y presentada en la Figura 40:

Número de dientes	Y	Número de dientes	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Rack	0.485

Figura 40: Factor de Lewis, p. 710, [22]

Reemplazando σ_p y Y_p en (53) se obtiene:

$$43,64 \cdot 10^6 = \frac{3,17}{F_p \cdot 1 \cdot 0,303}$$

$$F_p = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{m}$$

El espesor requerido del piñón es de 0,00024mm; sin embargo, se decide utilizar un valor de 6mm para asegurar que no exista flexión en los dientes debido a la carga transmitida.

10.1.6.3 Diseño Final del Mecanismo Piñón-Cremallera

En la Figura 41 se presenta el diseño final del mecanismo piñón-cremallera. El diseño de la cremallera ocupa los mismos parámetros obtenidos para el piñón, a excepción del número de dientes y longitud, los cuales dependen del largo final del prototipo.

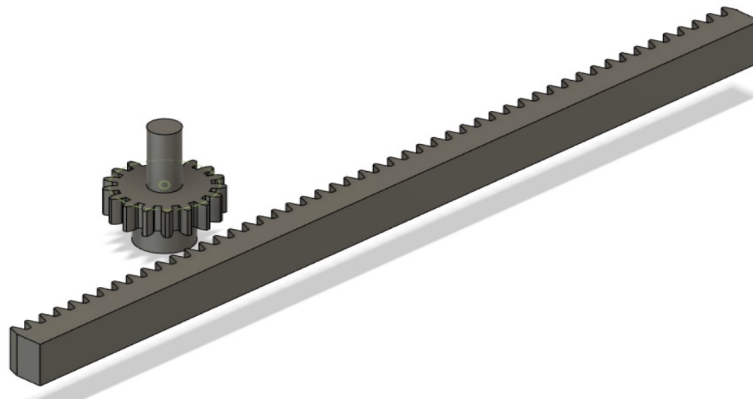


Figura 41: Diseño Final del Mecanismo Piñón-Cremallera

10.1.7. Dimensionamiento de la Base y Plataforma Móvil

La base del prototipo está compuesta de una caja y una tapa, la cual es la encargada de soportar las cargas de la plataforma móvil, junto con los elementos que se encuentran sobre ella, y los ejes guía. Por lo tanto, se realiza el análisis de resistencia y rigidez sobre este elemento para obtener el espesor requerido y el resultado se aplica para la caja y plataforma móvil.

10.1.7.1 Análisis de Cargas Aplicadas a la Tapa

Para obtener la carga total aplicada sobre la tapa se aplica (55):

$$C_{tt} = m_t \cdot g \quad (55)$$

Donde:

C_{tt} : Carga total aplicada sobre la tapa, en N

m_t : Masa total para el análisis de cargas aplicadas a la tapa, en kg.

La masa m_t se obtiene con (56):

$$m_t = m_n + 2(m_{eje}) + m_{pc} + m_{ad} \quad (56)$$

Donde:

m_{eje} : Masa del eje para el análisis de cargas aplicadas a la tapa, en kg

m_{pc} : Masa del mecanismo piñón-cremallera para el análisis de cargas aplicadas a la tapa, en kg

m_{ad} : Masa adicional que se considera para el análisis de cargas aplicadas a la tapa, en kg.

Se obtiene la masa de los ejes y del mecanismo piñón-cremallera mediante los softwares ideaMaker y Fusion360 y se asume una masa adicional de los elementos electrónicos de $m_{ad} = 0,05\text{kg}$. En las Figuras 42 y 43 se presentan estos valores.

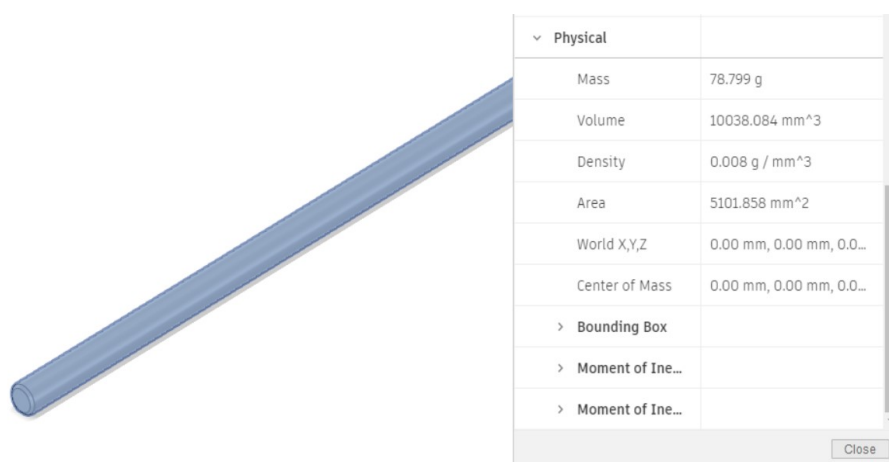


Figura 42: Masa de Eje para el Análisis de Cargas Aplicadas a la Tapa

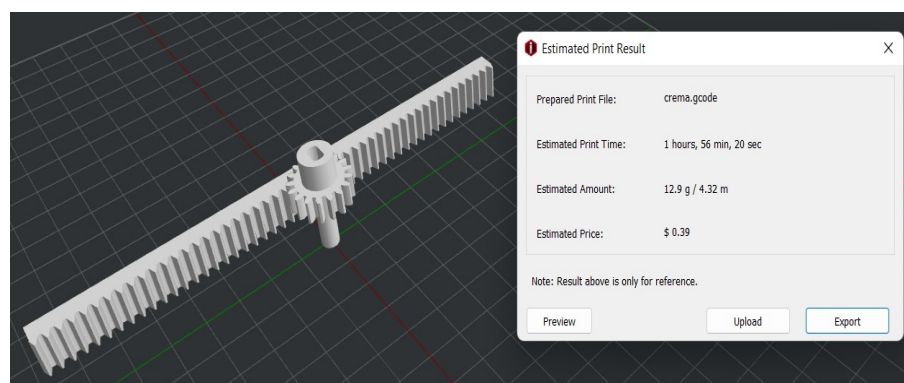


Figura 43: Masa de Mecanismo Piñón-Cremallera para el Análisis de Cargas Aplicadas a la Tapa

Por lo tanto, reemplazando estos valores en (56) se obtiene:

$$m_t = 0,437 + 2(0,079) + 0,013 + 0,05$$

$$m_t = 0,658\text{kg}$$

Reemplazando m_t en (55) se obtiene carga total aplicada sobre la tapa:

$$C_{tt} = 0,658 \cdot 9,81$$

$$C_{tt} = 6,45\text{N}$$

Se determina que la carga total aplicada sobre la tapa es de 6,45N.

Para obtener la carga total corregida aplicada sobre la tapa se aplica (57):

$$C_{tct} = C_{tt} \cdot f_{se} \quad (57)$$

Donde:

C_{tct} : Carga total corregida aplicada sobre la tapa, en N

$$C_{tct} = 6,45 \cdot 1,5 = 9,67\text{N}$$

Se determina que la carga total corregida aplicada sobre la tapa es de 9,67N.

10.1.7.2 Diseño por Resistencia de la Tapa

Tomando en cuenta los requerimientos de las dimensiones de la estructura y de los elementos seleccionados y diseñados anteriormente, se decide diseñar la tapa con las siguientes dimensiones:

$$a_t = 0,19\text{m}$$

$$p_t = 0,16\text{m}$$

Donde:

a_t : Ancho de la tapa, en m

p_t : Profundidad de la tapa, en m.

Se elabora un diagrama de cuerpo libre considerando la carga total corregida que se aplica sobre la tapa. En este caso, se considera una carga puntual en el centro del elemento con dos apoyos en los extremos. Para el análisis se establece al lado de mayor longitud

como el más crítico, debido a que, a medida que la carga se encuentra a mayor distancia de los apoyos, la flexión aumenta. En la Figura 44 se presenta el diagrama de cuerpo libre.

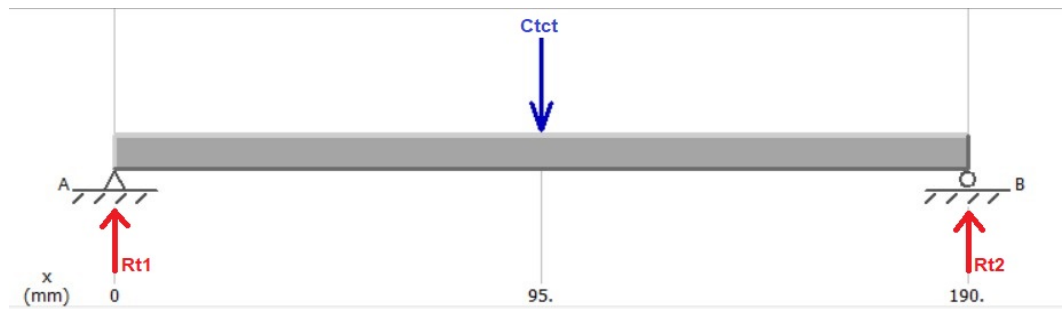


Figura 44: Diseño por Resistencia de la Tapa: Diagrama de Cuerpo Libre

Aplicando (58) y (59), de la Figura 24 se determinan las reacciones y momentos generados:

$$R_{t1} = R_{t2} = \frac{C_{tct}}{2} \quad (58)$$

Donde:

R_{t1} : Fuerza de reacción en el extremo inicial de la tapa, en N

R_{t2} : Fuerza de reacción en el extremo final de la tapa, en N.

$$R_{t1} = R_{t2} = \frac{9,67}{2} = 4,84\text{N}$$

$$\sum M_t \odot (+) = 0$$

$$M_t = \frac{C_{tct}}{2} \cdot \frac{L_v}{2} \quad (59)$$

Donde:

M_t : Momento flector de la sección de la plataforma de la cámara, en Nm.

$$M_t = 4,84 \cdot 0,095$$

$$M_t = 0,459\text{Nm}$$

En la Figura 45 se presenta los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores de la sección de la tapa.

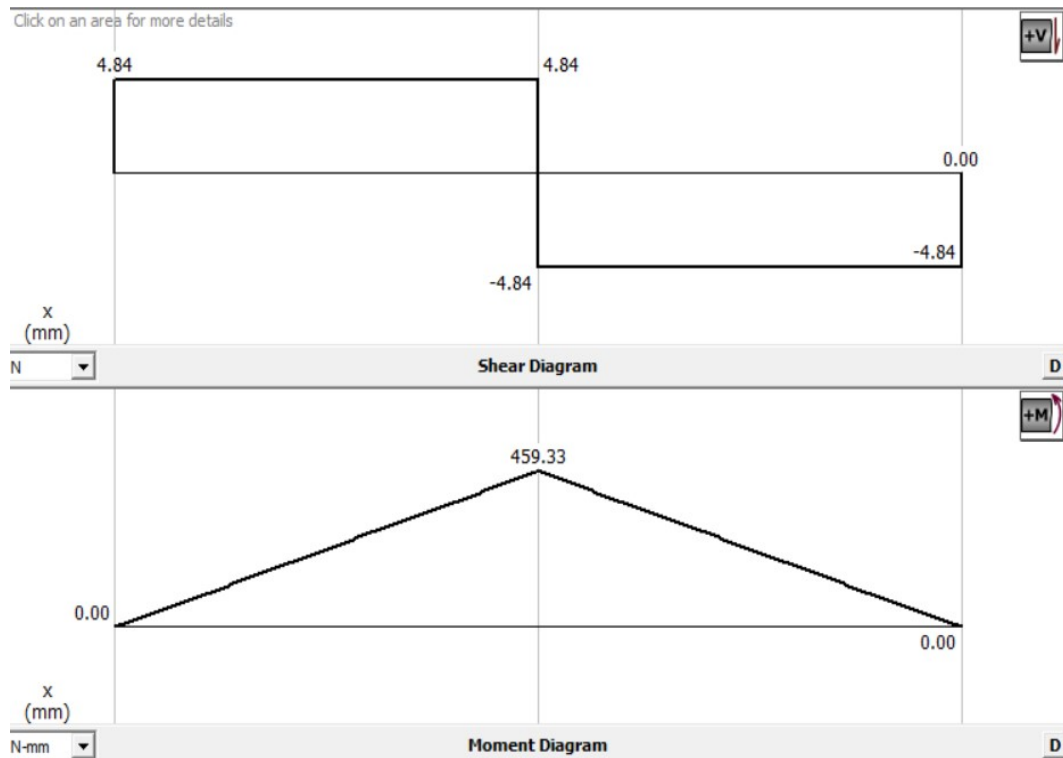


Figura 45: Diseño por Resistencia de la Tapa: Diagramas de Fuerzas Cortantes y Momentos Flectores

A continuación, se determina el espesor de la tapa. En la Figura 46 se presentan algunas variables que se consideran para este cálculo.

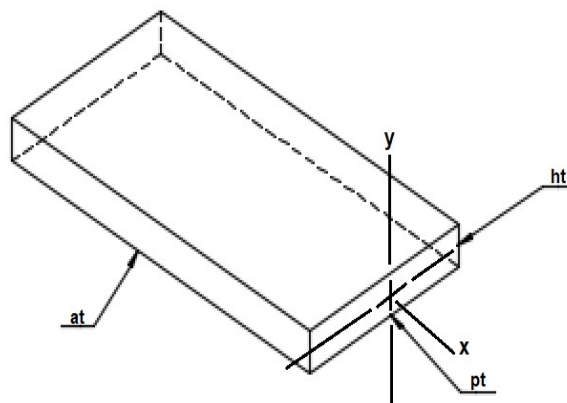


Figura 46: Variables a Considerar para el Cálculo del Espesor de la Tapa

El esfuerzo en flexión se determina con (60), [22]:

$$\sigma_{ft} = \frac{M_t \cdot c}{I_t} \quad (60)$$

$$c = \frac{h_t}{2}$$

Donde:

σ_{ft} : Esfuerzo flector de la tapa, en MPa

I_t : Segundo momento de área de la sección transversal de la tapa, en m^4

h_t : Espesor de la tapa, en m.

El segundo momento de área de la tapa se calcula con (61), [22], debido a su geometría rectangular.

$$I_t = \frac{a_t \cdot h_t^3}{12} \quad (61)$$

Por lo que se obtiene (62):

$$\sigma_{ft} = \frac{M_t \cdot \frac{h_t}{2}}{\frac{a_t \cdot h_t^3}{12}}$$

$$\sigma_{ft} = \frac{6 \cdot M_t}{a_t \cdot h_t^2} \quad (62)$$

En el caso de una sección rectangular, el esfuerzo cortante se determina con (63), de la Figura 8:

$$\tau_t = \frac{3 \cdot V_t}{2 \cdot A_t} \quad (63)$$

Donde:

τ_t : Esfuerzo cortante de la tapa, en Mpa

V_t : Fuerza cortante aplicada a la tapa, en N

A_t : Área de la sección transversal de la tapa, en m^2 .

$$V_t = C_{tct}$$

$$A_t = a_t \cdot h_t$$

Reemplazando V_t y A_t en (63) se tiene (64):

$$\tau_t = \frac{3 \cdot C_{tct}}{2 \cdot a_t \cdot h_t} \quad (64)$$

Finalmente, se obtiene el esfuerzo equivalente presentado en (65), [22].

$$\sigma_{eqt} = \sqrt{\sigma_{ft}^2 + 3\tau_t^2} \quad (65)$$

Donde:

σ_{eqt} : Esfuerzo equivalente de la tapa, en MPa.

En este caso, al no existir un momento flector, el esfuerzo equivalente es igual a (66):

$$\sigma_{eqt} = \sqrt{3\tau_t^2} \quad (66)$$

Aplicando (67), [22], se obtiene el valor de esfuerzo cortante máximo de la tapa:

$$\tau_t = \frac{S_{yPLA}}{2 \cdot f_{se}} \quad (67)$$

$$\tau_t = \frac{65,46}{2 \cdot 1,5} = 21,82 \text{MPa}$$

Reemplazando τ_t en (66) se obtiene el esfuerzo equivalente:

$$\sigma_{eqt} = \sqrt{3(21,82)^2} = 37,79 \text{MPa}$$

Al reemplazar (64) y σ_{eqt} en (66) se obtiene el espesor que requiere la tapa:

$$\sigma_{eqt} = \sqrt{3 \left(\frac{3 \cdot C_{tct}}{2 \cdot a_t \cdot h_t} \right)^2}$$

$$37,79 \cdot 10^6 = \sqrt{3 \left(\frac{3 \cdot 9,67}{2 \cdot 0,19 \cdot h_t} \right)^2}$$

$$h_t = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{m}$$

$$h_t = 0,0035 \text{mm}$$

Se puede observar que el espesor mínimo que la tapa requiere, obtenido por medio del diseño por resistencia, es de 0,0035mm. A continuación, se procede con el diseño por

rigidez.

10.1.7.3 Diseño por Rigidez de la Tapa

En este caso, la existencia de una baja deflexión en la tapa no tiene impacto en el funcionamiento general del prototipo por lo que, el elemento se encuentra dentro de la categoría de partes de máquina en general, de la Figura 10, y su deflexión es causada por flexión puesto que, el elemento tiende a doblarse debido a la carga aplicada, por lo tanto, se ocupa (68) para determinar la deflexión máxima permisible.

$$y_{tmax} = \frac{L_i}{300} \quad (68)$$

Donde:

y_{tmax} : Deflexión máxima permisible de la tapa, en in

L_i : Longitud de la viga, en in.

$$L_i = a_t$$

$$L_i = 0,19\text{m} = 7,48\text{in}$$

$$y_{tmax} = \frac{7,48}{300} = 0,025\text{in}$$

$$y_{tmax} = 0,025\text{in} = 6,35 \cdot 10^{-4}\text{m}$$

De la Figura 24 se toma (69):

$$y_{tmax} = \frac{P \cdot L_v^3}{48 \cdot E_{PLA} \cdot I} \quad (69)$$

$$P = C_{tct}$$

$$L_v = a_t$$

$$I = I_t$$

Reemplazando P , L_v e I en (69) se obtiene (70):

$$y_{tmax} = \frac{C_{tct} \cdot a_t^3}{48 \cdot E_{PLA} \cdot I_t} \quad (70)$$

$$y_{tmax} = \frac{C_{tct} \cdot a_t^3}{48 \cdot E_{PLA} \cdot \frac{a_t \cdot h_t^3}{12}}$$

$$6,35 \cdot 10^{-4} = \frac{9,67 \cdot 0,19^3}{48 \cdot 1,28 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,19 \cdot h_t^3}{12}}$$

$$h_t = 2,73 \cdot 10^{-3} \text{m} \approx 3 \text{mm}$$

El espesor mínimo que la tapa requiere, obtenido por medio del diseño por rigidez, es de 3mm. Se decide utilizar este resultado en el diseño de la base y plataforma móvil puesto que, de esta manera se asegura que no exista una deflexión significativa de los elementos.

10.1.7.4 Análisis de Elementos Finitos de la Tapa

Una vez obtenido el espesor de la plataforma, se realiza un análisis de elementos finitos con el software Fusion 360 aplicando la carga de 9,67N. En la Figura 47 se verifica que la deflexión resultante de 0,585mm difiere un poco de la máxima calculada 0,635mm, esto se debe a las propiedades del material seleccionado para el análisis en el software y al espesor de 3mm en lugar de 2,73mm; sin embargo, indica que el resultado obtenido es correcto.

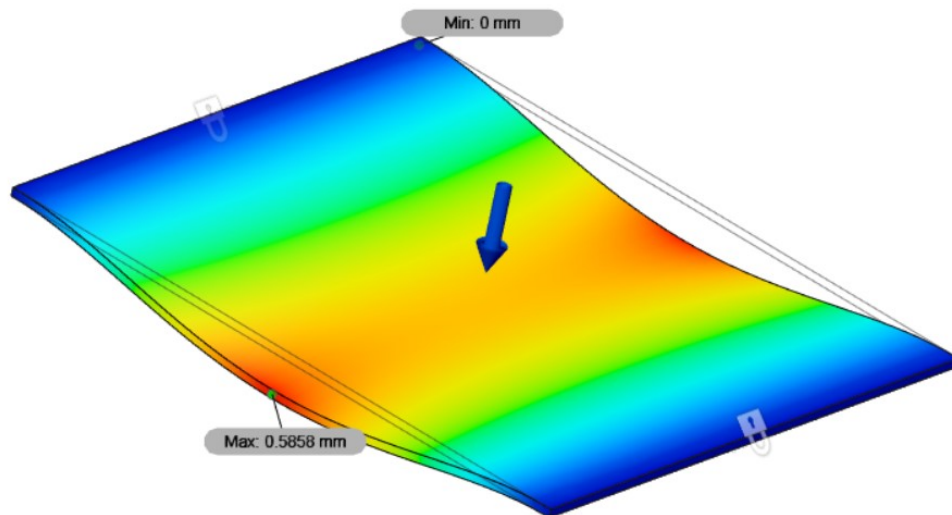


Figura 47: Análisis de Elementos Finitos de la Tapa

10.1.7.5 Diseño Final de la Caja Base, Tapa y Plataforma Móvil

En la Figura 48 se presenta el diseño final de la tapa, la cual tiene las siguientes dimensiones:

$$a_t = 0,19\text{m}$$

$$p_t = 0,16\text{m}$$

$$h_t = 0,003\text{m}$$

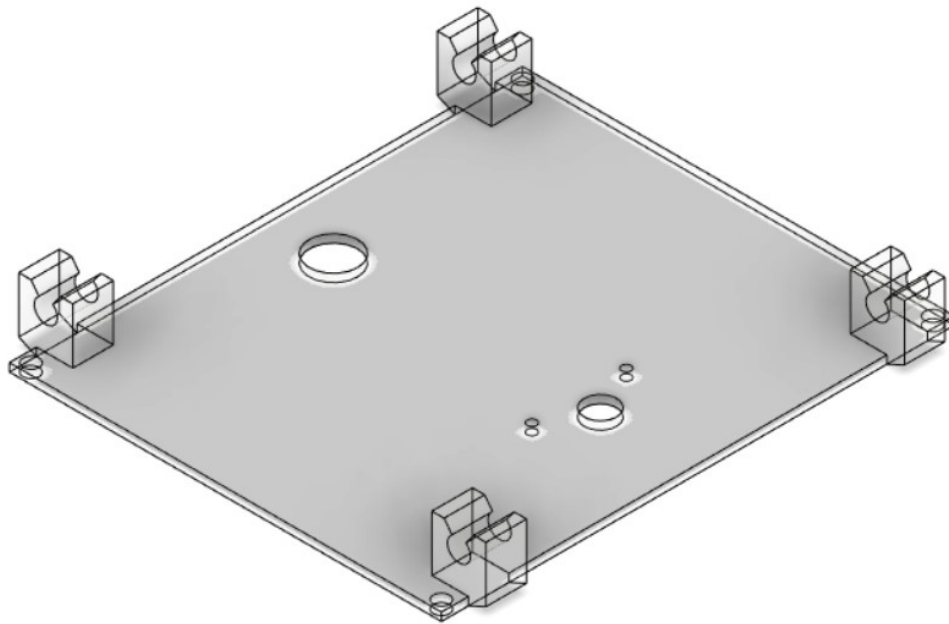


Figura 48: Diseño Final de la Tapa

Adicionalmente, se añade soportes para los ejes en sus esquinas. Las dimensiones de estos se basan en soportes para ejes comerciales que se presentan en la Figura 49, del catálogo del proveedor McMaster-CARR.

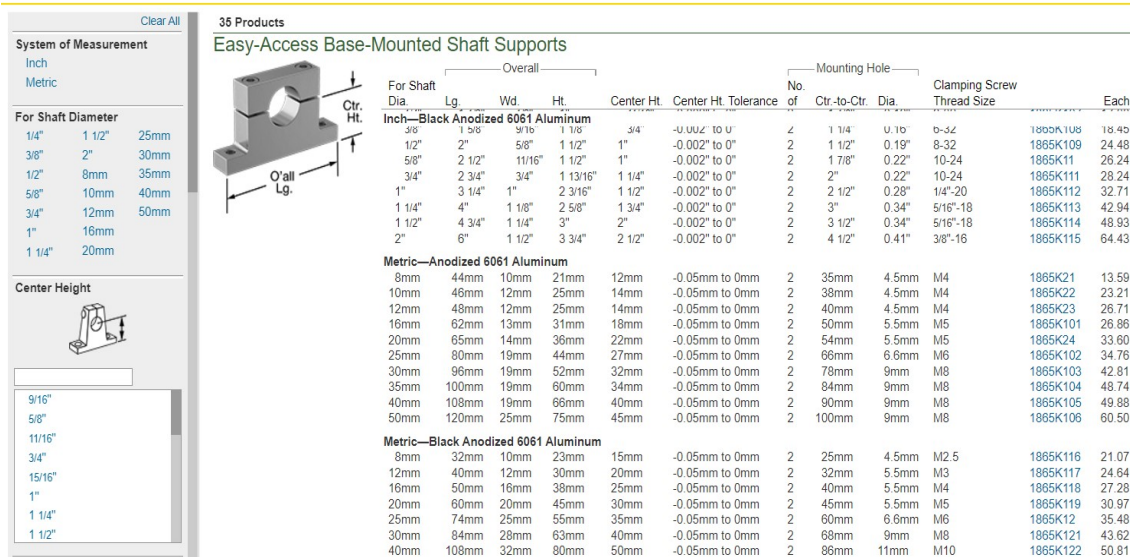


Figura 49: Soporte para Ejes [33]

Se realiza un análisis de elementos finitos sobre el elemento para verificar que soporte la carga. En las Figuras 50 se presentan los resultados.

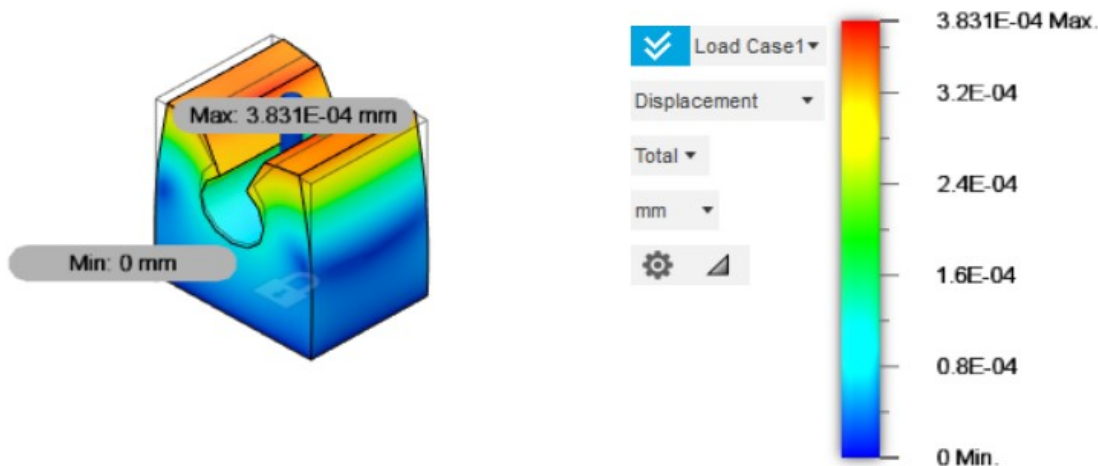


Figura 50: Análisis de Elementos Finitos del Soporte del Eje

En la Figura 51 se presenta el diseño final de la caja base, la cual tiene las siguientes dimensiones:

$$a_b = 0,19m$$

$$p_b = 0,16m$$

$$at_b = 0,05\text{m}$$

$$h_b = 0,003\text{m}$$

Donde:

a_b : Ancho de la caja base, en m

p_b : Profundidad de la caja base, en m

at_b : Altura de la caja base, en m

h_b : Espesor de la caja base, en m.

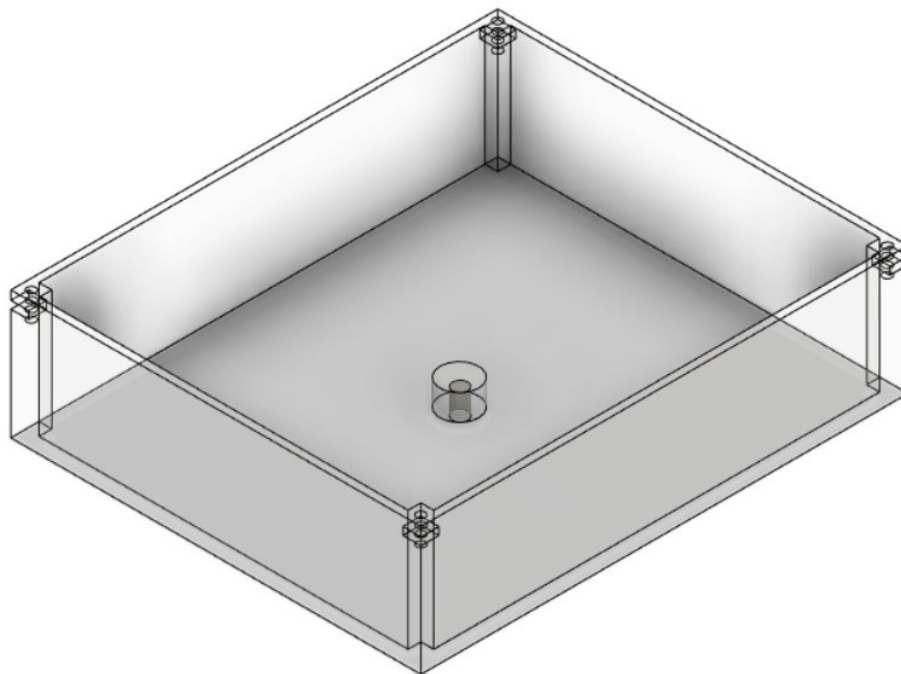


Figura 51: Diseño Final de la Caja Base

En este caso, se agrega un acople para trípode en el exterior de la caja tomando en cuenta el centro de masa del elemento que se puede observar en la Figura 52

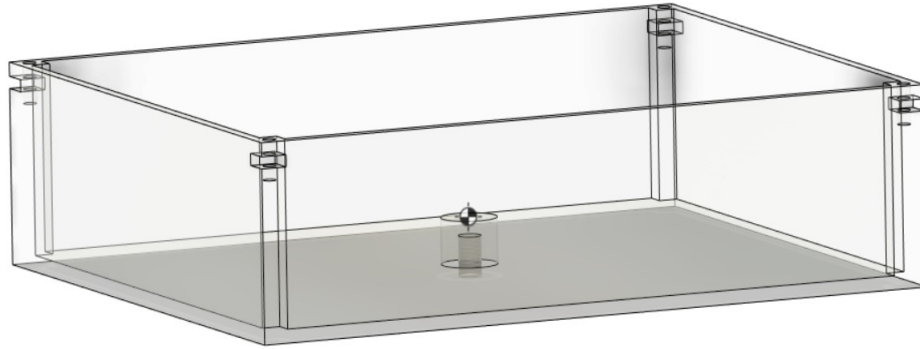


Figura 52: Centro de Masa de la Caja Base

En la Figura 53 se presenta el diseño final de la plataforma móvil, la cual tiene las siguientes dimensiones:

$$a_{plat} = 0,17\text{m}$$

$$p_{plat} = 0,195\text{m}$$

$$h_{plat} = 0,003\text{m}$$

Donde:

a_{plat} : Ancho de la plataforma móvil, en m

p_{plat} : Profundidad de la plataforma móvil, en m

h_{plat} : Profundidad de la plataforma móvil, en m.

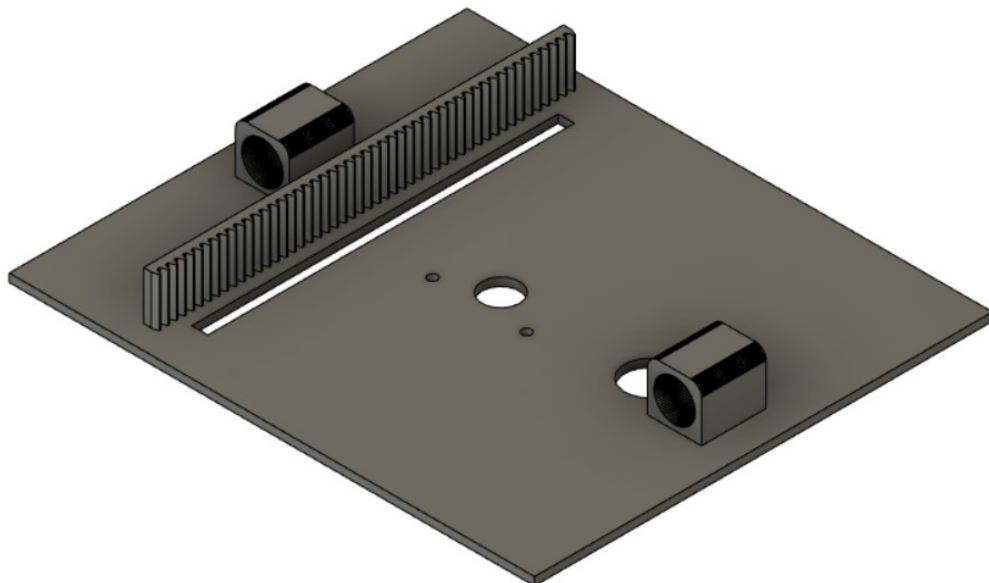


Figura 53: Diseño Final de la Plataforma Móvil

Adicionalmente, se incorpora la cremallera y camisas para los rodamientos lineales.

10.2. Diseño Electrónico

El diseño electrónico consiste en la selección y dimensionamiento de los componentes electrónicos que se van a utilizar en el entrenador inteligente. Estos se pueden observar en el diagrama de bloques presentado en la Figura 54.

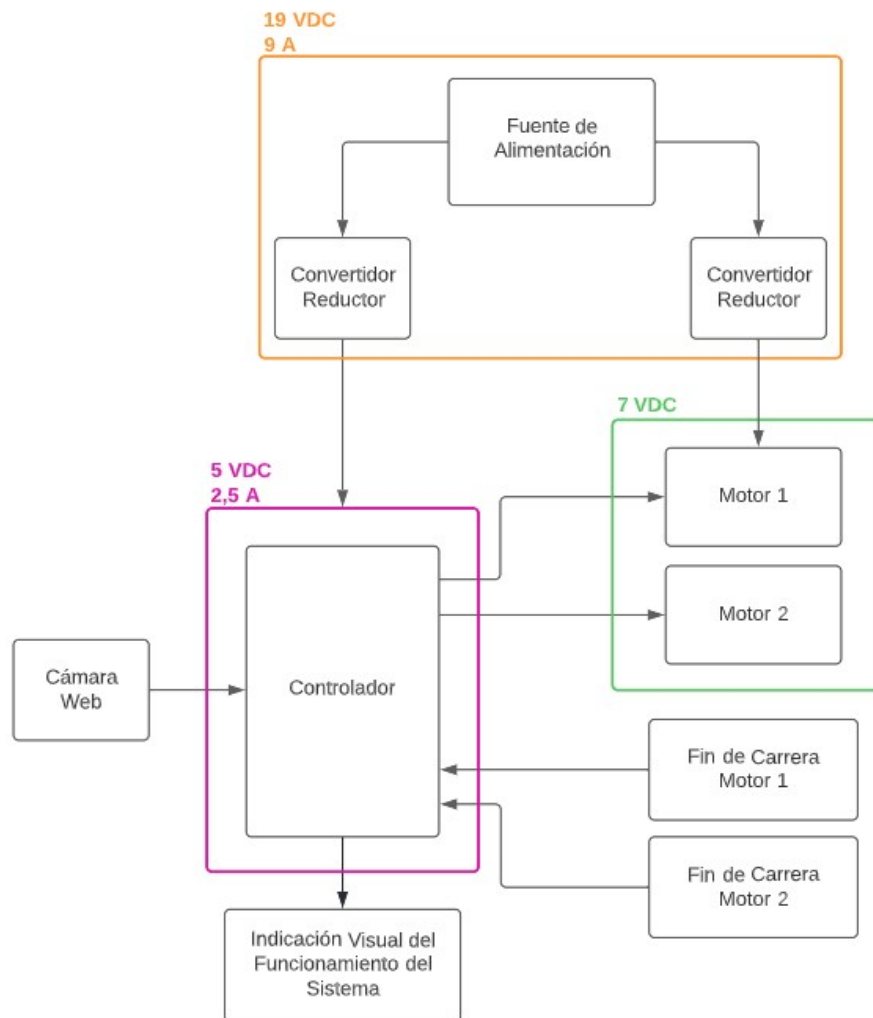


Figura 54: Diagrama de Bloques del Sistema Electrónico

Por lo tanto, en esta sección se selecciona los siguientes componentes:

- Cámara Web.
- Motor.
- Final de carrera.

- Controlador principal.
- Indicador visual del funcionamiento del sistema.
- Fuente de alimentación.
- Regulador de voltaje.

10.2.1. Selección de la Cámara Web

Se requiere que la cámara web tenga una masa de 0,07kg, ya que, es la masa considerada como factor de diseño para el dimensionamiento de la plataforma de la cámara, una resolución mínima de 720p, para captar la imagen del usuario de la mejor manera, y no es necesaria la incorporación de un micrófono. En la Tabla 9 se detallan las cámaras web que se encuentran disponibles en el mercado.

Tabla 9: Selección de Cámara [34]

Modelo	Características
<p data-bbox="336 1245 794 1279">Webcam HD C270 - LOGITECH</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Masa: 75g. ■ Resolución: 720p. ■ Cuadros por segundo: 30fps. ■ Micrófono: Incluye. ■ Conexión: USB. ■ Costo: \$73.

Modelo	Características
<p data-bbox="363 376 769 412">Webcam HD 1080P - VMAX</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="871 360 1066 396">■ Masa: 60g. <li data-bbox="871 450 1177 486">■ Resolución: 1080p. <li data-bbox="871 539 1318 575">■ Cuadros por segundo: 30fps. <li data-bbox="871 629 1171 665">■ Micrófono: Incluye. <li data-bbox="871 719 1129 754">■ Conexión: USB. <li data-bbox="871 808 1069 844">■ Costo: \$29.
<p data-bbox="363 1016 769 1115">Webcam LifeCam HD 3000 - MICROSOFT</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="871 1028 1066 1064">■ Masa: 90g. <li data-bbox="871 1120 1161 1155">■ Resolución: 720p. <li data-bbox="871 1209 1318 1245">■ Cuadros por segundo: 30fps. <li data-bbox="871 1299 1171 1335">■ Micrófono: Incluye. <li data-bbox="871 1388 1129 1424">■ Conexión: USB. <li data-bbox="871 1478 1069 1514">■ Costo: \$49.

Se selecciona la cámara web HD 1080p - VMAX que presenta la mejor resolución, mejor costo y cumple con los parámetros requeridos.

10.2.2. Selección del Motor

Los principales puntos a considerar para la selección del motor son su altura, la cual no debe ser mayor a 25mm, que es el espacio que existe entre la plataforma móvil y la tapa de la base, el control de movimiento y par, debido a que el motor debe tener la capacidad

de mover la plataforma de manera precisa junto con los componentes que se encuentran sobre ella como: cámara, plataforma de la cámara y tornillo de potencia.

Siendo el motor que acciona el mecanismo piñón-cremallera el que soporta la mayor carga, se determina el par que requiere este elemento y el resultado se aplica para el motor que acciona el tornillo de potencia.

Para obtener el par requerido por el piñón se ocupa (71):

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (71)$$

Donde:

M_n : Par requerido por el piñón, en Nm

P_n : Potencia requerida por el piñón, en W

ω_n : Velocidad angular del piñón, en rad/s.

La potencia requerida por el piñón se obtiene mediante (72):

$$P_n = F_{tcn} \cdot v_n \quad (72)$$

Donde:

v_n : Velocidad del piñón, en m/s.

Se conoce que el diámetro del piñón es 0,017m, por lo tanto su circunferencia se obtiene con (73):

$$C_p = 2 \pi \cdot r_p \quad (73)$$

Donde:

C_p : Circunferencia del piñón, en m

r_p : Radio del piñón, en m.

$$C_p = 2 \pi \cdot \frac{d_p}{2}$$

$$C_p = 2 \pi \cdot \frac{0,017}{2} = 0,053\text{m}$$

Se selecciona un tiempo adecuado en el que el piñón recorre esta distancia para que

la cámara tenga oportunidad de detectar al usuario correctamente. Este tiempo es de 5 segundos.

Conociendo la distancia y el tiempo se aplica (74) para obtener la velocidad del piñón.

$$v_n = \frac{C_p}{t_p} \quad (74)$$

Donde:

t_p : Tiempo en recorrer C_p , en s.

$$v_n = \frac{0,053}{5} = 0,01\text{m/s}$$

Se reemplaza v_n en (72) y se obtiene:

$$P_n = 3,17 \cdot 0,01 = 0,0317\text{W}$$

Para calcular la velocidad angular se utiliza (75):

$$\omega_n = \frac{v_n}{r_p} \quad (75)$$

$$\omega_n = \frac{0,01}{\frac{0,017}{2}} = 1,25\text{rad/s}$$

Finalmente, reemplazando P_n y ω_n en (71) se obtiene:

$$M_n = \frac{0,0317}{1,25}$$


$$M_n = 0,025\text{Nm}$$

Se transforma el par obtenido en Nm a gf.cm:

$$M_n = 0,025\text{Nm} = 254,93\text{gf.cm}$$

Por lo que se requiere un par de motor mínimo de 254,93gf.cm. En la Tabla 10 se presentan algunos motores de corriente continua.

Tabla 10: Selección de Motor de Corriente Continua

Motor	Características
<p data-bbox="438 616 694 660">Motoreductor [35]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="869 436 1093 481">■ Voltaje: 3-6V. <li data-bbox="869 526 1364 638">■ Consumo Corriente: 100-130mA. <li data-bbox="869 683 1109 728">■ Control: PWM. <li data-bbox="869 772 1109 817">■ Par: 800gf cm. <li data-bbox="869 862 1077 907">■ Alto: 19mm. <li data-bbox="869 952 1109 996">■ Ancho: 61mm. <li data-bbox="869 1041 1189 1086">■ Profundidad: 22mm. <li data-bbox="869 1131 1125 1176">■ Precisión: Baja.

Motor	Características
<p data-bbox="395 499 738 533">Servomotor MG995 [36]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="874 360 1145 394">■ Voltaje: 4,8-7,2V. <li data-bbox="874 450 1358 539">■ Consumo Corriente: 500-900mA. <li data-bbox="874 600 1114 633">■ Control: PWM. <li data-bbox="874 689 1118 723">■ Par: 8.5kgf cm. <li data-bbox="874 779 1070 813">■ Alto: 26mm. <li data-bbox="874 869 1114 902">■ Ancho: 23mm. <li data-bbox="874 958 1193 992">■ Profundidad: 12mm. <li data-bbox="874 1048 1150 1081">■ Precisión: Media.
<p data-bbox="359 1384 778 1417">Motor a pasos 28BYJ-48 [37]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="874 1272 1114 1305">■ Voltaje: 5-12V. <li data-bbox="874 1361 1310 1395">■ Consumo Corriente: 500mA. <li data-bbox="874 1451 1114 1485">■ Control: PWM. <li data-bbox="874 1541 1114 1574">■ Par: 350gf cm. <li data-bbox="874 1630 1070 1664">■ Alto: 19mm. <li data-bbox="874 1720 1114 1753">■ Ancho: 35mm. <li data-bbox="874 1809 1193 1843">■ Profundidad: 28mm. <li data-bbox="874 1899 1118 1933">■ Precisión: Alta.

Las dimensiones y par de los motores presentados se encuentran dentro del rango acep-

table; sin embargo, se selecciona el motor a pasos 28BYJ-48 el cual, al contar con un paso de $5,625^\circ$ y un reductor de relación $1/64$, lo que equivale a un paso de $0,088^\circ$, es el más preciso.

Para el manejo del motor a pasos se utiliza un driver módulo ULN2003a, el cual está específicamente diseñado para controlar el sentido de giro y la velocidad del motor mediante señales TTL, [38]. En la Figura 55 se presenta una imagen de este módulo.

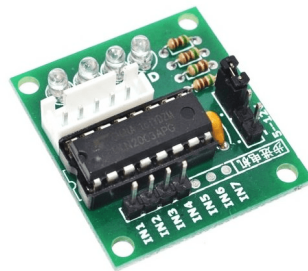


Figura 55: Módulo ULN2003a

10.2.3. Selección del Final de Carrera

Un final de carrera es un interruptor que se sitúa al final del recorrido de un elemento móvil con la finalidad de enviar señales que pueden modificar el estado de un circuito al ser activado.

Dentro del entrenador inteligente se requiere dos finales de carrera para notificar que la plataforma móvil y el tornillo de potencia han completado sus recorridos. En la Tabla 11 se presentan los finales de carrera que se encuentran disponibles en el mercado.

Tabla 11: Selección de Finales de Carrera

Tipo	Características
<p data-bbox="347 524 785 560">Final de Carrera KW11-3Z [39]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="871 439 1230 474">■ Soporte: 250VAC - 3A. <li data-bbox="871 528 1362 622">■ Configuración: NA, NC y conmutador. <li data-bbox="871 680 1102 716">■ Alto: 17,7mm. <li data-bbox="871 770 1139 806">■ Ancho: 19,7mm. <li data-bbox="871 860 1203 896">■ Profundidad: 6,6mm. <li data-bbox="871 949 1251 985">■ Vida útil: >10 000 ciclos.
<p data-bbox="373 1276 759 1312">Micro Final de Carrera [40]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="871 1169 1230 1205">■ Soporte: 250VAC - 5A. <li data-bbox="871 1258 1362 1352">■ Configuración: NA, NC y conmutador. <li data-bbox="871 1411 1086 1447">■ Alto: 6,5mm. <li data-bbox="871 1500 1114 1536">■ Ancho: 15mm. <li data-bbox="871 1590 1203 1626">■ Profundidad: 5,8mm. <li data-bbox="871 1680 1267 1715">■ Vida útil: >100 000 ciclos.

Se selecciona el final de carrera KW11-3Z por su disponibilidad.

10.2.3.1 Activación del Final de Carrera

A continuación, se determina la carga que el final de carrera requiere para ser activado con (76):

$$C_{fc} = m_{fc} \cdot g \quad (76)$$

Donde:

C_{fc} : Carga requerida para la activación del final de carrera, en N

m_{fc} : Masa requerida para la activación del final de carrera, en kg.

La masa requerida para la activación de carrera se obtiene de manera experimental y se presenta en las Figuras 56 y 57.



Figura 56: Masa Requerida para la Activación del Final de Carrera



Figura 57: Prueba de Activación del Final de Carrera

Se transforma el resultado obtenido en oz a kg aplicando (77):

$$1\text{oz} = 0,028\text{kg} \quad (77)$$

$$m_{fc} = 4\text{oz} = 0,113\text{kg}$$

Se determina que la masa requerida para la activación del final de carrera es de 0,133kg. Reemplazando m_{fc} en (76) se obtiene:

$$C_{fc} = 0,113 \cdot 9,81$$

$$C_{fc} = 1,3\text{N}$$

Por lo tanto, la carga requerida para la activación del final de carrera es de 1,3N.

La carga total de la plataforma de la cámara y la cámara web se obtiene con (78):

$$C_{pc} = m_{pc} \cdot g \quad (78)$$

Donde:

C_{pc} : Carga total de la plataforma de la cámara y la cámara web, en N

m_{pc} : Masa total de la plataforma de la cámara y la cámara web, en kg.

Para obtener la masa total de la plataforma de la cámara y la cámara web se aplica (79):

$$m_{pc} = m_{plat} + m_c \quad (79)$$

Donde:

m_{plat} : Masa de la plataforma de la cámara, en kg.

Para obtener la masa de la plataforma se utiliza el software ideaMaker. En la Figura 58 se presenta este valor.

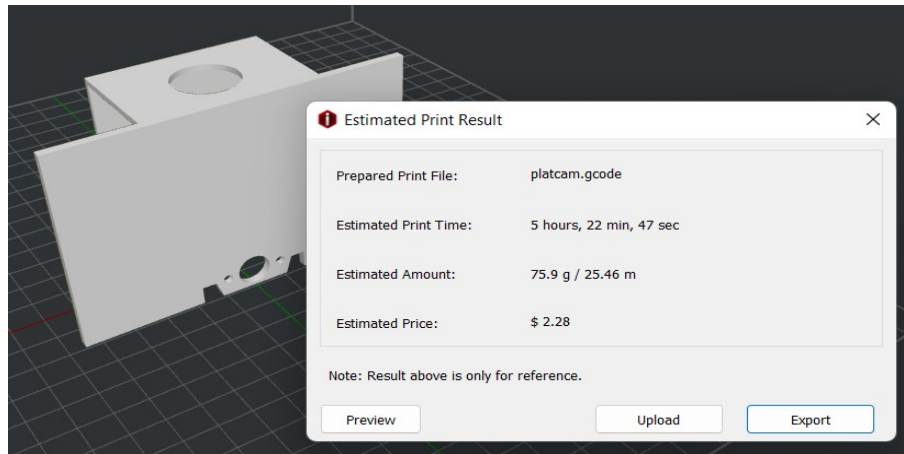


Figura 58: Masa de la Plataforma para la Activación del Final de Carrera

Reemplazando en (79) se obtiene:

$$m_{pc} = 0,076 + 0,07$$

$$m_{pc} = 0,146\text{kg}$$

Por lo tanto, reemplazando en (78) se obtiene que la carga total de la plataforma de la cámara y la cámara web es:

$$C_{pc} = 0,146 \cdot 9,81$$

$$C_{pc} = 1,43\text{N}$$

Se determina que la carga total de la plataforma de la cámara y la cámara web es 1,43N y se conoce que la fuerza transmitida corregida del piñón es 3,42N; de modo que, se puede llevar a cabo la activación de los finales de carrera requeridos en el entrenador inteligente.

10.2.4. Selección del Controlador

La selección del controlador se la realiza tomando en cuenta el número de pines que se requiere y las tareas principales que este debe realizar, que son:

- Pines:
 - 8 de señal para los motores.
 - 2 de interrupción para finales de carrera.

- Controlar el posicionamiento del sistema mediante el uso de motores a paso y finales de carrera.
- Determinar los movimientos que realiza el usuario utilizando una cámara web.
- Desplegar una aplicación web.

En la Tabla 12, se presentan las características de algunos controladores.

Tabla 12: Selección de Controlador

Tarea	Arduino UNO [41]	Raspberry Pi 3 [42]	ESP32 [43]	Proveedor de Hosting
Control de Motores	Pines digitales disponibles	Pines digitales disponibles	Pines digitales disponibles	No disponible
Pines de Interrupción	Disponibles	Disponibles	Disponibles	No disponibles
Stream de Video desde Cámara Web	No es posible sin módulos externos	Posible	Posible	No es posible
Despliegue de Aplicación Web	No es posible	Posible	Posible pero limitado	Posible

Se selecciona la placa Raspberry Pi 3 puesto que, es el controlador que tiene la capacidad de cumplir con todas las tareas requeridas. En la Figura 59 se presenta una imagen de la placa Raspberry Pi 3 modelo B y en la Tabla 13 sus puertos principales.

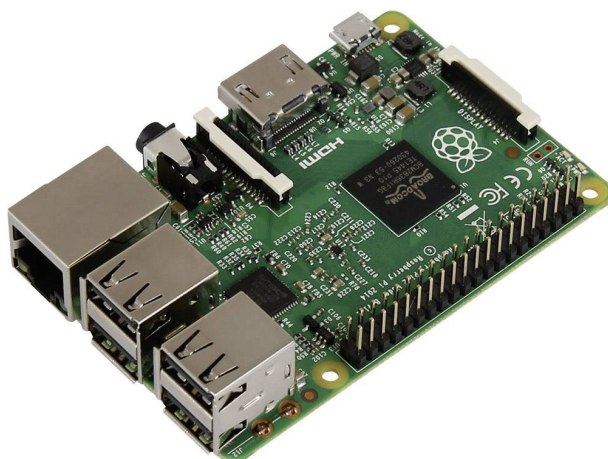


Figura 59: Placa Raspberry Pi 3 Modelo B

Tabla 13: Puertos Raspberry Pi 3 Modelo B [42]

Puerto	Función
40 pines GPIO	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3.3V : 1, 17 ■ 5V : 2, 4 ■ GND : 6, 9, 20, 25, 30, 34, 39 ■ PWM : 12, 32, 33, 35 ■ SPI : 11, 12, 19, 21, 23, 24, 26, 35, 36, 38, 40 ■ I2C : 3, 5, 27, 28 ■ Serial : 8, 10
Micro USB	Fuente de Alimentación : 5V - 2,5A
HDMI	Dispositivos de audio y video
4 puertos USB 2.0	Dispositivos de entrada y salida
CSI	Cámara Raspberry Pi
Micro SD	Sistema operativo

10.2.5. Selección del Indicador Visual del Funcionamiento del Sistema

Se selecciona un diodo LED de color verde como indicador visual del funcionamiento del sistema, el cual se presenta en la Figura 61. Los pines GPIO de la placa Raspberry Pi 3 modelo B solamente pueden suministrar alrededor de 60mA y, dependiendo de pin, entre 3,3V y 5V por lo que, se decide colocar una resistencia como protección de la placa, [44]. En este caso utiliza un pin GPIO de 5V de suministro. Para obtener el valor de la resistencia se aplica (80):

$$R_{led} = \frac{V_f - V_{led}}{I_{led}} \quad (80)$$

Donde:

R_{led} : Resistencia del LED, en Ω

V_f : Voltaje de la fuente, en V

V_{led} : Voltaje del diodo LED verde, en V

I_{led} : Corriente del diodo LED verde, en A.

Los valores de voltaje y corriente del diodo LED se obtienen de la Figura 60.

Tensión del LED (valores típicos):

- Rojo: 1.8 V a 2.2 V
- Naranja: 2.1 V a 2.2 V
- Amarillo: 2.1 V a 2.4 V
- Verde: 2 V a 3.5 V
- Azul: 3.5 V a 3.8 V
- Blanco: 3.6 V

Corriente del LED (valores típicos):

- Común 20mA
- Azules alto brillo: 30mA
- Leds indicadores: 15mA

Figura 60: Voltajes y Corrientes de los Diodos LED [45]

Reemplazando en (80) se obtiene:

$$R_{led} = \frac{5 - 3,5}{0,02}$$

$$R_{led} = 75\Omega$$

Se determina que la resistencia a colocar es de 75Ω y su equivalente comercial es 82Ω .



Figura 61: Diodo LED verde [46]

10.2.6. Selección de la Fuente de Alimentación

Se conoce que el voltaje de alimentación de ambos motores a paso es de entre 5V y 12V y su consumo de corriente 1A; mientras que, la placa Raspberry Pi requiere de 5V y 2,5A. Por lo tanto, se selecciona la fuente de alimentación tomando en cuenta estos valores de voltaje y consumo de corriente; adicionalmente, se considera costos y disponibilidad. En la Tabla 14 se presentan algunas opciones de fuentes de alimentación.

Tabla 14: Fuentes de Alimentación

Fuente de Alimentación	Características
<p data-bbox="427 1377 705 1413">Adaptador 19V [47]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="874 1458 1177 1494">■ Entrada: 100-240V. <li data-bbox="874 1547 1145 1583">■ Salida: 19V - 9A. <li data-bbox="874 1637 1070 1673">■ Costo: \$40.

Fuente de Alimentación	Características
<p>Fuente de Poder Conmutada [48]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Entrada: 110-220V. ■ Salida: 5V - 40A. ■ Costo: \$50.
<p>Adaptador 5V [49]</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Entrada: 110-220V. ■ Salida: 5V - 2A. ■ Costo: \$5.

Tanto la fuente de poder conmutada como el adaptador de 19V cumplen con los requerimientos de corriente; sin embargo, se selecciona el adaptador por su costo. Al obtener una salida de 19V, es necesario el uso de módulos reguladores de voltaje, los cuales reducen la salida de voltaje del adaptador a 5V-1A, para alimentar los motores, y 5V-2,5A, para la placa Raspberry Pi 3. En la Figura 62 se presenta una imagen del módulo convertidor Buck y en la Tabla 15 sus características.

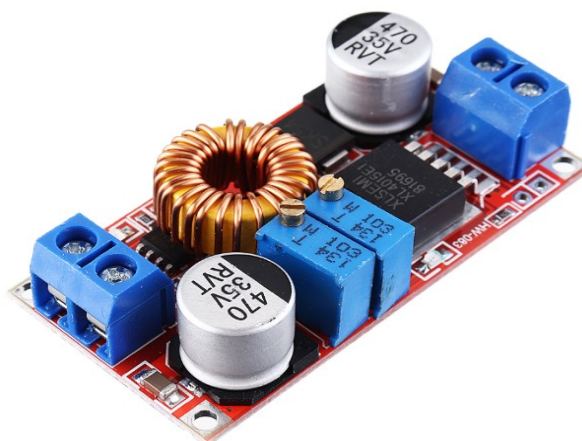


Figura 62: Módulo Convertidor Buck [50]

Tabla 15: Características Módulo Convertidor Buck [51]

Característica	Descripción
Voltaje de Entrada	5V - 32V
Voltaje de Salida	0.8V - 30V
Corriente de Salida Ajustable	Max 5A
Eficiencia de Conversión	95 %

10.2.7. Resumen de Selección de Componentes Electrónicos

A continuación, en la Tabla 16 se presenta un resumen de la selección de los componentes electrónicos.

Tabla 16: Lista de Componentes Electrónicos

Componente Electrónico	Marca/Modelo	Cantidad	Características
Cámara Web	Webcam HD 1080P - VMAX	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Masa: 60g. ■ Resolución: 1080p. ■ Cuadros por segundo: 30fps. ■ Conexión: USB.

Componente Electrónico	Marca/Modelo	Cantidad	Características
Motor a pasos	28BYJ-48	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Voltaje: 5-12V. ■ Consumo Corriente: 500mA. ■ Control: PWM. ■ Par: 350gf.cm.
Driver	Módulo ULN2003a	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Voltaje de Entrada: 5 - 12V.
Fin de Carrera	KW11-3Z	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Soporte: 250VAC - 3A. ■ Configuración: NA, NC y conmutador. ■ Vida útil: >10 000 ciclos.

Componente Electrónico	Marca/Modelo	Cantidad	Características
Controlador	Raspberry Pi 3 modelo B	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ 40 pines GPIO. ■ Micro USB. ■ HDMI. ■ 4 puertos USB 2.0. ■ CSI. ■ Micro SD.
Indicador Visual	Diodo LED verde	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ 3.5V. ■ 20mA.
Fuente de Alimentación	Adaptador 19V	1	<ul style="list-style-type: none"> ■ 19V. ■ 9A.
Regulador de Voltaje	Módulo Convertidor Buck	2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Voltaje de Salida: 0.8V - 30V. ■ Corriente de Salida Ajustable: 5A.

10.3. Programación

En esta sección se describe el desarrollo del programa para el reconocimiento de las posiciones de la primera forma de Taekwon-Do el cual se implementa con Python, por ser el lenguaje de programación más utilizado dentro del área de la Inteligencia Artificial; y la aplicación web, en la que el usuario recibe la retroalimentación respectiva del ejercicio que haya realizado.

10.3.1. Selección de Modelos de Detección y Estimación de Pose Humana

El primer punto es la selección de un modelo de detección de pose humana puesto que, es el principal encargado de detectar los movimientos que realiza el usuario.

Existen tres tipos de modelos para representar el cuerpo humano:

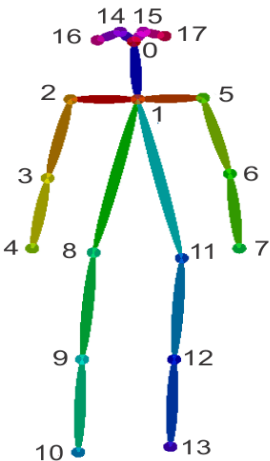
- Modelo cinemático: Se utiliza para la estimación de poses en 2D y en 3D. Este modelo de cuerpo humano flexible e intuitivo incluye un conjunto de posiciones de las articulaciones y orientaciones de las extremidades para representar la estructura del cuerpo humano, [11].
- Modelo basado en contornos: Se utiliza para representar la apariencia y la forma de un cuerpo humano. Por lo general, las partes del cuerpo se representan mediante múltiples rectángulos que se aproximan a los contornos del cuerpo, [11].
- Modelo volumétrico: Se utiliza para la estimación de poses en 3D. Generalmente, son modelos entrenados en un conjunto de datos de alta resolución de cuerpo completo en varias configuraciones para representar la forma del cuerpo humano en 3D, [11].

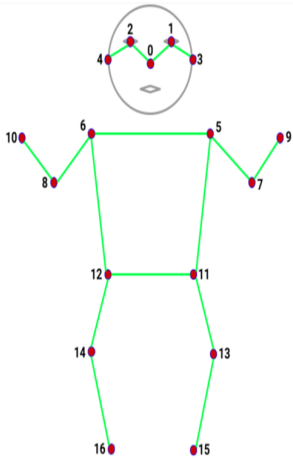
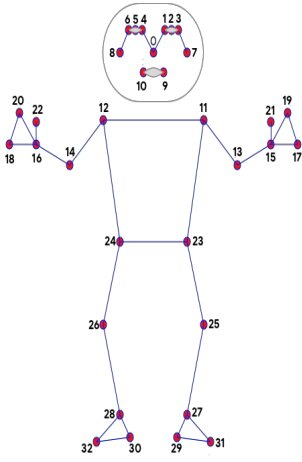
La mayoría de modelos desarrollados han sido entrenados y evaluados utilizando la topología COCO. La topología COCO de Microsoft es un conjunto de datos para la segmentación y detección de objetos, [52] y se utiliza en el entrenamiento, validación y prueba de modelos de detección de pose humana. Contiene más de 200 000 imágenes y 250 000 instancias de personas etiquetadas. Las coordenadas de COCO incluyen 17 puntos clave preentrenados en el torso, brazos, piernas y cara, [53] que se anotan con tres valores (x, y, v) , los valores x e y marcan las coordenadas y v indica la visibilidad del punto, [52]. Sin

embargo, algunos de estos, al localizarse en una determinada parte del tobillo y muñeca, carecen de información de la orientación de las manos y pies lo cual es vital para aplicaciones como fitness y danza, [54].

En la Tabla 17, se describen algunos de los modelos cinemáticos más conocidos.

Tabla 17: Modelos de Estimación de Pose Humana

Modelo	Descripción
<p data-bbox="416 689 568 723">OpenPose</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="798 701 1441 992">■ OpenPose es un modelo de detección de personas en tiempo real que es capaz de detectar el cuerpo humano, pies, manos y los puntos clave faciales conjuntamente, [55]. <li data-bbox="798 1043 1441 1272">■ Tiene algunas características como detecciones de 17 puntos clave de una sola persona en 3D en tiempo real y de varias personas en 2D en tiempo real, [56].

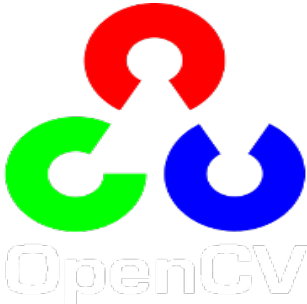
Modelo	Descripción
<p data-bbox="427 365 555 398" style="text-align: center;">MoveNet</p>  <p>The diagram shows a human skeleton with 17 key points numbered 0 to 16. Point 0 is the nose, 1-5 are facial features, 6-10 are the head and neck, 11-13 are the torso and hips, and 14-16 are the legs and feet. The points are connected by green lines to form the skeleton structure.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="798 360 1441 521">■ MoveNet es un modelo de estimación de poses implementado en Tensorflow.js para estimar una sola pose o varias poses. <li data-bbox="798 577 1441 739">■ Esta tecnología no reconoce quién está en una imagen; simplemente estima dónde están los 17 puntos clave del cuerpo. <li data-bbox="798 795 1441 956">■ Puede ejecutarse en dispositivos livianos como el navegador o el dispositivo móvil, [57].
<p data-bbox="416 1267 564 1301" style="text-align: center;">BlazePose</p>  <p>The diagram shows a human skeleton with 33 key points numbered 0 to 32. Points 0-10 are facial features, 11-13 are the torso and hips, 14-16 are the head and neck, 17-22 are the arms and hands, 23-25 are the torso and hips, 26-28 are the legs and feet, and 29-32 are the feet and toes. The points are connected by blue lines to form the skeleton structure.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="798 1167 1441 1391">■ BlazePose es un modelo de detección de pose desarrollado por Google que puede calcular las coordenadas (x, y, z) de 33 puntos clave del esqueleto humano en 2D. <li data-bbox="798 1447 1441 1738">■ Consta de dos modelos de aprendizaje automático: un detector, que obtiene la región de interés de la imagen de entrada; y un estimador, que genera los puntos clave en la región de interés. <li data-bbox="798 1794 1441 1955">■ Este método logra un rendimiento en tiempo real en teléfonos móviles con inferencia de CPU, [58].

BlazePose presenta una ventaja al detectar la región de interés de una imagen, en este caso una persona, y estimar 16 puntos clave adicionales del esqueleto humano en comparación con los otros dos modelos, por lo que, lo hace más adecuado para aplicaciones de fitness. Se decide entonces utilizar BlazePose para esta aplicación.

10.3.2. Selección de Herramientas Orientadas a la Estimación de Pose Humana

En la Tabla 18, se presentan algunas de las bibliotecas y marcos de trabajo más utilizados dentro de las áreas de inteligencia artificial, aprendizaje automático y estimación de pose humana.

Tabla 18: Herramientas orientadas a la Estimación de Pose Humana

Herramienta	Descripción
<p data-bbox="427 1115 555 1149">OpenCV</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="799 1016 1437 1429">■ OpenCV es una biblioteca de código abierto que tiene más de 2500 algoritmos que se pueden aplicar en la detección de rostros, identificación objetos, rastreo de objetos en movimiento, extracción de modelos 3D, seguimiento de las partes del cuerpo, etc. <li data-bbox="799 1491 1437 1653">■ Tiene interfaces C++, Python, Java y MATLAB y es compatible con Windows, Linux, Android y Mac OS, [59].

Herramienta	Descripción
<p data-bbox="448 427 533 459">Pillow</p> 	<ul data-bbox="798 360 1441 929" style="list-style-type: none">■ Pillow es una biblioteca de código abierto para el lenguaje de programación Python para el procesamiento de imágenes.■ Esta biblioteca ofrece varios procedimientos estándar para la manipulación de imágenes como manipulaciones por píxel, manipulación de enmascaramiento y transparencia, filtrado de imágenes y suavizado o búsqueda de bordes, [60].
<p data-bbox="416 1240 568 1272">Tensorflow</p> 	<ul data-bbox="798 1140 1441 1771" style="list-style-type: none">■ Tensorflow de Google es uno de los marcos de trabajo más conocidos que permite a los programadores construir aplicaciones de aprendizaje automático utilizando una variedad de herramientas, y recursos comunitarios.■ Fue diseñado para funcionar en varias CPU o GPU, así como en sistemas operativos móviles e incluye contenedores en Python, C++ y Java, [57].

Herramienta	Descripción
<p data-bbox="416 427 564 456">Scikitlearn</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="799 360 1437 707">■ Scikit-learn es una biblioteca para Python de código abierto que incluye una gran variedad de herramientas útiles como modelos de clasificación, regresión y agrupamiento, herramientas de preprocesamiento y evaluación. <li data-bbox="799 763 1437 931">■ Scikit-learn es extremadamente adaptable y se usa principalmente en aplicaciones de aprendizaje automático, [61].
<p data-bbox="416 1323 564 1352">MediaPipe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="799 1133 1437 1301">■ MediaPipe de Google es un marco de trabajo de código abierto para crear canalizaciones de aprendizaje automático. <li data-bbox="799 1357 1437 1525">■ Cuenta con dieciséis soluciones desde detección de cara, coloración de cabello, hasta seguimiento de manos y poses. <li data-bbox="799 1581 1437 1794">■ Este marco multiplataforma funciona en Android, Windows, Mac OS y dispositivos integrados como Raspberry Pi y Jetson Nano. <li data-bbox="799 1850 1437 2018">■ El código está escrito en C++ y Java, pero se puede implementar fácilmente en cualquier plataforma, [62].

Herramienta	Descripción
-------------	-------------

Inicialmente, se selecciona OpenCV para el desarrollo del programa de detección de pose humana, que es una de las bibliotecas más utilizadas en el área de inteligencia artificial, es compatible con el lenguaje de programación Python, contiene varios algoritmos que se pueden utilizar para la detección de pose humana y su manejo es sencillo.

Adicionalmente, se selecciona MediaPipe puesto que, es un marco de trabajo multiplataforma que presenta varias soluciones de aprendizaje automático, entre ellas el seguimiento de pose, permite el desarrollo de programas sin la necesidad de profundizar en los algoritmos que utiliza y es compatible con Raspberry Pi.

10.3.3. Desarrollo de la Aplicación Web

A continuación, se presenta el desarrollo de cada una de las partes que conforman la aplicación web.

10.3.3.1 Arquitectura de Software

La arquitectura de software, dentro del desarrollo web, es una estructura o método que proporciona agilidad al momento de diseñar las diferentes funcionalidades que va a tener la aplicación web, [63].

10.3.3.1.1. Patrones de Arquitectura de Software

Un patrón de arquitectura es un paquete de elementos esenciales utilizados en una arquitectura de software. El más común es el de capas, donde los componentes están organizados de tal manera que cada uno se ocupa solamente de la lógica perteneciente a esa capa, [63].

Por lo general, un patrón de arquitectura en capas consiste en:

- **Capa de Presentación:** Es la interfaz de la aplicación en la que el usuario puede interactuar, en otras palabras el frontend. Esta capa se puede ejecutar en un navegador web y se suele desarrollar en HTML, CSS y JavaScript.

- **Capa de Aplicación:** También conocida como backend, donde se procesa la información de la capa anterior junto con la información de la capa de datos. Se puede desarrollar utilizando Python, Java, PHP o Ruby.
- **Capa de Datos:** Almacena la información procesada por la aplicación. Puede ser un sistema de gestión de base de datos relacional como PostgreSQL, MySQL, Oracle, o un servidor de bases de datos no relacional como CouchDB o MongoDB, [64].

En la Figura 63 se presenta un diagrama de la ejecución de este patrón de arquitectura.

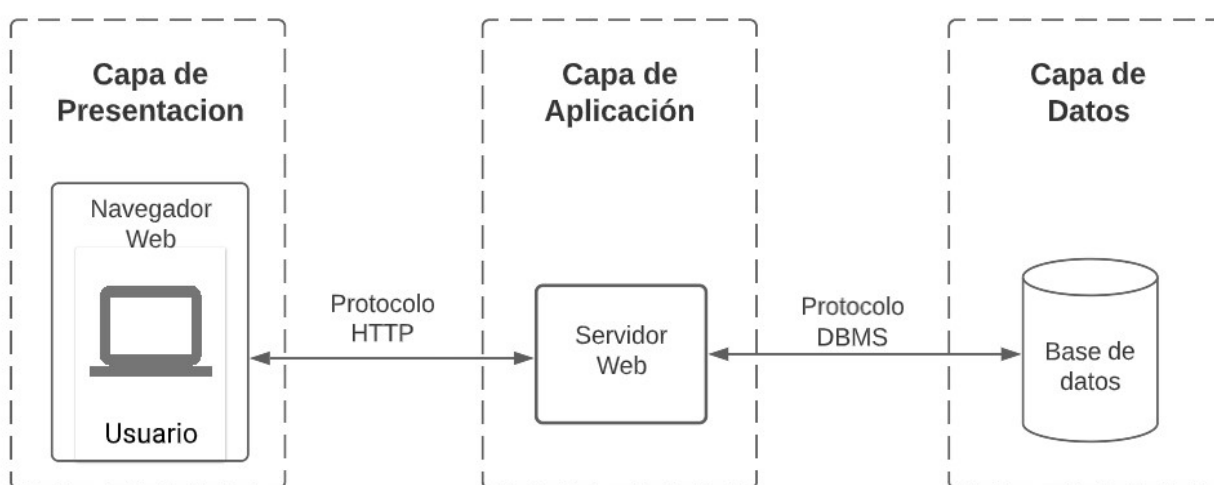


Figura 63: Patrón de Arquitectura de Software en Capas

10.3.3.2 Capa de Presentación

La capa de presentación, o frontend, es todo con lo que el usuario puede interactuar. Esta incluye los estilos de texto, imágenes, gráficos, tablas, botones y menú de navegación, [65].

HTML, CSS y JavaScript son los lenguajes más utilizados para el desarrollo de frontend ya que, permiten implementar la estructura, diseño, comportamiento y contenido de lo que se ve en las pantallas de la aplicación web.

Angular y React son dos de los marcos de trabajo para desarrollo frontend más populares. Sus características se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Marcos de Trabajo para Desarrollo Frontend [65]

Marco de Trabajo	Características
<p data-bbox="432 454 549 488">Angular</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="759 439 1398 539">■ Angular es un marco de trabajo desarrollado y mantenido por Google. <li data-bbox="759 595 1398 752">■ Es un marco más ordenado que proporciona mejores formas de desarrollar aplicaciones web y móviles. <li data-bbox="759 808 1398 909">■ Extiende los atributos HTML con Directivas y los datos están vinculados con HTML.
<p data-bbox="448 1283 536 1317">React</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="759 1122 1398 1223">■ React es una biblioteca de JavaScript mantenida por Facebook. <li data-bbox="759 1279 1398 1559">■ Utiliza un concepto de desarrollo web conocido como componentes modulares, haciéndolos altamente reutilizables y contribuyendo a un tiempo de desarrollo más rápido. <li data-bbox="759 1615 1398 1839">■ Se utiliza en el desarrollo móvil, ya que permite a los desarrolladores reutilizar la sección lógica de una aplicación simplemente cambiando la vista.

Para el desarrollo de la capa de presentación se utiliza Angular, por ser un marco de trabajo más ordenado y permitir tener un mayor control de la estructura.

A continuación, se detalla el contenido e interacción de las páginas de la aplicación web.

10.3.3.2.1. Página de Registro e Inicio de Sesión

En este caso, si el usuario se encuentra registrado ingresa su nombre de usuario y contraseña; de lo contrario, en el formulario de registro debe ingresar sus datos. En las Figuras 64 y 65 se presenta el diagrama e imagen de esta página.

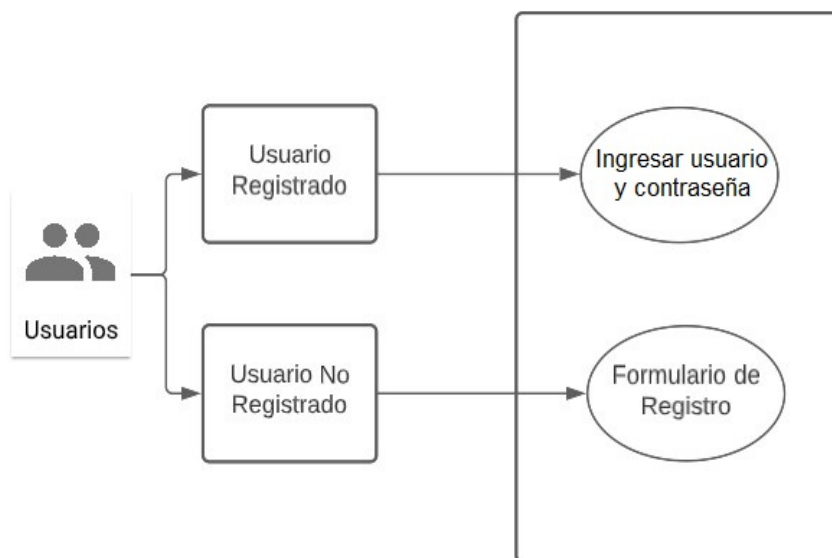


Figura 64: Esquema del Sistema de Registro e Inicio de Sesión

Inicia sesión o regístrate para acceder

Nombre de Usuario

Contraseña

Figura 65: Página de Registro e Inicio de Sesión

10.3.3.2.2. Cierre de Sesión

El usuario puede realizar el cierre de sesión mediante un botón que se encuentra en la esquina superior derecha de la barra de la aplicación. En las Figuras 66 y 67 se presenta el diagrama e imagen del botón.

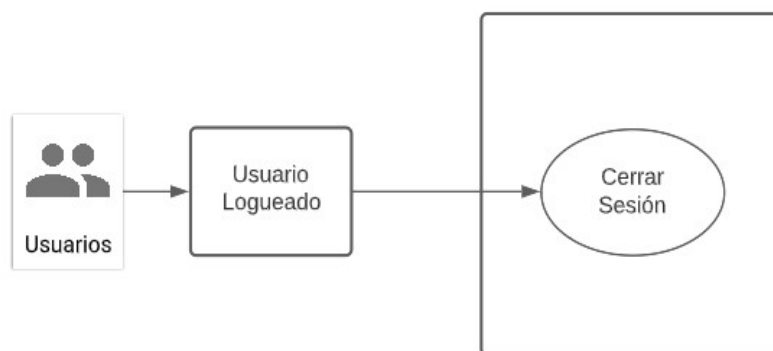


Figura 66: Esquema del Proceso de Cierre de Sesión

Poomsae	Pose	Ultima Práctica	Mejor Promedio
> Poomsae 1	Oen Arae Makki	27 Aug 2022 02:24 am	100 ★★★★★
> Poomsae 1	Oen Olgul Makki	27 Aug 2022 12:38 am	95 ★★★★★
> Poomsae 1	Oreun Arae Makki	24 Aug 2022 10:52 pm	92.5 ★★★★★
> Poomsae 1	Oen Momtong Makki	27 Aug 2022 07:00 pm	40 ★★☆☆☆

Figura 67: Botón de Cierre de Sesión

10.3.3.2.3. Página de Inicio

Una vez que el usuario ha iniciado sesión, puede dirigirse a la pestaña de acerca, en la que se puede observar una introducción del Taekwon-Do, a la de historial, en la que observa el nombre de la posición practicada, fecha de la última práctica, calificación promedio y observaciones, y a la de nueva práctica. En las Figuras 68 y 69 se presenta el diagrama e imagen de esta página.

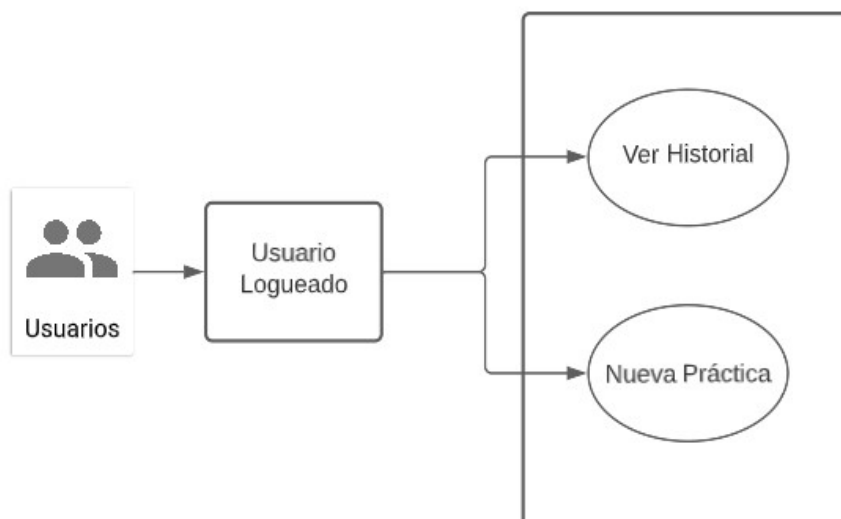


Figura 68: Esquema del Proceso de Inicio de Sesión del Sistema

Poomsae	Pose	Ultima Práctica	Mejor Promedio
> Poomsae 1	Oen Arae Makki	27 Aug 2022 02:24 am	100 ★★★★★
> Poomsae 1	Oen Olgul Makki	27 Aug 2022 12:38 am	95 ★★★★★
> Poomsae 1	Oreun Arae Makki	24 Aug 2022 10:52 pm	92.5 ★★★★★
> Poomsae 1	Oen Momtong Makki	27 Aug 2022 07:00 pm	40 ★★☆☆☆

Figura 69: Página de Inicio

10.3.3.2.4. Proceso de Entrenamiento

Al seleccionar la pestaña de nueva práctica en la página de inicio, se presenta al usuario logueado todas las posiciones que puede realizar. Cuando selecciona una posición, la evaluación de esta empieza y una vez que ha terminado se despliega una ventana en la que el usuario puede decidir reintentar la práctica o terminarla. En las Figuras 70, 71, 72 y 73 se presenta el diagrama e imágenes de este proceso.

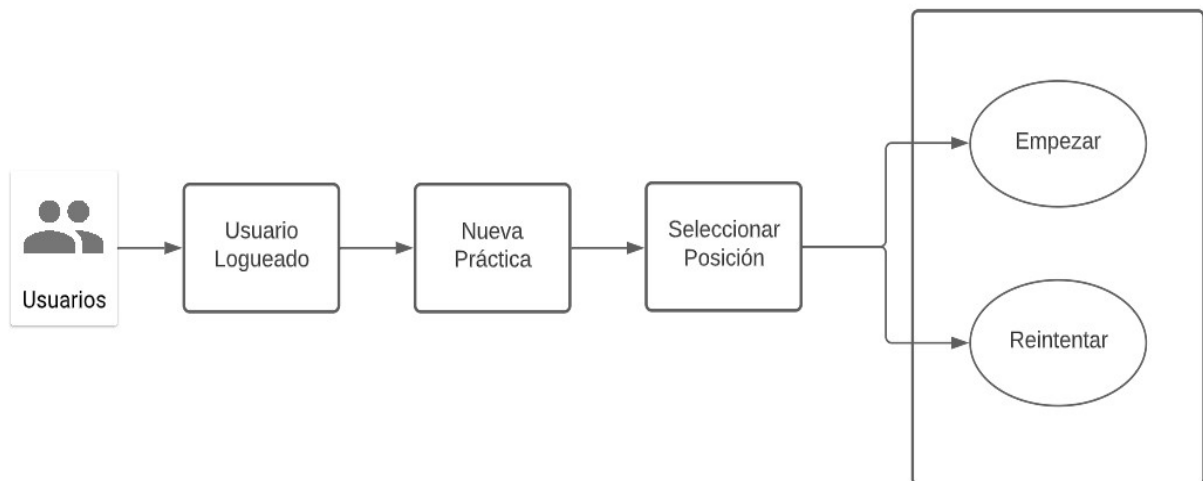


Figura 70: Esquema del Proceso de Ejecución del Sistema de Entrenamiento

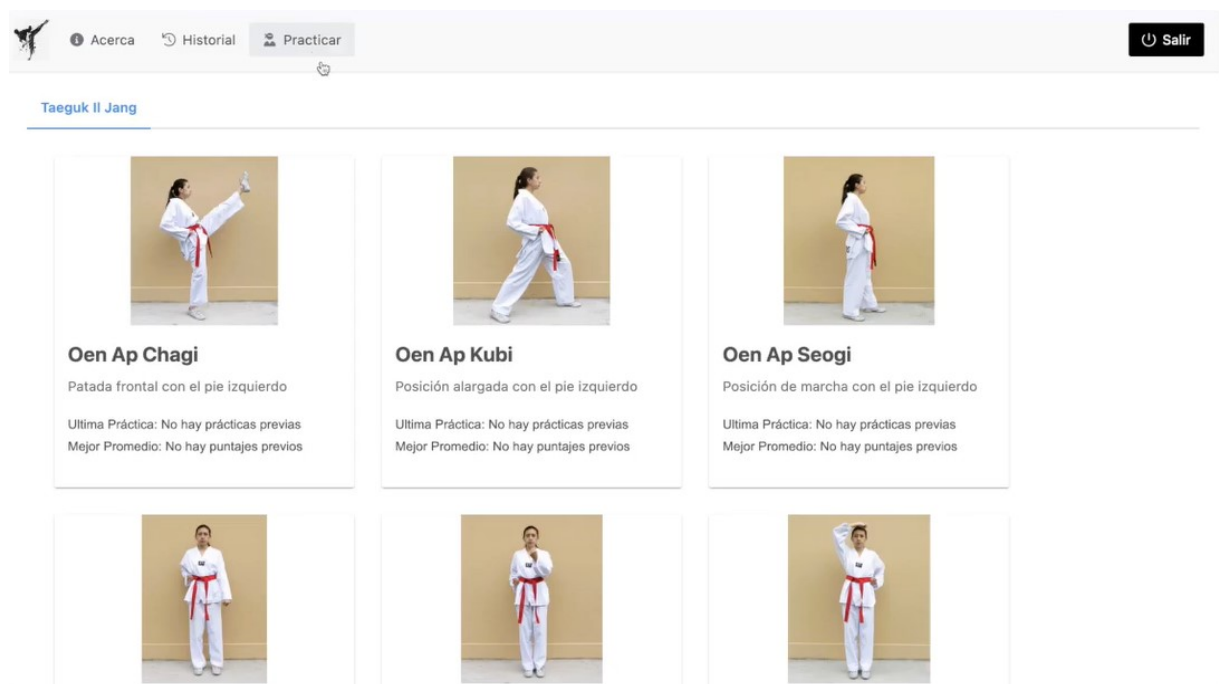


Figura 71: Página de Selección de Posición

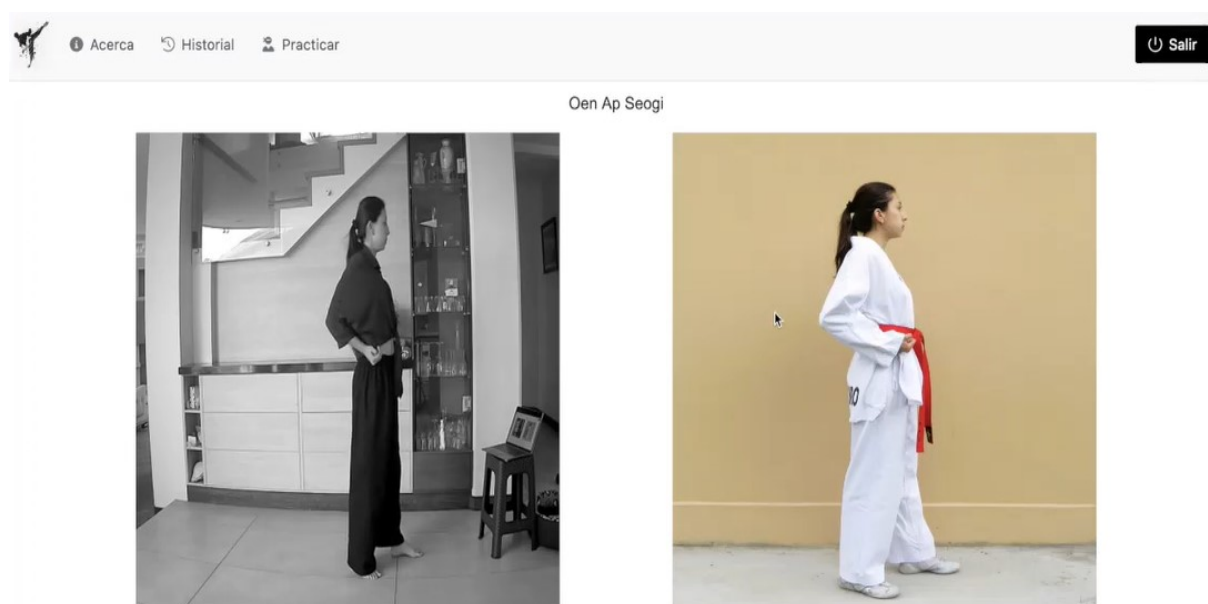


Figura 72: Página de Práctica

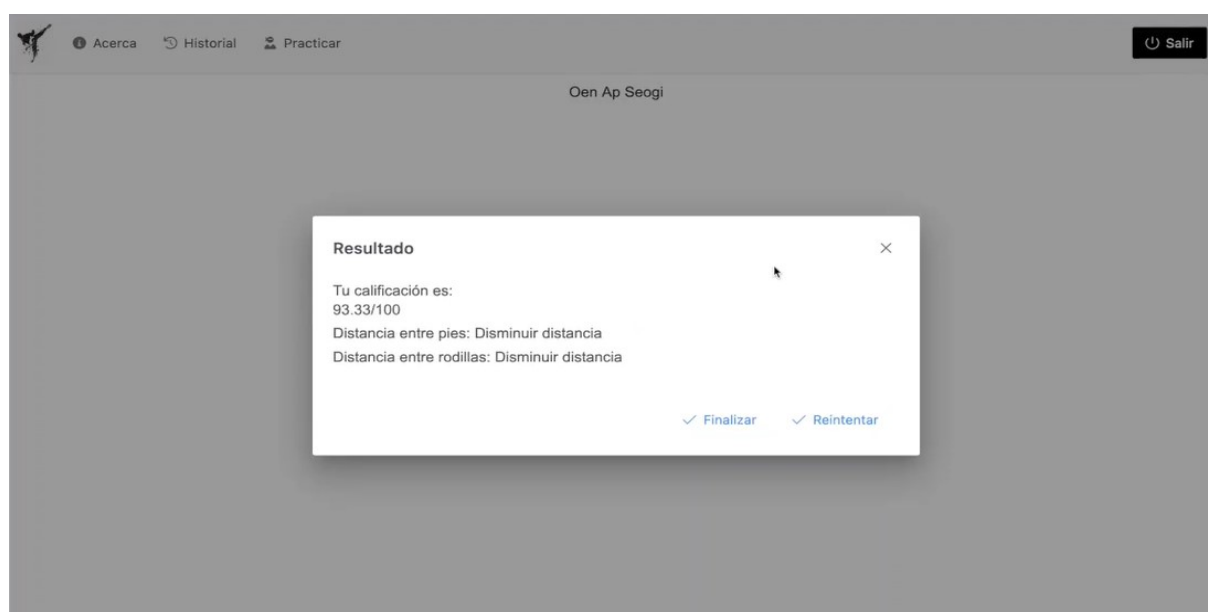


Figura 73: Ventana de Reintento o Finalización de Práctica

10.3.3.3 Capa de Aplicación

La capa de aplicación, o backend, se refiere al proceso de desarrollo del servidor y procesos en la nube del sitio web. Es el encargado de los paquetes de aplicaciones, librerías y componentes del sistema, [65].

Existen varios marcos de trabajo para desarrollar backend, al haber seleccionado Python

como el lenguaje de programación a utilizar, se tienen dos opciones de marco de trabajo que son los más utilizados. Estos se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20: Marcos de Trabajo para Desarrollo Backend [66]

Marco de Trabajo	Características
<p data-bbox="451 591 531 622">Flask</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="759 573 1401 674">■ Es un marco de trabajo de código abierto que está escrito en Python. <li data-bbox="759 725 1401 826">■ Es fácil de aprender y su implementación es sencilla. <li data-bbox="759 878 1401 1043">■ Es utilizado en las principales empresas tecnológicas, como: Netflix, Reddit, Mozilla, etc.
<p data-bbox="440 1368 544 1400">Django</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="759 1252 1401 1352">■ Es un marco de trabajo construido en Python. <li data-bbox="759 1404 1401 1628">■ Es de código abierto, accesible y sigue el patrón MVC (controlador de vista de modelo) para el desarrollo de frontend y backend. <li data-bbox="759 1680 1401 1845">■ Ofrece funciones de seguridad, servidores livianos para desarrollo y pruebas, base de datos integrada, etc. <li data-bbox="759 1897 1401 1998">■ Sitios populares como Pinterest, Instagram, etc., se ejecutan en Django.

En este caso, se decide utilizar Flask puesto que es capaz de levantar un servidor de backend de manera sencilla; mientras que Django, al estar pensado para el desarrollo completo de backend y frontend, es un marco de trabajo con herramientas más complejas.

10.3.3.3.1. Flujos de Funciones de la Capa de Aplicación

A continuación, se presentan las funciones responsables de controlar las peticiones y respuestas dentro del backend.

El programa principal está compuesto de diferentes funciones como: inicio de sesión, registro de un nuevo usuario, obtener la lista de posiciones, inicio del entrenamiento, posicionamiento de la cámara, transmisión de video, evaluación y finalización del entrenamiento. En la Figura 74, se puede observar el diagrama de flujo del programa principal.

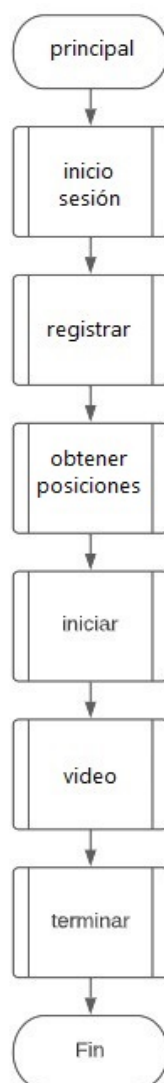


Figura 74: Diagrama de Flujo del Programa Principal

La función inicio sesión es la encargada de permitir el ingreso a la aplicación web. Para esto, primero se obtiene los datos del nombre de usuario y contraseña que se han ingresado en la página de registro e ingreso. En la base de datos se busca el nombre de usuario registrado y se adquiere la contraseña que le corresponde. Se verifica que ambas contraseñas sean iguales y, dependiendo del resultado, se envía un mensaje a la capa de presentación que le permite o no el ingreso al usuario. En la Figura 75 se puede observar el diagrama de flujo de esta función.

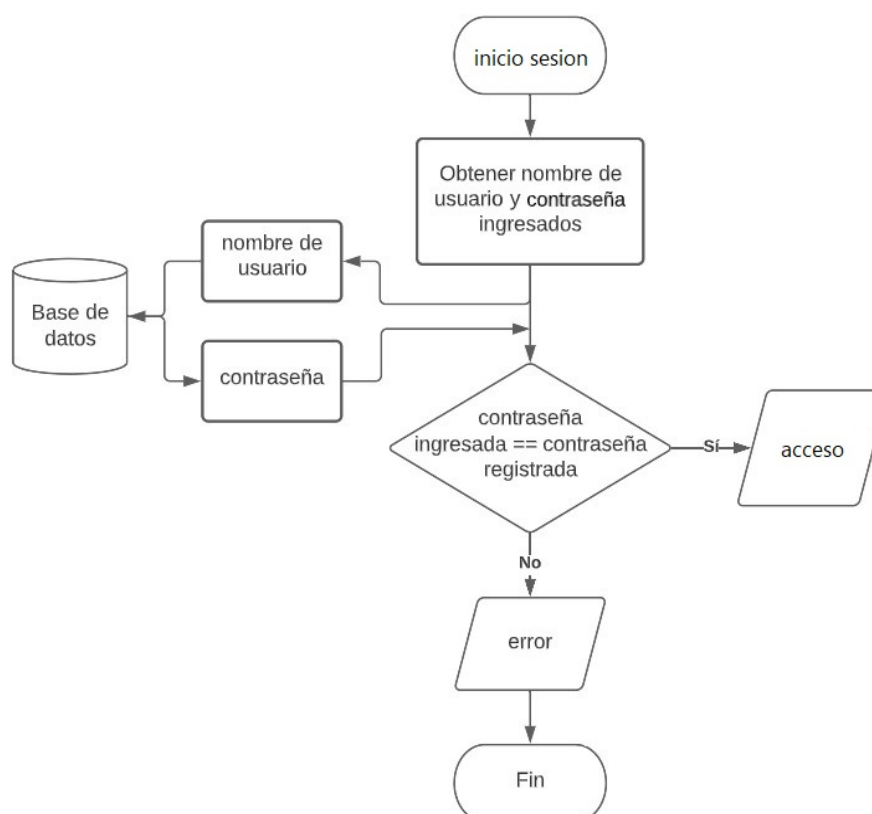


Figura 75: Diagrama de Flujo del Proceso de Acceso a la Aplicación Web

De manera similar, la función registrar obtiene el nombre de usuario ingresado en la página de registro e ingreso. Se verifica en la base de datos que no exista uno igual y, dependiendo del resultado, se registra o no el nuevo usuario en la base de datos. En la Figura 75 se puede observar el diagrama de flujo de esta función.

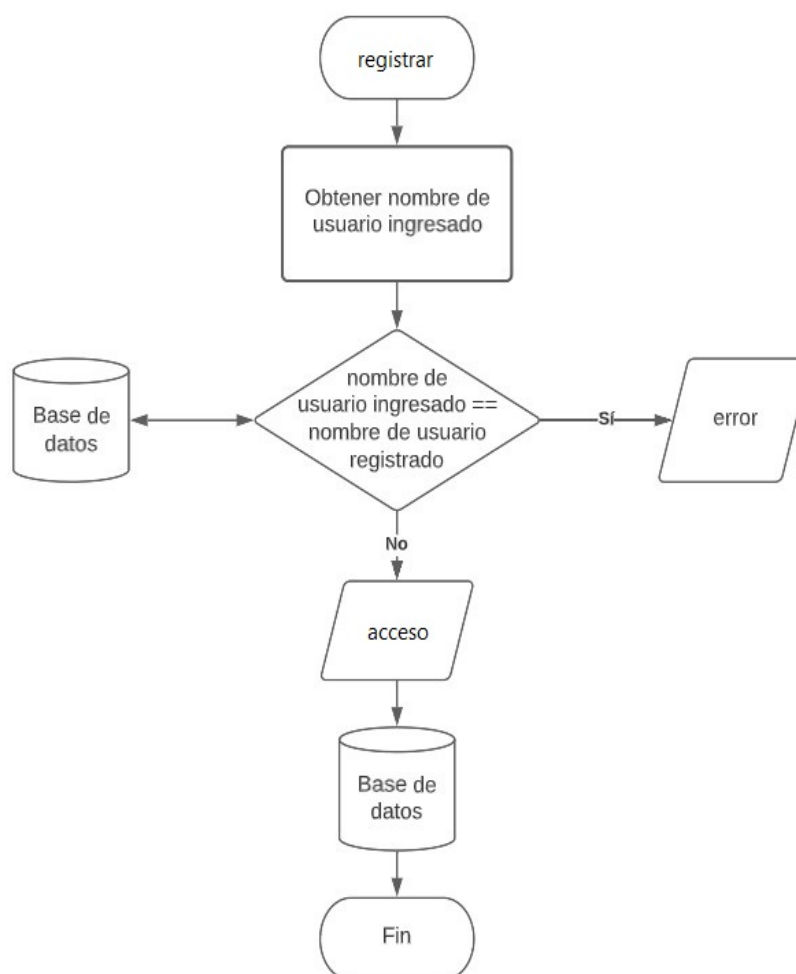


Figura 76: Diagrama de Flujo del Proceso de Registro de Nuevo Usuario

La función obtener posiciones permite cargar la lista de posiciones que el usuario puede practicar en la página de selección de posiciones. Esta lista se encuentra en la base de datos y contiene el nombre de la posición, una fotografía, la fecha de la última práctica y mejor puntaje obtenido. El diagrama de flujo de esta función se observa en la Figura 77.



Figura 77: Diagrama de Flujo del Proceso de Obtención de Lista de Posiciones

El proceso de entrenamiento, de manera general, consta de las funciones iniciar y video. Adicionalmente, el usuario tiene la opción de reintentar la práctica o finalizarla en la ventana que se despliega en la página de práctica. El diagrama de flujo de este proceso se presenta en la Figura 78.

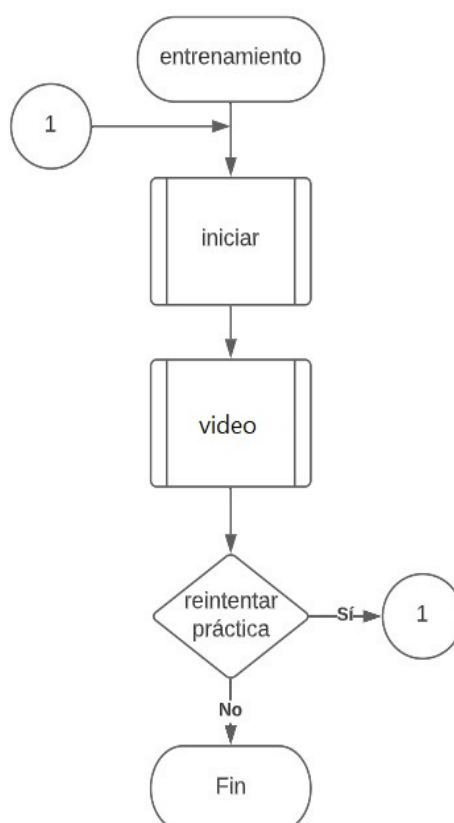


Figura 78: Diagrama de Flujo del Proceso de Entrenamiento

Una vez seleccionada la posición que se desea practicar, la función iniciar obtiene los parámetros de URL, en este caso, el nombre de la posición y el ID del usuario, espera que se ejecute la función posicion camara y envía un mensaje a la capa de presentación. El diagrama de flujo de esta función se observa en la Figura 79.

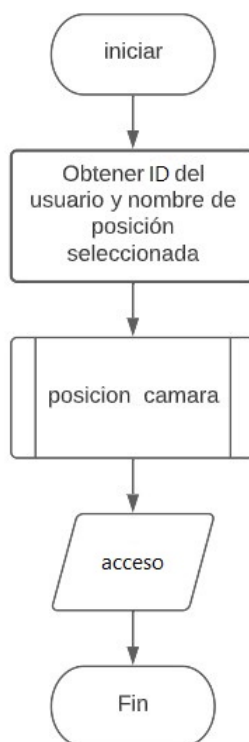


Figura 79: Diagrama de Flujo del Proceso de Inicio de Entrenamiento

La función posicion camara es la encargada de posicionar la cámara web de manera que se obtenga una mejor imagen del usuario. Primero, se enciende la cámara y mientras el modelo de detección de poses no identifique los puntos clave del cuerpo, el motor que acciona el tornillo sin fin mueve la plataforma de la cámara hacia arriba o abajo, y el motor que se encuentra en la base móvil acciona el mecanismo piñón-cremallera; de esta forma, la cámara se acerca o aleja del usuario. En la Figura 80, se observa el diagrama de flujo de esta función.

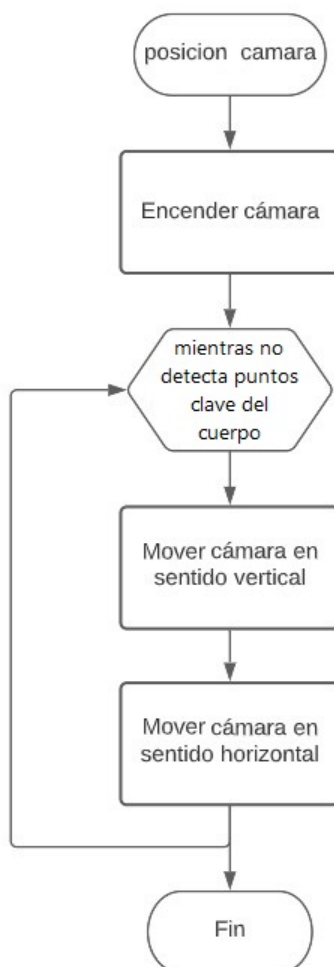


Figura 80: Diagrama de Flujo del Proceso de Posicionamiento de la Cámara

La función de video inicia una vez que se haya posicionado la cámara correctamente. Mientras se detecte una imagen del usuario, se transmite y almacena localmente la grabación del video de la práctica, la cual tiene una duración predeterminada. A continuación, se llama a las funciones terminar y evaluar pose y se guarda en la base de datos el historial de la práctica con la fecha en la que se realizó, la calificación obtenida, observaciones y una foto. En la Figura 81 se observa el diagrama de flujo de esta función.

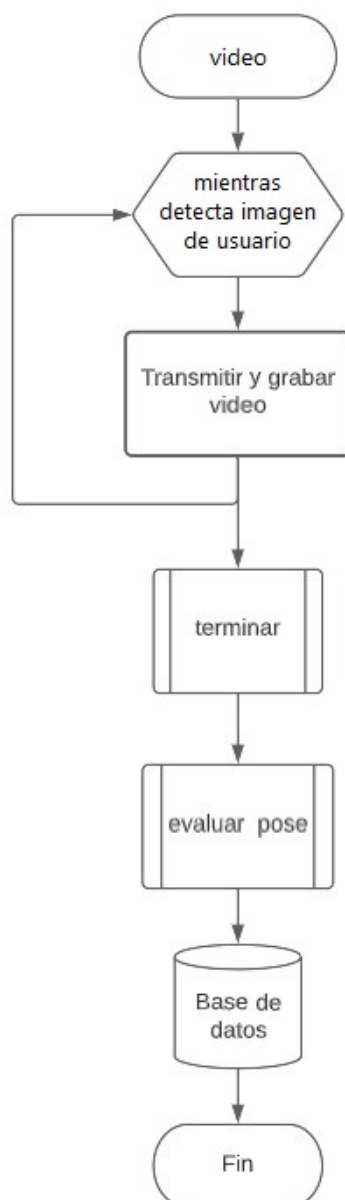


Figura 81: Diagrama de Flujo del Proceso de Transmisión de Video

La función terminar se encarga de apagar la cámara y terminar la transmisión de la grabación en la página de práctica. El diagrama de flujo de esta función se puede observar en la Figura 82.

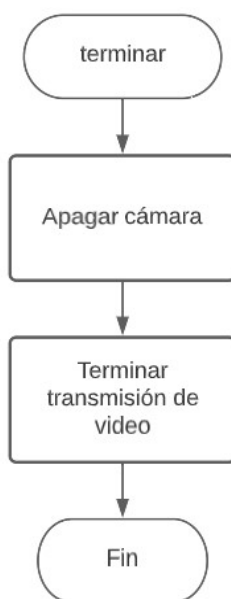


Figura 82: Diagrama de Flujo del Proceso de Finalización de Entrenamiento

Finalmente, la función evaluar pose es la encargada de analizar la grabación de la práctica y calificar al usuario, para lo cual hace uso de un modelo de calificación. Este modelo es un diccionario de Python que contiene los parámetros de calificación dependiendo de la posición, por ejemplo, si se selecciona “Oen Arae Makki”, los parámetros son los ángulos que se forman en la axila y codo izquierdos del usuario.

Se comienza por obtener las coordenadas de los puntos clave del cuerpo. Asimismo, conociendo los parámetros de calificación, se calcula los ángulos y distancias entre los puntos clave según corresponda.

Si los valores calculados se encuentran dentro del rango aceptable del modelo, el usuario recibe una buena calificación; de lo contrario, recibe una mala calificación y observaciones para que pueda mejorar su entrenamiento. En la Figura 83 se presenta el diagrama de flujo de esta función.

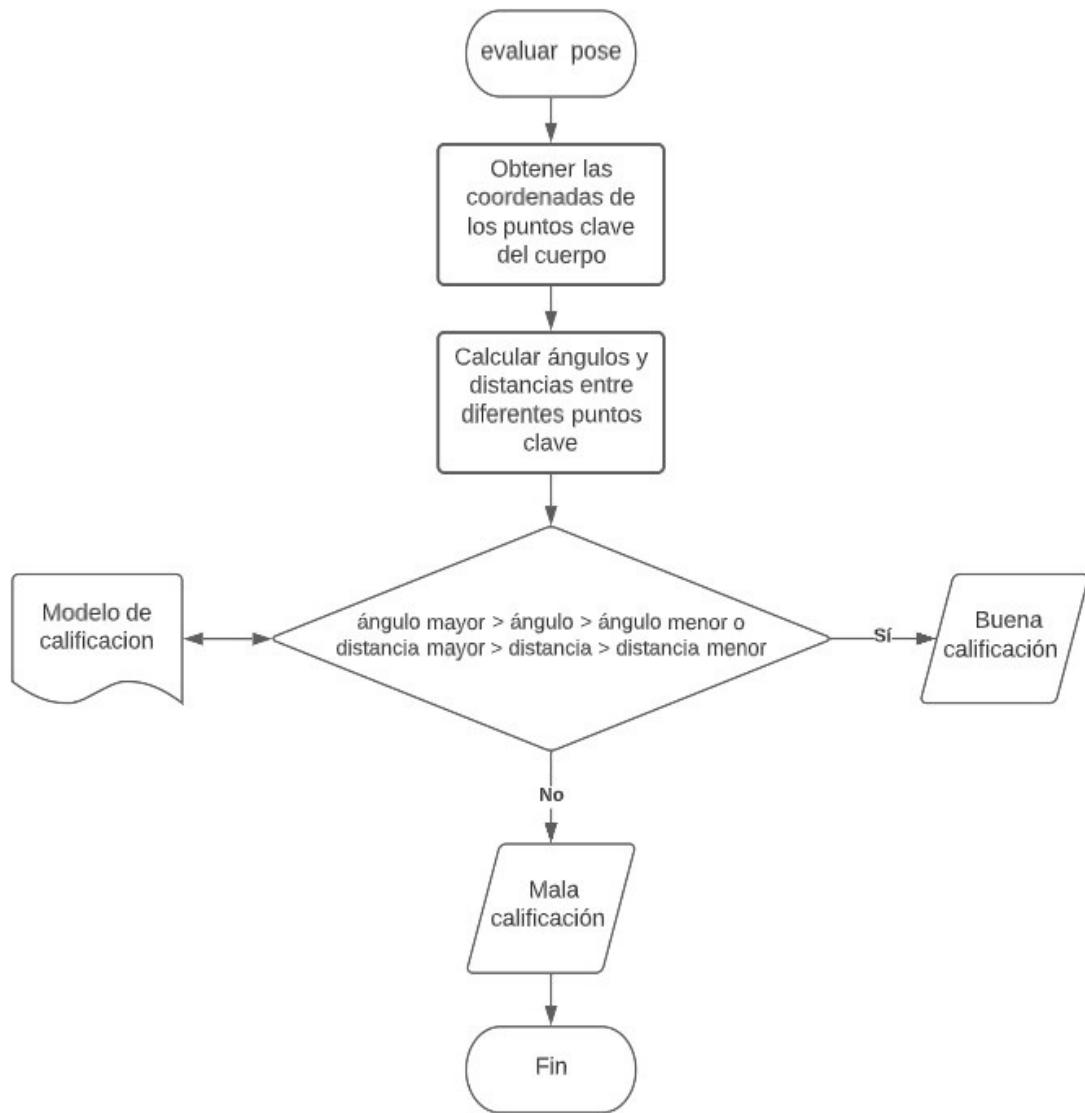


Figura 83: Diagrama de Flujo del Proceso de Evaluación de Posición

Para el cálculo de los ángulos se aplica (81). En la Figura 84 se observa un diagrama de ejemplo para obtener estos valores.

$$\alpha_{pc} = |1 + 2| \quad (81)$$

$$1 = \arctan \left(\frac{a_x}{a_y + b_y} \right)$$

$$2 = \arctan \left(\frac{b_x}{b_y} \right)$$

Donde:

α_{pc} : Ángulo entre 3 puntos clave, en $^{\circ}$

a_x : Cateto opuesto del triángulo 1, en *pixeles*

a_y : Cateto adyacente del triángulo 1, en *pixeles*

b_x : Cateto opuesto del triángulo 2, en *pixeles*

b_y : Cateto adyacente del triángulo 2, en *pixeles*.

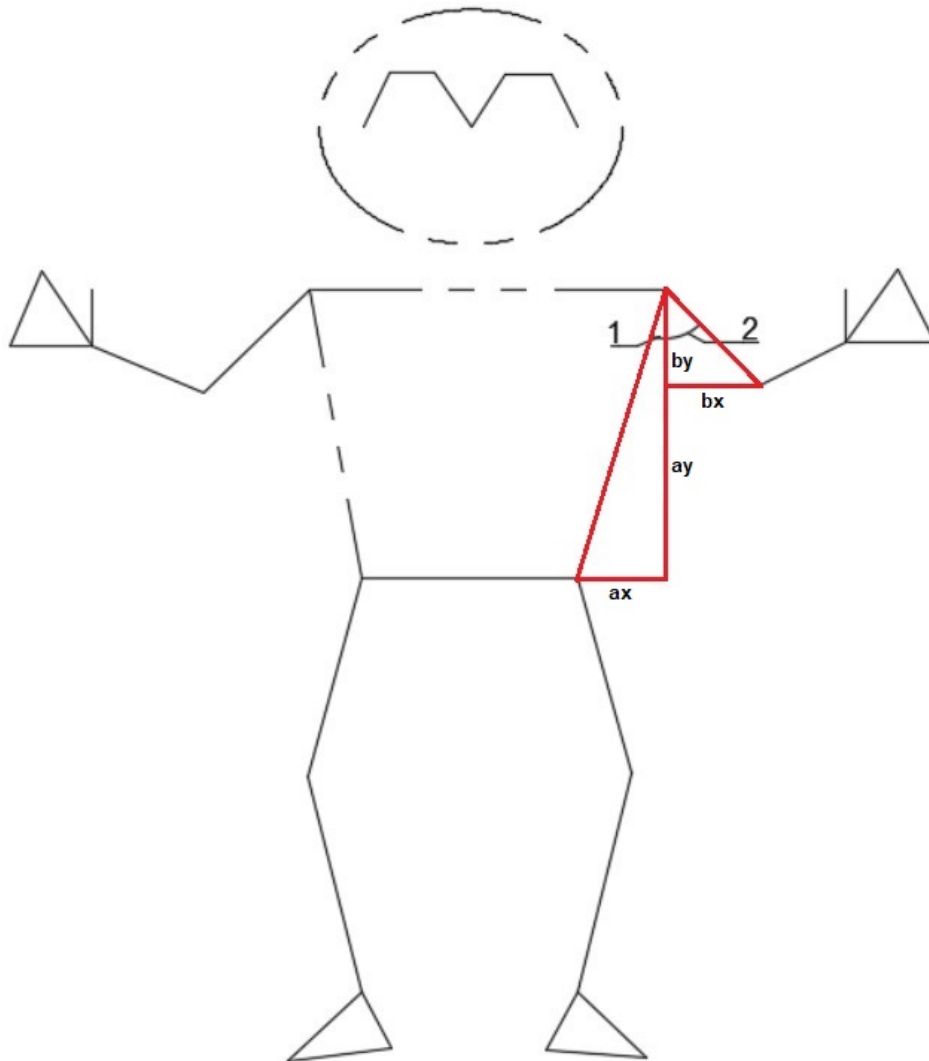


Figura 84: Diagrama para Cálculo de Ángulos entre Puntos Clave del Cuerpo

Para el cálculo de distancias se aplica (82). En la Figura 85 se observa un diagrama de ejemplo para obtener estos valores.

$$d_{pc} = \sqrt{(e_x - d_x)^2 + (e_y - d_y)^2} \quad (82)$$

Donde:

d_{pc} : Distancia entre 2 puntos clave, en *pixeles*

d_x : Coordenada x del primer punto, en *pixeles*

- d_y : Coordenada y del primer punto, en *pixeles*
 e_x : Coordenada x del segundo punto, en *pixeles*
 e_y : Coordenada y del segundo punto, en *pixeles*.

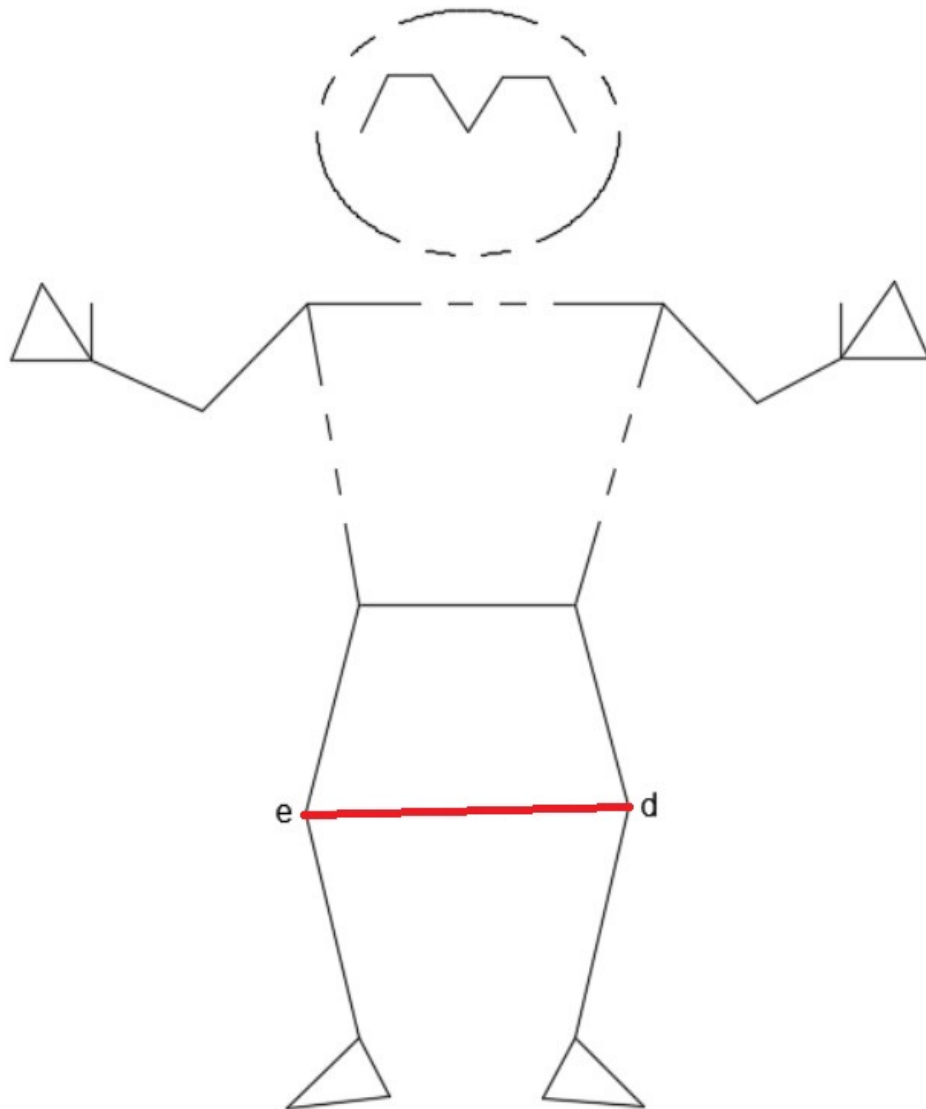


Figura 85: Diagrama para Cálculo de Distancias entre Puntos Clave del Cuerpo

10.3.3.4 Integración Capa de Presentación y Capa de Aplicación

En los siguientes diagramas se presenta la integración de las partes del frontend y el backend. Las páginas, o interfaz, se denotan como I y las funciones de control se expresan como C .

10.3.3.4.1. Acceso a la aplicación web

En las Figuras 86 y 87 se observa el flujo de acceso a la aplicación web. En la página

de registro e ingreso, el controlador verifica que el usuario registrado ingrese su nombre de usuario y contraseña correctamente para iniciar sesión; de lo contrario, se comprueba que el nombre de usuario no haya sido registrado previamente y se guardan sus datos en la base de datos. Una vez que se hace esta verificación, el usuario es dirigido a la página de inicio.

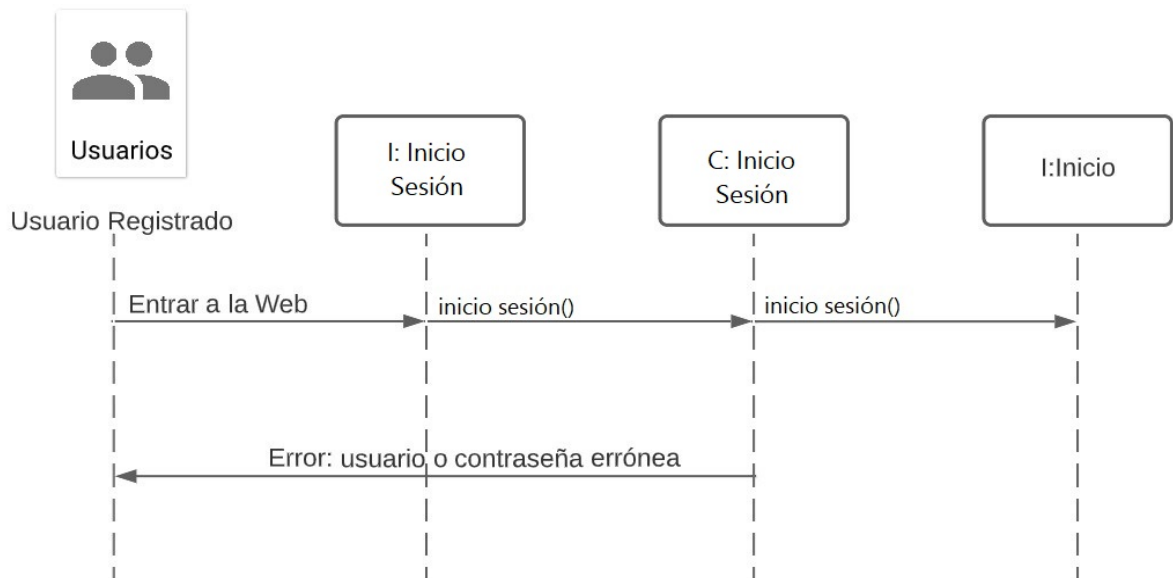


Figura 86: Diagrama de Flujo de Acceso a la Aplicación Web de Usuario Registrado

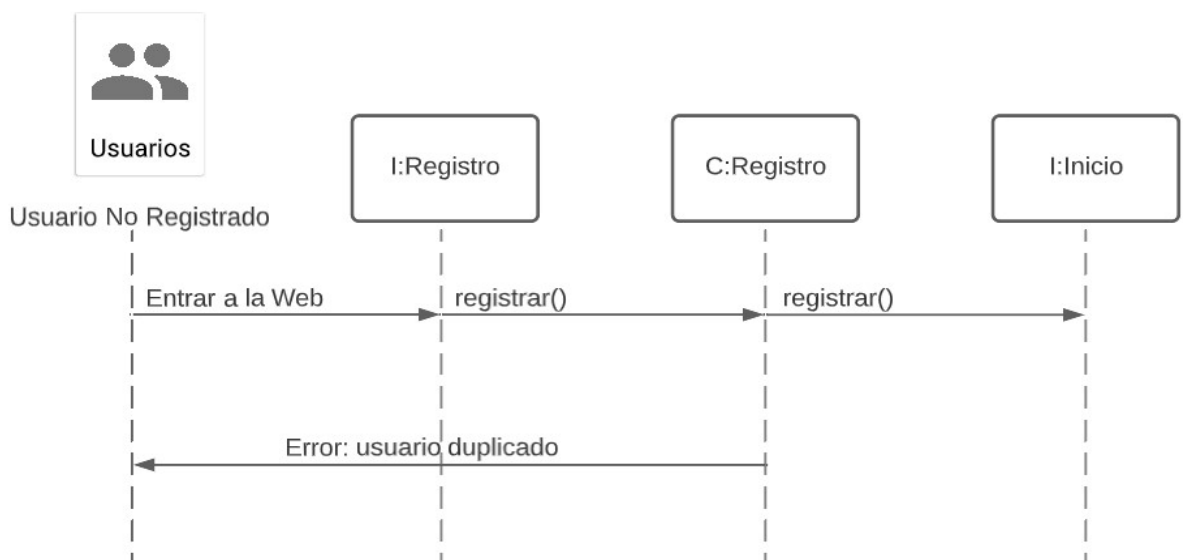


Figura 87: Diagrama de Flujo de Acceso a la Aplicación Web de Usuario No Registrado

10.3.3.4.2. Cierre de Sesión

Una vez que el usuario presiona el botón de Logout es dirigido a la página de registro e

ingreso. En la Figura 88 se observa el flujo de cierre de sesión.

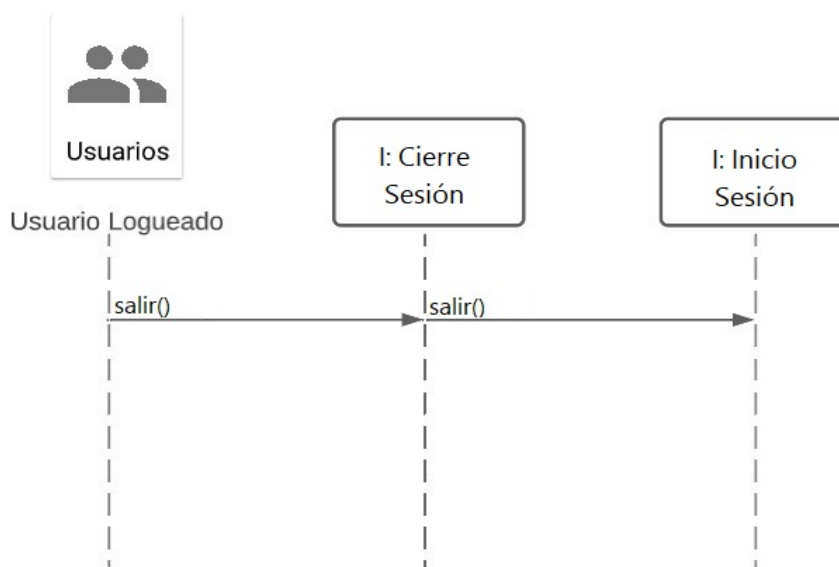


Figura 88: Diagrama de Flujo de Cierre de Sesión

10.3.3.4.3. Proceso de Entrenamiento

En la Figura 89 se observa el flujo de proceso de entrenamiento. El usuario que inicia sesión tiene la opción de seleccionar la pestaña de nueva práctica en la página de inicio, esto le direcciona a la página de selección de posiciones. Una vez que ha seleccionado la posición que desea practicar comienza la evaluación, el usuario también tiene la opción de reintentar la práctica las veces que desee. Finalmente, el controlador guarda la práctica en el historial, la cual se puede observar en la página de inicio.

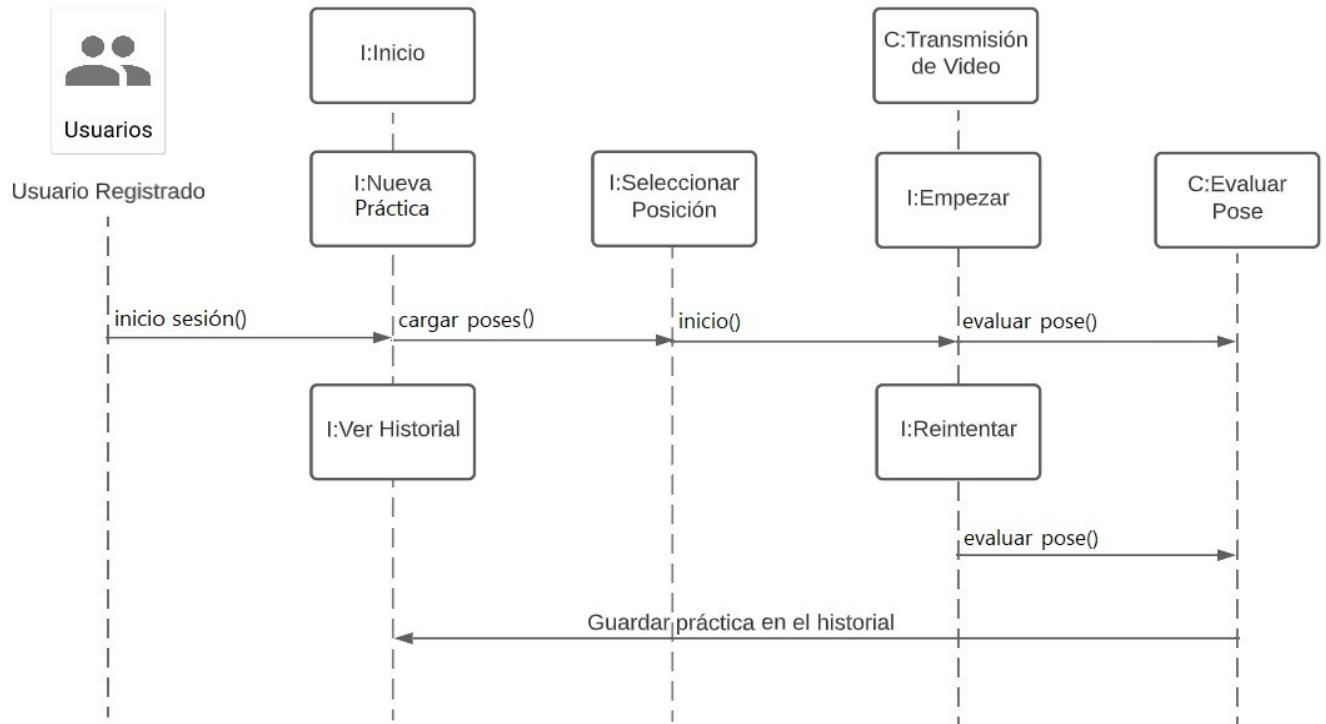


Figura 89: Diagrama de Flujo de Proceso de Entrenamiento

10.3.3.5 Capa de Datos

La capa de datos, o de base de datos, es el lugar de almacenamiento y gestión de la información empleada en la aplicación. Se puede utilizar un sistema de administración de base de datos relacional como MySQL, Oracle o Microsoft SQL Server, o un servidor de bases de datos no relacional como MongoDB, Cassandra o CouchDB, [63].

10.3.3.5.1. Selección de Base de Datos

Las bases de datos de tipo relacional y no relacional son las más utilizadas dentro del desarrollo de aplicaciones web. En la Tabla 21 se presentan algunas de las características de ambos tipos.

Tabla 21: Bases de Datos Relacionales y No Relacionales [67]


Base de Datos	Características
Relacional	<ul style="list-style-type: none">■ Modelado basado en el concepto de tablas.■ Difícil escalabilidad.■ Es necesario desarrollar un modelo de base de datos detallado.■ Se encuentra disponible una comunidad amplia y experta.■ SQL es el lenguaje de consulta estándar.■ Esquema rígido.■ La inserción de nuevas columnas o campos afecta el diseño.

Base de Datos	Características
No Relacional	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modelado basado en el concepto de documentos. ■ Fácil escalabilidad. ■ No es necesario desarrollar un modelo de base de datos detallado. ■ Una comunidad está creciendo rápidamente. ■ Falta de un lenguaje de consulta estándar. ■ Esquema dinámico. ■ Se pueden insertar nuevas columnas o campos sin un diseño existente.

Para esta aplicación, se opta por una base de datos no relacional por afinidad e interés de aprender a utilizar un sistema con un entorno más dinámico y flexible para la inserción de información.

Firestore y MongoDB son sistemas de gestión de base de datos no relacionales de código abierto que permiten una integración sencilla y ágil con aplicaciones web. A continuación, en la Tabla 22 se presentan algunas ventajas y desventajas de cada uno.

Tabla 22: Ventajas y Desventajas de MongoDB y Firebase [68]

Base de Datos	Ventajas	Desventajas
<p>MongoDB</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Proporciona un alto rendimiento con una aplicación de alto tráfico. ■ Es compatible con Python, Java, JavaScript, PHP, NodeJS, C, C. ■ Es más adecuado para aplicaciones a gran escala. ■ Altamente seguro. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ No es muy poderoso para el proceso de indexación y búsqueda.
<p>Firebase</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Permite un alojamiento sencillo en la nube de Google. ■ Es compatible con Java, Python, Objective-C, PHP, NodeJS, JavaScript, Swift, C++. ■ Es ideal para aplicaciones de pequeña escala de mensajería en tiempo real. ■ Además de ser una base de datos, brinda un modelo de servicio de backend. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Es complicado trabajar con consultas complejas.

El uso de Firebase en ciertas aplicaciones presenta una ventaja al brindar un modelo de servicio backend desarrollado para consumir desde el frontend; sin embargo, en este

caso, al haber desarrollado el backend mediante el uso de otras herramientas se pueden presentar limitaciones al momento de realizar las consultas. Por lo tanto, se selecciona MongoDB por mayor facilidad de uso y control.

11. Pruebas y Resultados

En esta sección se presentan las pruebas y resultados obtenidos del funcionamiento del entrenador.

11.1. Detección de Puntos Clave del Cuerpo

Se realiza una prueba para evaluar la efectividad del modelo de estimación de pose "BlazePose" al detectar los puntos clave del cuerpo de hombres y mujeres con estaturas de entre 1,60m y 1,80m en diferentes escenarios como: interiores, exteriores, noche, día, con diferentes intensidades de iluminación, colores de luz y diversidad de atuendos.

11.1.1. Interiores con Luz Azul

En la Figura 90 se presenta los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de hombres y mujeres en interiores con luz azul.



Figura 90: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de Hombres y Mujeres en Interiores con Luz Azul

11.1.2. Exteriores con Alta Luminosidad

En las Figuras 91 y 92 se presentan los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de una mujer en exteriores con alta luminosidad y diferentes atuendos.



Figura 91: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Atuendo Oscuro



Figura 92: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Atuendo Claro

11.1.3. Exteriores con Baja Luminosidad

En la Figura 93 se presenta los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de una mujer en exteriores con baja luminosidad.



Figura 93: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Baja Luminosidad

11.1.4. Interiores de Noche con Luz Blanca

En las Figuras 94 y 95 se presentan los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de hombres y mujeres en interiores de noche con luz blanca y diferentes atuendos.



Figura 94: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de Hombres y Mujeres en Interiores con Luz Blanca y Atuendo Oscuro

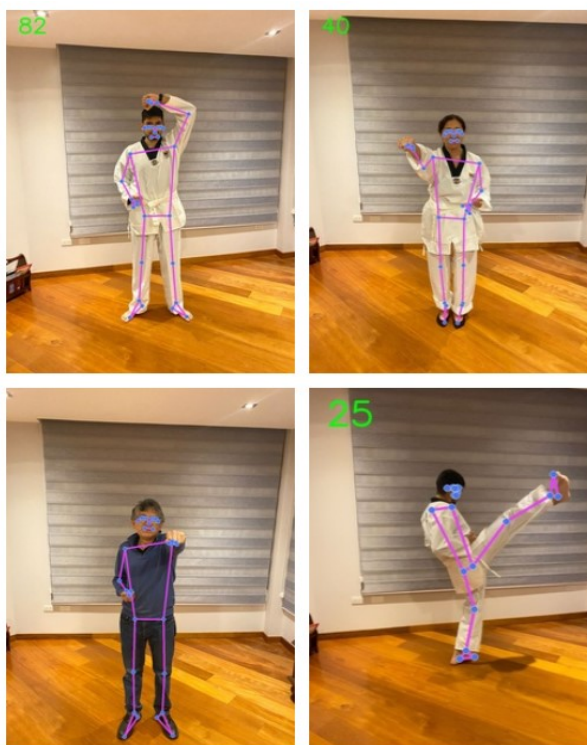


Figura 95: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de Hombres y Mujeres en Interiores de Noche con Luz Blanca y Atuendo Claro

11.1.5. Exteriores de Noche con Baja Luminosidad

En la Figura 96 se presenta los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de una mujer en exteriores de noche con baja luminosidad.

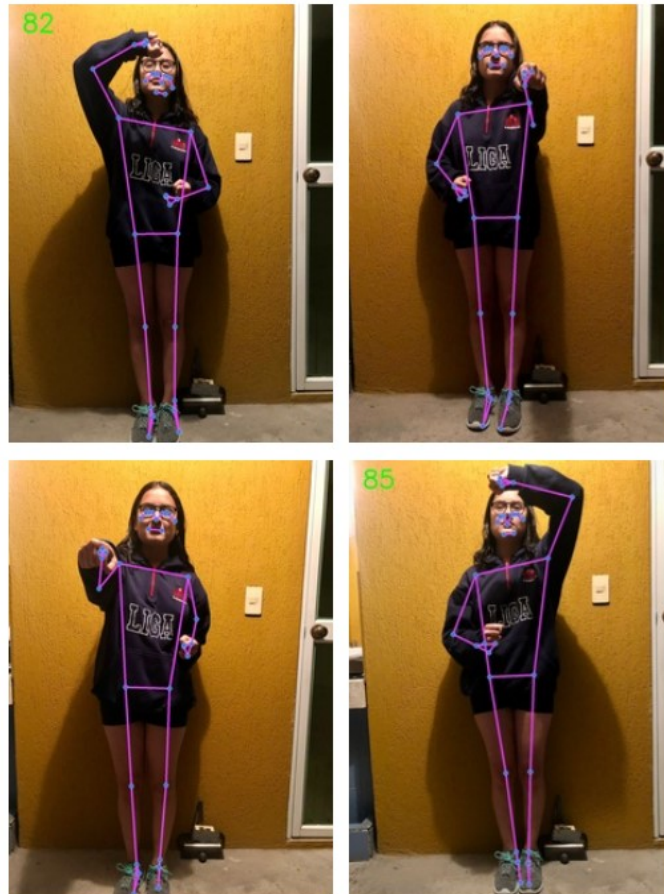


Figura 96: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores de Noche con Baja Luminosidad

11.1.6. Interiores con Alto Contraste

En la Figura 97 se presenta los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de una mujer en interiores con alto contraste.



Figura 97: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Interiores con Alto Contraste

11.1.7. Exteriores con Bajo Contraste

En la Figura 98 se presenta los resultados de la detección de puntos clave del cuerpo de una mujer en exteriores con bajo contraste.



Figura 98: Detección de Puntos Clave del Cuerpo de una Mujer en Exteriores con Bajo Contraste

Se determina que la efectividad del modelo de estimación de pose “BlazePose” es buena puesto que, es capaz de detectar los puntos clave del cuerpo de hombres y mujeres con estaturas de entre 1,60m y 1,80m en la mayoría de escenarios presentados; sin embargo, presenta errores en la detección de puntos clave al presentarse atuendos que incluyen prendas de vestir holgadas.

11.2. Modelo de Calificación

El modelo de calificación se crea en base a los ángulos y distancias entre puntos clave del cuerpo de fotografías tomadas de un Taekwon-Doka segundo Dan, como se muestra en la Figura 99, debido a que se dificulta encontrar un conjunto de datos de posiciones de la primera forma de Taekwon-Do.

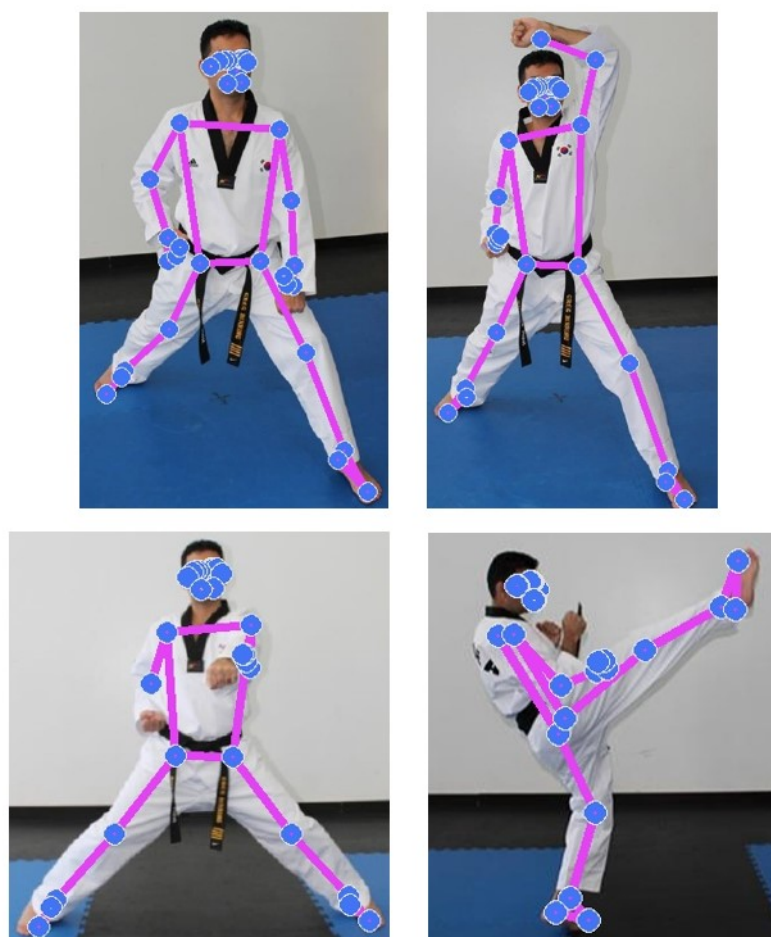


Figura 99: Posiciones de la Primera Forma de Taekwon-Do Realizadas por Taekwon-Doka Cinturón Negro Segundo Dan

El modelo de calificación evalúa el entrenamiento de 8 personas, de las cuales obtiene

ángulos y distancias entre puntos clave del cuerpo específicos dependiendo de la posición practicada. En la Tabla 23 se describe los parámetros que se evalúan en cada posición.

Tabla 23: Parámetros de Evaluación del modelo de Calificación según la Posición

Posición	Parámetros a Evaluar
<ul style="list-style-type: none"> ■ Oreun Ap Chagi ■ Oen Ap Chagi 	<ul style="list-style-type: none"> ■ righthip: Ángulo formado entre el tronco y pierna. ■ rightknee: Ángulo formado en la flexura de la rodilla.
<ul style="list-style-type: none"> ■ Oreun Ap Kubi ■ Oen Ap Kubi ■ Oreun Ap Seogi ■ Oen Ap Seogi 	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: Distancia entre los pies. ■ distanceknees: Distancia entre las rodillas.

Posición	Parámetros a Evaluar
<ul style="list-style-type: none"> ■ Oreun Arae Makki ■ Oen Arae Makki ■ Oreun Momtong Makki ■ Oen Momtong Makki ■ Oreun Olgul Makki ■ Oen Olgul Makki ■ Oreun Momtong Jireugi ■ Oen Momtong Jireugi 	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: Ángulo formado en la flexura del codo. ■ rightax: Ángulo formado entre el tronco y el brazo.

En la Tabla 24 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Ap Chagi”, patada frontal con el pie derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 100 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 24: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Ap Chagi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ righthip: 0 ■ rightknee: 70 ■ Promedio: 35 	De acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ righthip: 0 ■ rightknee: 85 ■ Promedio: 42,5 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ righthip: 70 ■ rightknee: 100 ■ Promedio: 85 	De acuerdo



Figura 100: Calificación de la Posición Oreun Ap Chagi

En la Tabla 25 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Ap Chagi”, patada frontal con el pie izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 101 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 25: Verificación de Calificación de la Posición Oen Ap Chagi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ lefthip: 50 ■ leftknee: 60 ■ Promedio: 55 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ lefthip: 50 ■ leftknee: 70 ■ Promedio: 60 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ lefthip: 50 ■ leftknee: 65 ■ Promedio: 57,5 	De acuerdo



Figura 101: Calificación de la Posición Oen Ap Chagi

En la Tabla 26 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Ap Kubi”, posición larga con el pie derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 102 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 26: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Ap Kubi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 95 ■ distanceknees: 80 ■ Promedio: 87,5 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 95 ■ distanceknees: 85 ■ Promedio: 90 	De acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 85 ■ distanceknees: 85 ■ Promedio: 85 	De acuerdo



Figura 102: Calificación de la Posición Oreun Ap Kubi

En la Tabla 27 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Ap Kubi”, posición larga con el pie izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 103 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 27: Verificación de Calificación de la Posición Oen Ap Kubi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 0 ■ distanceknees: 50 ■ Promedio: 25 	No de acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 50 ■ distanceknees: 50 ■ Promedio: 50 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 90 ■ distanceknees: 85 ■ Promedio: 87,5 	De acuerdo



Figura 103: Calificación de la Posición Oen Ap Kubi

En la Tabla 28 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Ap Seogi”, posición corta con el pie derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 104 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 28: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Ap Seogi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 85 ■ distanceknees: 90 ■ Promedio: 87,5 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 75 ■ distanceknees: 90 ■ Promedio: 82,5 	De acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 90 ■ distanceknees: 100 ■ Promedio: 95 	De acuerdo



Figura 104: Calificación de la Posición Oreun Ap Seogi

En la Tabla 29 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Ap Seogi”, posición corta con el pie izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 105 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 29: Verificación de Calificación de la Posición Oen Ap Seogi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 85 ■ distanceknees: 95 ■ Promedio: 90 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 75 ■ distanceknees: 95 ■ Promedio: 85 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ distancefeet: 85 ■ distanceknees: 100 ■ Promedio: 92,5 	De acuerdo



Figura 105: Calificación de la Posición Oen Ap Seogi

En la Tabla 30 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Arae Makki”, posición de defensa baja con el brazo derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 106 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 30: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Arae Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 80 ■ rightax: 80 ■ Promedio: 80 	De acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 95 ■ rightax: 75 ■ Promedio: 85 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 95 ■ rightax: 95 ■ Promedio: 95 	De acuerdo



Figura 106: Calificación de la Posición Oreun Ap Chagi

En la Tabla 31 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Arae Makki”, posición de defensa baja con el brazo izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 107 se presentan las imágenes de las personas realizando el

ejercicio.

Tabla 31: Verificación de Calificación de la Posición Oen Arae Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 80 ■ leftax: 80 ■ Promedio: 80 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 80 ■ leftax: 75 ■ Promedio: 77,5 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 100 ■ leftax: 95 ■ Promedio: 97,5 	De acuerdo



Figura 107: Calificación de la Posición Oren Arae Makki

En la Tabla 32 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Momtong Makki”, posición de defensa media con el brazo derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 108 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 32: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Momtong Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 70 ■ rightax: 90 ■ Promedio: 80 	No de acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 50 ■ rightax: 0 ■ Promedio: 25 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 0 ■ rightax: 85 ■ Promedio: 42,5 	No de acuerdo



Figura 108: Calificación de la Posición Oreun Momtong Makki

En la Tabla 33 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Momtong Makki”, posición de defensa media con el brazo izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 109 se presentan las imágenes de las personas

realizando el ejercicio.

Tabla 33: Verificación de Calificación de la Posición Oen Momtong Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 80 ■ leftax: 75 ■ Promedio: 77,5 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 0 ■ leftax: 50 ■ Promedio: 25 	No de acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 0 ■ leftax: 90 ■ Promedio: 45 	No de acuerdo



Figura 109: Calificación de la Posición Oen Momtong Makki

En la Tabla 34 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Olgul Makki”, posición de defensa alta con el brazo derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 110 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 34: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Olgul Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 80 ■ rightax: 85 ■ Promedio: 82,5 	De acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 60 ■ rightax: 70 ■ Promedio: 75 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 70 ■ rightax: 85 ■ Promedio: 77,5 	De acuerdo



Figura 110: Calificación de la Posición Oreun Olgul Makki

En la Tabla 35 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Olgul Makki”, posición de defensa alta con el brazo izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón

negro segundo Dan. En la Figura 111 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 35: Verificación de Calificación de la Posición Oen Olgul Makki: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 80 ■ leftax: 85 ■ Promedio: 82,5 	De acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 75 ■ leftax: 85 ■ Promedio: 80 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 80 ■ leftax: 70 ■ Promedio: 75 	De acuerdo



Figura 111: Calificación de la Posición Oen Olgul Makki

En la Tabla 36 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oreun Momtong Jireugi”, posición de ataque medio con el brazo derecho, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 112 se presentan las imágenes de las personas realizando el ejercicio.

Tabla 36: Verificación de Calificación de la Posición Oreun Momtong Jireugi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 95 ■ rightax: 50 ■ Promedio: 72,5 	De acuerdo

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 0 ■ rightax: 50 ■ Promedio: 25 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ rightcodo: 95 ■ rightax: 100 ■ Promedio: 97,5 	No de acuerdo



Figura 112: Calificación de la Posición Oreun Momtong Jireugi

En la Tabla 37 se presenta una sección de calificaciones de la posición “Oen Momtong Jireugi”, posición de ataque medio con el brazo izquierdo, realizada por varias personas y se verifica los resultados arrojados por el modelo de calificación con un Taekwon-Doka cinturón negro segundo Dan. En la Figura 113 se presentan las imágenes de las personas

realizando el ejercicio.

Tabla 37: Verificación de Calificación de la Posición Oen Momtong Jireugi: Modelo vs. Taekwon-Doka

Persona	Calificación	Verificación de Calificación
Persona 1	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 85 ■ leftax: 80 ■ Promedio: 82,5 	No de acuerdo
Persona 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 50 ■ leftax: 70 ■ Promedio: 60 	De acuerdo
Persona 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ leftcodo: 100 ■ leftax: 0 ■ Promedio: 50 	No de acuerdo



Figura 113: Calificación de la Posición Oreun Momtong Jireugi

Se determina la precisión de evaluación del modelo una vez que se realiza la verificación de las calificaciones de las 8 personas. Estos resultados se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38: Precisión del Modelo de Calificación

Posición	Precisión
Oreun Ap Chagi	0,75
Oen Ap Chagi	0,75
Oreun Ap Kubi	0,87
Oen Ap Kubi	0,33
Oreun Ap Seogi	0,87
Oen Ap Seogi	0,87
Oreun Arae Makki	0,87
Oen Arae Makki	0,87
Oreun Momtong Makki	0,62
Oen Momtong Makki	0,5
Oreun Olgul Makki	0,75
Oen Olgul Makki	0,87

Posición	Precisión
Oreun Momtong Jireugi	0,62
Oen Momtong Jireugi	0,62

Se determina que el modelo de calificación presenta un mayor porcentaje de error evaluando las siguientes posiciones:

- Oen Ap Kubi
- Oreun Momtong Makki
- Oen Momtong Makki
- Oreun Momtong Jireugi
- Oen Momtong Jireugi

12. Análisis de Costos

Se realiza el análisis de costos de los componentes que conforman el entrenador inteligente. En la Tabla 39 se presentan los costos de estos elementos.

Tabla 39: Análisis de Costos del Entrenador Inteligente

Artículo	Cantidad	Precio
Raspberry Pi 3	1	\$150
Cámara Web	1	\$29
Tornillo 8mm	1	\$20
Eje 8mm	1	\$6
Rodamientos Lineales 8mm	2	\$6
Rollo PLA	1	\$20
Impresión 3D (horas)	30	\$3,5/hora = \$105
Fuente de Alimentación	1	\$40

Artículo	Cantidad	Precio
Trípode	1	\$15
Horas de trabajo	1	\$1460
Total		\$1851

El costo total del entrenador es de 1851\$.

Una vez determinado el costo de fabricación del entrenador, se presentan los beneficios de implementación:

- Dispone de un sistema de posicionamiento automático que detecta a la persona al momentos de realizar el entrenamiento.
- Incluye una aplicación web en la que el usuario puede observar su historial de práctica.
- Permite practicar las posiciones que conforman la primera forma de Taekwon-Do con la posibilidad de agregar más ejercicios a futuro.
- Sus dimensiones lo hacen fácil de transportar y colocar en cualquier espacio.

El costo del kW/h en Ecuador es de 0,92cUSD/kW y considerando que se hace uso del dispositivo una hora al día por cinco días a las semana, se obtiene el siguiente resultado que se puede observar en la Tabla 40

Tabla 40: Análisis de Consumo Eléctrico del Entrenador Inteligente

Potencia (kW)	Consumo en un mes (kW/h)	Precio
0,18	3,6	\$3,31

El consumo total del entrenador inteligente es un mes es de 3,31\$.

Finalmente, se realiza una comparación de costos entre el entrenador inteligente y productos o servicios que se encuentran en el mercado. En la Tabla 41 se presenta la siguiente información.

Tabla 41: Comparación de Productos y Servicios

Producto / Servicio	Costo
Entrenador Inteligente	\$1851
The Mirror	\$1500
Costo Anual de Entrenamiento Particular en Establecimiento	\$480

Tanto el entrenador inteligente como el dispositivo de entrenamiento The Mirror tienen un costo elevado; sin embargo, incluyen características que no presenta el entrenamiento en un establecimiento con entrenadores personales como almacenar información de la práctica o el que pueda ser utilizado en cualquier momento. Adicionalmente, el entrenador inteligente es un dispositivo portátil de dimensiones pequeñas lo que permite su fácil traslado a diferentes espacios, lo que no se puede lograr con The Mirror.

13. Conclusiones y Recomendaciones

- En el presente trabajo se percató acerca de los desafíos que se presentan al aplicar la estimación de pose humana en la cuantificación de ejercicios físicos, como las artes marciales, principalmente debido a la diversidad y complejidad de las posiciones que existen.
- El entrenador inteligente se diseñó tomando en cuenta los requerimientos de las dimensiones de la estructura de $20 \cdot 20 \cdot 20\text{cm}$ y sus elementos fueron dimensionados bajo los criterios de resistencia y rigidez con un factor de seguridad de 1,5 para asegurar que, además de que sus materiales no se fracturen, no presenten deflexiones significativas que perjudiquen el funcionamiento del prototipo.
- Se realizó la comprobación de los cálculos realizados con simulación por elementos finitos y se determinó que los espesores y diámetros de los elementos son capaces de soportar las cargas que se les aplica.

- Para el posicionamiento automático del sistema se incorporaron los mecanismos piñón-cremallera y tornillo de potencia que brindan movimiento en sentido horizontal y vertical al sistema.
- Se seleccionó una cámara web con una resolución de 1080p como dispositivo de entrada de imagen. De igual manera, se seleccionaron motores a paso como actuadores del posicionamiento automático del sistema luego de calcular el par requerido por los mecanismos piñón-cremallera y tornillo de potencia. Finalmente, se implementó finales de carrera para determinar la posición de los elementos accionados por los motores a paso.
- El control de los motores y despliegue de la aplicación web se realizó mediante una placa Raspberry Pi 3 modelo B que cuenta con pines digitales, de interrupción y se puede conectar vía WiFi al Internet.
- Se aplicó el modelo de estimación de pose “BlazePose” que puede detectar 33 puntos clave del cuerpo humano a diferencia de otros modelos y se utilizó las herramientas orientadas a la estimación de pose OpenCV y MediaPipe que facilitaron el uso del modelo de estimación de pose dentro de la programación.
- Se creó un modelo de calificación capaz de evaluar las 14 posiciones de la primera forma de Taekwon-Do basado en los ángulos y distancias entre puntos clave del cuerpo de fotografías tomadas de un Taekwon-Doka segundo Dan.
- Se determinó que el modelo de calificación presenta un mayor porcentaje de error al evaluar 5 de las 14 posiciones que conforman la primera forma de Taekwon-Do, debido a que el modelo de estimación de pose detecta de manera errónea puntos clave del cuerpo en escenarios donde se presentan prendas de vestir holgadas.
- Para ofrecer al usuario una experiencia de entrenamiento óptima y cómoda se desarrolló una aplicación web. En ella el usuario puede seleccionar la posición que desea practicar y revisar su historial de prácticas.
- La placa Raspberry Pi 3 modelo B, a pesar de ser capaz de cumplir con las tareas requeridas en este proyecto, presenta limitaciones de procesamiento, por lo que se

recomienda hacer el despliegue de la aplicación, tanto backend como frontend, en un servidor web con lo que se tiene la posibilidad de incrementar la capacidad de procesamiento y obtener resultados de forma más rápida.

- Se recomienda agregar más parámetros de evaluación en cada posición del modelo de calificación para obtener resultados más confiables del entrenamiento de los usuarios.
- Es recomendado realizar el entrenamiento en espacios con buena iluminación y luz focalizada frontal.
- Antes de comenzar con el entrenamiento, se recomienda colocar el entrenador inteligente a una altura inicial de un metro y dos metros de distancia del usuario.
- Asumiendo que se haga uso del entrenador inteligente 7 horas a la semana, se recomienda realizar el cambio de los rodamientos lineales cada 8 años.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. S. U. en Periodismo Deportivo, “Evolución Histórica Del Entrenamiento Deportivo,” *Periodismo deportivo* 3, p. 6, 2020. [En línea]. Disponible: <https://perio.unlp.edu.ar/catedras/periodeportivo3/wp-content/uploads/sites/19/2020/04/RESEÑA-HISTORICA-del-ENTRENAMIENTO-DEPORTIVO.pdf>
- [2] E. C. Cevallos, O. Rodrigo, C. Coca, y R. Ramirez-Anormaliza, “Metodología integral para el proceso de enseñanza del poomsae taeguk en la iniciación del taekwondo,” *Lecturas educación física y deportes (Buenos Aires)*, vol. 20, no. 211, pp. 1–15, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.efdeportes.com/efd211/poomsae-taeguk-en-la-iniciacion-del-taekwondo.htm>
- [3] A. F. Melhim, “Aerobic and anaerobic power responses to the practice of taekwon-do,” *British Journal of Sports Medicine*, vol. 35, no. 4, pp. 231–234, 2001.
- [4] K. Martial Arts, “Taekwondo Teacher Training Program.”
- [5] M. Abualkibash, J. Gedney, Y. Kim, y J. Lee, “A hierarchical approach to landmarks detection in Taekwondo Poomsae videos,” *Proceedings of the 2009 2nd International Conference on Computer Science and Its Applications, CSA 2009*, 2009.
- [6] A. R. Reserved, “Taekwondo Poomse,” 2004.
- [7] X. Liu, “Artificial intelligence and modern sports education technology,” *Proceedings - 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Education, ICAIE 2010*, pp. 772–776, 2010.
- [8] “Machine Learning,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.indracompany.com/es/blogneo/deep-learning-sirve>
- [9] Y. Lecun, Y. Bengio, y G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.

- [10] R. Szeliski, "Computer Vision : Algorithms and Applications 2nd Edition," *Springer*, p. 1196, 2021.
- [11] "Pose estimation: The ultimate overview." [En línea]. Disponible: <https://viso.ai/deep-learning/pose-estimation-ultimate-overview/>
- [12] Y. Liu, Y. Xu, y S. B. Li, "2-D Human Pose Estimation from Images Based on Deep Learning: A Review," *Proceedings of 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, IMCEC 2018*, no. Imcec, pp. 462–465, 2018.
- [13] "The mirror espejo inteligente." [En línea]. Disponible: <https://topesdegama.com/noticias/gadgets/mirror-espejo-inteligente>
- [14] "Otari." [En línea]. Disponible: <https://www.yankodesign.com/2020/06/23/this-smart-fitness-mat-has-an-attached-display-webcam-to-give-you-virtual-training-at-home/>
- [15] Material properties of abs. [En línea]. Disponible: <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/> [Fecha de consulta: mayo 2022]
- [16] S. Farah, D. G. Anderson, y R. Langer, "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 367–392, 2016.
- [17] "Cámara web logitech hd pro-c920." [En línea]. Disponible: <https://davidpc.net/product/camara-web-hd-pro-c920-logitech/>
- [18] "Cámara web logitech c930." [En línea]. Disponible: <https://www.logitech.com/es-roam/products/webcams/c930e-business-webcam.960-000971.html>
- [19] "Joyaccess webcam 1080p full hd." [En línea]. Disponible: <https://www.amazon.com/-/es/micrófono-videollamadas-grabación-estudio-conferencias/dp/B08GPWHBVK>
- [20] "Adesso cybertrack h4 1080p usb webcam." [En línea]. Disponible: <https://www.bhphotovideo.com/spanish/c/product/1567510-REG/adesso>
- [21] J. P. Vidosic, *Machine Design Projects*. Ronald Press Co, 1957.

- [22] K. Budynas, R. and Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, octava ed. Mc Graw Hill - México, 2008.
- [23] J. Molina, "Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes," p. 196, 2016. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>
- [24] R. L. Mott, *Diseño de Elementos de Máquina*, 4th ed. Pearson Educación - México, 2006.
- [25] "Tornillo sin fin 8mm 4 entradas 600mm cnc." [En línea]. Disponible: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516568685-tornillo-sin-fin-8mm-4-entradas-600mm-3d-cncacc-electronics1>
- [26] C. Oleodinamica, "Precision Shafts for Linear Motion."
- [27] "Aisi 1050 cold drawn." [En línea]. Disponible: <https://matmatch.com/es/materials/mitf980-aisi-1050-cold-Drawn>
- [28] Rextroth, "Sistemas de guiado con rodamientos lineales," vol. 999001254, p. 244, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.lineartec.com.ar/catalogos/7RodamientosLinealesBosch.pdf>
- [29] M. Garcia, "Rodamientos Rígidos de Bolas," *Rodamientos*, pp. 266–267, 2019.
- [30] M. S. Suite-g y W. Dale, *Linear Motion Rolling Guide Series General Catalog*, 2016, vol. 7.
- [31] W. Pawlak, "Wear and coefficient of friction of pla-graphite composite in 3D printing technology," *Engineering Mechanics 2018*, no. May, pp. 649–652, 2018.
- [32] "Din 867: Basic rack tooth profiles."
- [33] "Mcmaster carr," 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.mcmaster.com/>
- [34] "Computadores y accesorios." [En línea]. Disponible: <https://www.superpaco.com/tecnologia/computadores-y-accesorios?page=6>

- [35] “Motorreductor de doble eje.” [En línea]. Disponible: <https://electronilab.co/tienda/motorreductor-con-caja-reductora-6v-1-48/>
- [36] “Servo mg995.” [En línea]. Disponible: <https://www.makercreativo.com/store/producto/servo-mg995-10kg-cm/>
- [37] “Motor a pasos y driver.” [En línea]. Disponible: <https://makertronix.com/catalogo/motor-a-pasos-y-driver-28byj-48.html>
- [38] “Módulo driver uln2003.” [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/driver-pap-stepper/366-modulo-driver-uln2003.html>
- [39] “Fin de carrera kw11-3z.” [En línea]. Disponible: <https://avelectronics.cc/producto/fin-de-carrera-kw11-3z-5a-250v/>
- [40] “Micro switch final de carrera.” [En línea]. Disponible: <https://tdelectronica.com/producto/sensores/microswitch-final-de-carrera/>
- [41] “Arduino uno r3.” [En línea]. Disponible: <http://www.hobbytronics.co.uk/arduino-uno-r3>
- [42] R. Org. Raspberry pi documentation. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/> (2020)
- [43] “Tarjeta de desarrollo esp32 wifi bluetooth.” [En línea]. Disponible: <https://avelectronics.cc/producto/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wifi-bluetooth/>
- [44] “Turning on an led with your raspberry pi’s gpio pins.” [En línea]. Disponible: <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/27968772-turning-on-an-led-with-your-raspberry-pis-gpio-pins>
- [45] “Calculadora de resistencias para leds.” [En línea]. Disponible: <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/27968772-turning-on-an-led-with-your-raspberry-pis-gpio-pins>
- [46] “Led verde brillante.” [En línea]. Disponible: <https://www.electronicainsurgentes.com/led/91-led-verde-brillante-5-mm.html>

- [47] “Adaptador para cctv 12v-5a.” [En línea]. Disponible: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-515124017-fuente-de-poder-para-cctv-12v-5a>
- [48] “Fuente de poder conmutada 5v 40a.” [En línea]. Disponible: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-514918463-fuente-de-poder-transformador-cctv-110220v-a-5v-40a-200w>
- [49] “Cargador adaptador 5v 2a.” [En línea]. Disponible: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516679306-fuente-de-poder-5v-2a-cargador-adaptador-5-v-2-amp>
- [50] “Dc-dc buck converter.” [En línea]. Disponible: <https://make.net.za/product/dc-dc-buck-converter-xl4015-type1/>
- [51] “Dc-dc 5-32v to 0.8-30v power supply step down module adjustable buck regulator 5a.” [En línea]. Disponible: <https://vordeo.com/shop/electronic-components-supplies/module-board/power-supply-module/dc-dc-5-32v-to-0-8-30v-power-supply-step-down-module-adjustable-buck-regulator-5a>
- [52] “A guide to openpose in 2022.” [En línea]. Disponible: <https://viso.ai/deep-learning/openpose/>
- [53] COCO Consortium, “Index and Cocodataset,” 2015. [En línea]. Disponible: <http://cocodataset.org/detections-eval>
- [54] “Real-time body pose tracking with mediapipe blazepose.” [En línea]. Disponible: <https://ai.googleblog.com/2020/08/on-device-real-time-body-pose-tracking.html>
- [55] “Detection of human body landmarks with openpose.” [En línea]. Disponible: <https://www.hearai.pl/post/14-openpose/>
- [56] “A guide to openpose in 2022.” [En línea]. Disponible: <https://viso.ai/deep-learning/openpose/>
- [57] “What is tensorflow.” [En línea]. Disponible: <https://towardsai.net/p/l/what-is-tensorflow-and-how-does-it-work>

- [58] "Blazepose : A 3d pose estimation model." [En línea]. Disponible: <https://medium.com/axinc-ai/blazepose-a-3d-pose-estimation-model-d8689d06b7c4>
- [59] "Opencv." [En línea]. Disponible: <https://opencv.org/about/>
- [60] "Python pillow." [En línea]. Disponible: <https://pypi.org/project/Pillow/>
- [61] "Scikit learn vs tensorflow." [En línea]. Disponible: <https://www.simplilearn.com/scikit-learn-vs-tensorflow-article~:text=Scikit-learn and TensorFlow were,use is for neural networks.>
- [62] "Mediapipe toolkit." [En línea]. Disponible: <https://learnopencv.com/introduction-to-mediapipe/>
- [63] "Los 5 principales patrones de arquitectura de software." [En línea]. Disponible: <https://apiumhub.com/es/tech-blog-barcelona/principales-patrones-arquitectura-software/>
- [64] "Arquitectura de tres niveles." [En línea]. Disponible: <https://www.ibm.com/mx-es/cloud/learn/three-tier-architecture>
- [65] "Frontend vs backend." [En línea]. Disponible: <https://hub.laboratoria.la/front-end-vs-back-end-cual-es-la-diferencia?>
- [66] "Which is better for machine learning: Flask vs django?" [En línea]. Disponible: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2022/01/which-is-better-for-machine-learning-flask-vs-django/>
- [67] "Mysql vs nosql." [En línea]. Disponible: <https://www.educba.com/mysql-vs-nosql/>
- [68] "Firebase vs mongodb: Battle of the best databases." [En línea]. Disponible: <https://www.cmarix.com/blog/firebase-vs-mongodb-battle-of-the-best-databases-for-2022/~:text=To synchronize the devices and,in large-scale data management.>