



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO
ROBÓTICO MULTIFUNCIONAL INTERACTIVO PARA LA
ENSEÑANZA DEL AJEDREZ EN LA EMPRESA INVESPOL
CÍA. LTDA**

**AUTORES: CARRERA CHICO LEONARDO DAVID
MORALES MOSQUERA NELSON FABRICIO**

**DIRECTORA: ING. TOBAR QUEVEDO JOHANNA BELEN
MSc.**

SANGOLQUÍ

2017



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO ROBÓTICO MULTIFUNCIONAL INTERACTIVO PARA LA ENSEÑANZA DEL AJEDREZ EN LA EMPRESA INVESPOL CÍA. LTDA”**, realizado por los señores **CARRERA CHICO LEONARDO DAVID** y **MORALES MOSQUERA NELSON FABRICIO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CARRERA CHICO LEONARDO DAVID** y **MORALES MOSQUERA NELSON FABRICIO** para que lo sustenten públicamente.

San Rafael, 6 de Junio del 2017

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'Johanna Belén Tobar Quevedo'.

Ing. Johanna Belén Tobar Quevedo MSc.

DIRECTORA



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **LEONARDO DAVID CARRERA CHICO**, con cédula de identidad N° 1722810015 y **NELSON FABRICIO MORALES MOSQUERA**, con cédula de identidad N° 1720171899 declaramos que este trabajo de titulación “Diseño e implementación de un módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez en la empresa Invespol Cía. Ltda” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

San Rafael, 6 de Junio del 2017

Leonardo David Carrera Chico

C.C: 1722810015

Nelson Fabricio Morales Mosquera

C.C: 1720171899



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

Nosotros, **LEONARDO DAVID CARRERA CHICO** y **NELSON FABRICIO MORALES MOSQUERA**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "Diseño e implementación de un módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez en la empresa Invespol Cía. Ltda", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

San Rafael, 6 de Junio del 2017

Leonardo David Carrera Chico

C.C: 1722810015

Nelson Fabricio Morales Mosquera

C.C: 1720171899

DEDICATORIA

A mi familia, mi hermana, mis abuelitos, mis primos y mis tíos. Este trabajo está realizado con especial cariño para ellos que me hicieron un hombre de bien. Les dedico todo este trabajo como una muestra de mi dedicación y mi entrega.

Leonardo David Carrera Chico

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a Dios por su amor infinito, por su misericordia, porque sin Él no tendría rumbo; a mis padres Nelson y Miriam, quienes han estado conmigo apoyándome en todo momento, por el amor, dedicación, paciencia y valores que me brindaron. A Irina por ser mi apoyo incondicional desde el principio de la carrera, por haber dedicado su tiempo, por reír y llorar conmigo ante las adversidades que la vida nos presentó.

Nelson Fabricio Morales Mosquera

AGRADECIMIENTOS

Primero, debo agradecer a la vida por el largo camino de aprendizaje a nivel personal, intelectual, emocional y espiritual que he tenido. Ella me ha permitido enfocarme en el verdadero aprendizaje de todas las cosas y no solo el de esta carrera.

No estaría completo el agradecimiento sin las personas que han estado a lo largo de todo el proceso y que de una y otra forma han aportado para cumplir este sueño. A los más importantes, mis padres, que han sabido guiarme con sabiduría, y con su paciencia y persistencia han logrado transmitirme valores de trabajo honesto con propósito, cariño incondicional y justicia social. A mi hermana por darle contraste a mi propia existencia y enseñarme a través de vivencias el verdadero sentido de estar vivo y la verdadera confianza.

A mis profesores y en especial a nuestra Directora del presente proyecto, que gracias a sus sueños de ayuda social a través de la tecnología, han permitido darle un propósito noble al estudio.

A mis amigos, que son mi segunda familia, y con los cuales he sabido crear estrechas conexiones que nos han mantenido hasta ahora y me han permitido conocer el mundo y disfrutar mejor de toda la carrera.

A mi novia, que con su paciencia y cariño ha logrado motivarme y pensar en nuevos horizontes. Sin mencionar el valor de la unión y la madurez. Especial agradecimiento le dirijo por ser la precursora de tantas alegrías en momentos difíciles y por ser el apoyo en todos los proyectos.

Leonardo David Carrera Chico

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiarme en cada paso, por ayudarme a derribar barreras y fortalecerme cada día. Porque mi vida no tendría sentido, sin Él. Por su infinito amor y porque me siento bendecido y dichoso al saber que siempre va a estar a mi lado.

A mi madre Miriam por ser mi inspiración, mi ejemplo a seguir, por darme valor cuando más lo necesité, por sus valores y consejos; pero más que nada, por su amor.

A mi padre Nelson por su ejemplo de constancia y perseverancia, por su fortaleza y carácter, por ser mi padre y hermano a la vez, por ser mi amigo y por todo el amor brindado.

A Irina por ser una mujer muy especial, por apoyarme y motivarme a ser una mejor persona, por su incondicionalidad, por haber sido mi amiga y mi luz para seguir adelante y no rendirme.

Nelson Fabricio Morales Mosquera

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xxii
RESUMEN.....	xxxii
ABSTRACT.....	xxxiii
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1.Introducción	1
1.2.Definición del problema.....	1
Antecedentes	1
Marco institucional.....	4
Misión	4
Visión	4
Valores Institucionales	5
1.3.Justificación e importancia.....	5
1.4.Área de influencia	7
1.5.Objetivos	8

Objetivo General	8
Objetivos Específicos.....	8
1.6.Alcance.....	8
1.7.Estructura del documento.....	9
CAPÍTULO II	11
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1 La Robótica	11
2.2.Robot industrial y su clasificación	11
2.3.Tipos de los robots Industriales.....	12
2.4.Robot Cartesiano	13
2.5.Trabajos relacionados a la Robótica aplicada al Ajedrez.....	16
2.6.Efector final.....	18
2.7.Motor de ajedrez	20
2.8.Sistemas electrónicos	24
2.9.Interfaz Multi – Táctil	28
2.9.1.Tecnologías de mapeo.....	29
2.9.1.1.Tecnología resistiva de mapeo	30
2.9.1.2.Tecnología capacitiva de mapeo	30
2.9.1.3.Tecnologías ópticas de mapeo	31
Método de iluminador difuso posterior (RDI) Rear Diffuse Illuminator.....	36
2.9.1.4.Cámara infrarroja (IR)	37
2.9.1.5.Proyección.....	40
2.9.1.6.Iluminación Infrarroja	41
2.9.1.7.Capa Protectora y Pantalla de Proyección	42
Percepción de gestos y los algoritmos de reconocimiento.....	43
2.9.1.8.Adquisición de objetos.....	44

2.9.1.9.Segmentación de la imagen.....	45
2.9.1.10.Segmentación con umbral (Threshold)	46
2.9.1.11.Reconocimiento de manos, gestos y objetos.....	49
2.9.1.12.Diseño de la interfaz.....	50
CAPÍTULO III.....	52
3. METODOLOGÍA Y DISEÑO	52
3.1.Definición del Concepto	52
Necesidades del Concepto.....	52
Características Técnicas	53
Función QFD.....	54
3.1.1.1.Relación entre características técnicas	55
3.1.1.2.Relación entre características técnicas y necesidades del usuario	56
3.2.Factibilidad y Planeación	56
3.3.Módulo 1: Estructura.....	58
Subsistema 1. Manipulador Robótico	58
3.3.1.1.Alternativas de Diseño	58
Selección de la Morfología del Robot.....	58
Selección de Materiales Estructurales.....	61
Selección de Mecanismos y Transmisiones mecánicas.	63
3.3.1.2.Diseño final mecánico del manipulador robótico cartesiano	67
Análisis estructural de la morfología del manipulador cartesiano	67
Análisis estructural de los ejes de la base	69
Análisis estructural del sistema de ejes transversales	74
Empotramientos SK20	82
Análisis estructural de las columnas.	82
Análisis estructural de los soportes para las correas en el eje longitudinal	90

Análisis estructural de los soportes para las correas en el eje transversal	91
Análisis en las guías deslizantes de los 3 ejes.....	93
Análisis estático de la placa del eje vertical.....	104
Análisis estático de los ejes verticales	106
Análisis de los empotramientos SHF8	108
3.3.1.2.1.Análisis Dinámico del Manipulador Cartesiano	109
3.3.1.2.2.Dimensionamiento de los sistemas de transmisión.....	114
Dimensionamiento de los actuadores.....	115
Dimensionamiento de la correa y piñón GT2	121
Dimensionamiento del tornillo sin fin y tuerca.....	128
3.3.1.2.3.Cálculos de transmisión	131
3.3.1.2.4.Cinemática del robot	132
Modelamiento de la cinemática directa del robot cartesiano	132
Matrices de transformación homogénea	136
3.3.1.2.5.Parámetros de funcionalidad del robot.....	138
Grados de libertad	138
Espacio de trabajo	138
Capacidad de carga	139
Velocidad	139
Programabilidad	140
Resolución espacial.....	140
Subsistema 2. Efecto Final.....	140
3.3.1.3.Reconocimiento de los requerimientos técnicos para el efector final.....	140
3.3.1.4.Reconocimiento de los requerimientos físicos para el efector final	140
3.3.1.5.Alternativas para diseño.....	141
Tipo de pinza.....	141

Material del efector final.....	142
Accionamiento del efector final.....	144
3.3.1.6. Selección de alternativas por el método ordinal corregido de criterios ponderados.....	145
Selección del tipo de pinza.....	145
Selección del material del efector final.....	145
Selección del accionamiento del efector final.....	146
Evaluación y selección de alternativas.....	146
3.3.1.7. Diseño mecánico del efector final.....	146
Diseño del mecanismo del efector final.....	147
Cálculo de transmisión para el efector final.....	149
Subsistema 3. Piezas de ajedrez.....	165
3.4. Módulo 2: Sistema de control del sistema.....	167
Subsistema 1. Arquitectura del sistema.....	167
Subsistema 2. Topología de redes.....	171
Subsistema 3. Arquitectura de software.....	172
3.4.1.1. Desarrollo de software en el módulo de control.....	173
3.4.1.2. Desarrollo de software en el controlador del robot.....	175
3.5. Módulo 3: Sistema de Retroproyección.....	182
Alternativas de diseño.....	182
3.5.1.1. Selección y evaluación de alternativas para el tipo de toque.....	186
3.5.1.2. Selección y evaluación del tipo de toque infrarrojo.....	187
Diseño final para el sistema de retroproyección.....	188
3.5.1.3. Requerimientos para el diseño final del sistema de retroproyección.....	188
3.5.1.4. Subsistema 1: Parte física (Hardware) del sistema de visión artificial.....	189
Cámara Infrarroja.....	189

Lente y distancia de enfoque.....	191
Filtro infrarrojo.....	194
Reflectores infrarrojos.....	195
Proyector y Espejo	197
Material de proyección y pantalla	200
CPU de procesamiento.....	201
3.5.1.5. Subsistema 2: Algoritmos (Software) de la visión artificial.....	201
Selección de paquetes y librerías para visión.....	203
Procesamiento de Imagen con CCV (Community Core Vision) en este proyecto ..	204
Captura de Imagen	205
Calibración de la perspectiva	206
Conversión a escala de grises.....	207
Suavizado con el filtro Gaussiano.....	207
Thresholding (Umbral).....	208
Segmentación de la imagen.....	208
Comunicación y protocolo en la visión artificial	210
Protocolo TUIO.....	210
Calibración y Área de trabajo	212
3.6. Módulo 4: Software de Aplicación (Interfaz).....	213
Alternativas del paquete para el software de aplicación	214
3.6.1.1. Selección del paquete de software para el desarrollo del software de aplicación	215
Diseño final del Software de aplicación sobre la plataforma Unity 3D.....	216
3.6.1.2. Diseño de las pantallas de la interfaz.....	217
3.6.1.3. Subsistema 1: Algoritmo de procesamiento interno para la visión.....	219
3.6.1.4. Subsistema 2: Comunicación con Raspberry PI2 y el motor de ajedrez StockFish.....	221

3.6.1.5. Subsistema 3: Control del Tablero de Ajedrez	223
3.6.1.5.1. Algoritmo de control en tutoriales, o partida VS robot.....	224
3.6.1.5.2. Algoritmo de control con 2 jugadores humanos.	225
3.6.1.6. Algoritmos específicos en el software de aplicación.....	226
Cálculo y algoritmo del centro del cuadro de ajedrez.....	226
Base de datos para determinar la validez del movimiento.....	227
3.6.1.7. Subsistema 4. Animaciones	229
3.7. Módulo 5: Sistema Eléctrico y Electrónico	230
Subsistema 1: Motores eléctricos.....	231
3.7.1.1. Potencia y consumo de los motores.....	231
Motor NEMA 23.....	231
Motor NEMA 17.....	231
Servomotor DS3218.....	232
Servomotor Hitec HS-485HB	232
3.7.1.2. Selección de los drivers para los motores	232
3.7.1.3. Potencia en los Servomotores	233
Subsistema 2: Componentes electrónicos	233
3.7.1.4. Potencia y Consumo de los componentes electrónicos (Arduino).....	233
3.7.1.5. Componentes electrónicos con fuente independiente.....	234
3.7.1.6. Sensores.	234
Subsistema 3: Diseño electrónico	235
3.7.1.7. Selección de la placa base (baquelita)	235
3.7.1.8. Diseño de la placa PCB.....	235
3.7.1.9. Conexiones generales de la electrónica de este proyecto.	238
CAPÍTULO IV.....	240
4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS	240

4.1. Implementación	240
4.1.1. Manipulador robótico.....	240
4.1.1.1. Corte Láser del acrílico PMMA.....	240
4.1.1.2. Impresión 3D	244
4.1.1.3. Mecanizado	248
4.1.1.1. Ensamble del Manipulador robótico.....	253
Armado del sistema de eje vertical	253
Sujeción del sistema de ejes verticales a los elementos del eje transversal	254
Armado del sistema de ejes transversal	255
Armado del sistema a los ejes longitudinales.	256
Ensamble Completo del robot y sujeción a la mesa	256
4.1.2. Efector final.....	257
4.1.2.1. Impresión 3D	257
4.1.2.2. Ensamble del robot con el eje Z.....	260
4.1.3. Piezas de ajedrez	260
4.1.4. Sistema de Retroproyección y visión artificial	265
4.1.5. Sistema Electrónico.....	267
4.1.5.1. Cableado del Sistema.....	267
4.1.5.2. Implementación del sistema Electrónico.	269
4.1.5.3. Panel de control.....	271
4.2. Pruebas.....	271
4.2.2. Prueba de posicionamiento del efector final del robot en un punto indicado con coordenadas rectangulares	273
4.2.4. Prueba de agarre y giro del efector final	276
4.2.5. Prueba del tiempo de respuesta cada sub-módulo del sistema.....	277
4.2.6. Prueba de los ángulos correctos para el proyector y reflectores	280

4.2.8. Prueba de calibración de toques	288
4.2.9. Prueba de mapeo con el software de aplicación.....	290
CAPÍTULO 5	292
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	292
5.1. Conclusiones.....	292
5.2. Recomendaciones	294
BIBLIOGRAFÍA	297

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los robots según La Asociación Francesa de Robótica	
Industrial	12
Tabla 2. Clasificación de los robots industriales.....	12
Tabla 3. Tipos de robots cartesianos	14
Tabla 4. Comparación de trabajos relacionados	17
Tabla 5. Características de optimización para los circuitos de un robot.....	27
Tabla 6. Parámetros del sistema multi - táctil con método de cámara infrarroja.....	33
Tabla 7. Características y propiedades de los métodos de detección infrarrojos.....	34
Tabla 8. Necesidades del Usuario	53
Tabla 9. Especificaciones Técnicas.....	53
Tabla 10. Resultados de la Matriz QFD.....	55
Tabla 11. Módulos del Sistema Robótico de Ajedrez.....	57
Tabla 12. Necesidades del usuario con el manipulador robótico.....	58
Tabla 13. Métricas del manipulador robótico.	59
Tabla 14. Resultado de los criterios y soluciones propuestas para el manipulador. ..	60
Tabla 15. Ventajas y Desventajas del PLA.....	61
Tabla 16. Ventajas y Desventajas del acrílico PMMA.	61
Tabla 17. Ventajas y Desventajas del acero inoxidable AISI 302.	62
Tabla 18. Ventajas y Desventajas de la aleación de aluminio.	62
Tabla 19. Resultados de ponderar los materiales y los criterios de selección.....	62
Tabla 20. Sistemas de transmisión para robots.	64
Tabla 21. Resultados de ponderar los mecanismos en los ejes del plano de acuerdo a criterios de selección.	66
Tabla 22. Resultados de ponderar los mecanismos en el eje vertical de acuerdo a los criterios de selección.....	67
Tabla 23. Lista de componentes generales del manipulador robótico cartesiano.	68
Tabla 24. Volumen de Trabajo del manipulador robótico cartesiano.....	69
Tabla 25. Partes de la columna.	83
Tabla 26. Componentes del eje transversal y su reacción sobre las columnas.	89
Tabla 27. Ecuaciones diferenciales para el langragiano.	112
Tabla 28. Parámetros para el cálculo dinámico.	114

Tabla 29. Ejes del manipulador con respecto a sus ejes cartesianos.....	115
Tabla 30. Características geométricas Denavith Hartenberg.....	135
Tabla 31. Parámetros de Denavith Hartenberg	135
Tabla 32. Velocidad máxima del robot.....	139
Tabla 33. Ventajas y desventajas de la pinza de presión con desplazamiento lineal	141
Tabla 34. Ventajas y desventajas de la pinza de presión con movimiento pivotante	142
Tabla 35. Ventajas y desventajas de la pinza magnética	142
Tabla 36. Ventajas y desventajas del material acrílico para el efector final	143
Tabla 37. Ventajas y desventajas del material PLA para el efector final	143
Tabla 38. Ventajas y desventajas del material acero para el efector final	143
Tabla 39. Ventajas y desventajas de servomotores	144
Tabla 40. Ventajas y desventajas de motores a pasos.....	144
Tabla 41. Tabla de conclusiones para tipo de pinza.....	145
Tabla 42. Tabla de conclusiones para material del efector final.....	145
Tabla 43. Tabla de conclusiones para accionamiento del efector final.....	146
Tabla 44. Características técnicas del acrílico	155
Tabla 45. Valores máximos y mínimos del estudio URES en el dedo del efector final.....	156
Tabla 46. Análisis estático nodal de tensiones en el dedo del efector final.....	157
Tabla 47. Análisis del factor de seguridad en el dedo del efector final	158
Tabla 48. Valores máximos y mínimos del estudio URES en el efector final.....	158
Tabla 49. Análisis estático nodal de tensiones en el efector final.....	159
Tabla 50. Análisis del factor de seguridad en el dedo del efector final	160
Tabla 51. Coeficiente de fricción entre plásticos ABS	161
Tabla 52 Características del diseño del acople del efector final	161
Tabla 53. Ventajas y Desventajas del método infrarrojo.	183
Tabla 54. Ventajas y desventajas del método resistivo 5-Wire.	183
Tabla 55. Ventajas y desventajas del método capacitivo superficial.	184
Tabla 56. Ventajas y desventajas del método capacitivo proyectado.	185

Tabla 57. Ventajas y desventajas del método SAW de ondas acústicas de superficie.	185
Tabla 58. Resultados de los criterios para los métodos táctiles estudiados.	186
Tabla 59. Resultado de la ponderación entre criterios y métodos multitáctiles infrarrojos.	187
Tabla 60. Requerimientos para el desarrollo del sistema de visión artificial.....	188
Tabla 61. Especificaciones de la cámara PlayStation Eye Camera.	190
Tabla 62. Especificaciones del reflector de LEDs infrarrojos T8X15-140.....	196
Tabla 63. Especificaciones para el proyector Epson PowerLite S17.....	198
Tabla 64. Características de las librerías de visión	203
Tabla 65. Procesos de la segmentación.....	209
Tabla 66. Atributos, descripción y su tipo de los parámetros que maneja el protocolo en este proyecto.....	211
Tabla 67. Requerimientos del software de aplicación.	213
Tabla 68. Paquetes de software que soportan el protocolo TUIO.....	214
Tabla 69. Ponderación de criterios con las alternativas.	215
Tabla 70. Características de los posibles sensores de posición.....	234
Tabla 71. Componentes numerados que van en la placa PCB.....	236
Tabla 72. Piezas del manipulador robótico cortadas en láser.	241
Tabla 73. Piezas del manipulador robótico impresas en 3D	244
Tabla 74 Configuraciones establecidas para la impresión de las partes del robot...	246
Tabla 75. Tiempos de impresión 3D de las partes del robot.....	246
Tabla 76. Piezas metálicas para mecanizar.	249
Tabla 77. Hoja de procesos del eje GT2.	249
Tabla 78. Hoja de procesos del ángulo de acople de columnas.	250
Tabla 79. Hoja de procesos de la mesa de madera.....	252
Tabla 80. Proceso de armado del manipulador cartesiano.	253
Tabla 81. Proceso de manufactura de las piezas de ajedrez.....	261
Tabla 82 Tiempos de impresión de las piezas de ajedrez	262
Tabla 83. Identificación del cableado estructurado de la mesa.....	268
Tabla 84. Proceso de creación del circuito de sistema de control.....	269
Tabla 85. Prueba de optimización para la velocidad en cada eje rectangular.....	272

Tabla 86. Prueba de posicionamiento del módulo robótico	273
Tabla 87. Prueba de posicionamiento en diferentes casillas del tablero	275
Tabla 88. Prueba de ejecución de jugadas con el robot cartesiano	277
Tabla 89. Tiempos de respuesta del robot en cada tipo de jugada.....	278
Tabla 90. Latencias en Sistema de retroproyección.....	280
Tabla 91. Ángulos probados para la proyección sobre el espejo y pantalla.	282
Tabla 92. Prueba de ángulo en los reflectores infrarrojos.....	283
Tabla 93. Prueba de distancia en los reflectores infrarrojos.	283
Tabla 94. Condiciones para evaluar la validez de los valores en el proyector EPSON.....	284
Tabla 95. Condiciones para evaluar la validez de los valores en la cámara PlayStation Eye.....	285
Tabla 96. Parámetros configurables en el CCV para lograr un buen reconocimiento del gesto táctil.	286
Tabla 97. Número de puntos de calibración.....	290
Tabla 98. Aspectos de pantalla para la ventana de Unity en este proyecto.	291

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Deep Blue vs Kasparov	2
Figura 2. Robot ABB IRB 1400 moviendo piezas de ajedrez	3
Figura 3. Robot cartesiano para jugar ajedrez versión china.	16
Figura 4. Mecanismo de barras paralelas para posicionamiento de piezas de ajedrez.....	18
Figura 5. Agarre de pieza por efector final sin colisiones.....	19
Figura 6. Robot jugando ajedrez en la competición del proyecto de fin de año	20
Figura 7. Interfaz del motor de ajedrez GNU Chess usando programa Qt.	21
Figura 8. Notación algebraica de Ajedrez.....	22
Figura 9. Robot Baxter, con cámara y efector final expandido	23
Figura 10. Vista del circuito del robot de futbol.	26
Figura 11. Modelo de una interfaz gráfica multi - táctil.	28
Figura 12. Deformación causada por la presión que es detectada por los encoders de efecto Hall.	29
Figura 13. Distribución de los componentes en método óptico infrarrojo de detección.	32
Figura 14. Stylus con IR nótese el botón que activa la luz IR.	33
Figura 15. Mesa para albergar la superficie multi - táctil y su distribución electrónica en la máquina de Holzammer que combina FTIR y DI.....	36
Figura 16. Estructura de referencia para una técnica de iluminador difuso.....	36
Figura 17. a) Lente de cámara web, filtros de paso y bloqueo para la luz infrarroja respectivamente, b) Disposición de los filtros y lentes en el compartimiento.	37
Figura 18. De Izquierda a derecha: disco reciclado de 3 1/2 pulgadas, negativos expuestos, filtro comercial IR para cámaras.	38
Figura 19. a) Toma en perspectiva con la cámara de prueba al aplicado el algoritmo de transformación de perspectiva inversa, b) Cámara ortogonal a la superficie de contacto. Nótese que la imagen es la misma en ambos casos aun cuando el ángulo de toma es totalmente distinta.	39
Figura 20. Representación gráfica de la distancia del foco del lente a la cámara.....	40

Figura 21. Proyector con el sistema de disparo ultra corto.....	41
Figura 22. Diagrama de flujo del proceso multi – táctil analizando el trabajo de Ramsundar (2015), Kim et al., (2007) y Holzammer (2009).....	44
Figura 23. Pantalla convertida de RGB a escala de grises detectando al stylus con luz infrarroja.....	45
Figura 24. "Punto caliente" reflejado en la pantalla y adquirido por la cámara.....	46
Figura 25. Diferentes tipos de umbrales aplicados a la imagen original. De izquierda a derecha: imagen original, valor umbral muy bajo, valor de umbral muy alto, y umbral apropiado.	47
Figura 26. Antes (izquierda) y después (derecha) de aplicarse el suavizado en el algoritmo de envoltura convexa.	48
Figura 27. De izquierda a derecha, captura aplicada con thresholding, eliminación de objetos pequeños, y por último, aplicar un algoritmo de envoltura convexa.	48
Figura 28. Set de gestos. a) apuntado o click, b) Movimiento a una dirección, c) zoom-In, d) zoom-Out, e) rotación a la derecha, f) rotación a la izquierda.....	49
Figura 29. Diagrama de factores en un juego de ajedrez interactivo.	50
Figura 30. Interfaz de ajedrez diseñada para interactuar vía online.....	50
Figura 31. Matriz QFD.....	54
Figura 32. Ejes en el manipulador robótico cartesiano.....	65
Figura 33. Eje portal.....	65
Figura 34. Ejes extensible y telescópico respectivamente.	65
Figura 35. Diferentes vistas del manipulador cartesiano para este proyecto. a) vista frontal, b) vista superior, c) vista lateral, d) vista isométrica.....	67
Figura 36. Numeración de partes el manipulador robótico cartesiano.....	68
Figura 37. Viga de 20 mm de diámetro de acero inoxidable soportada por acoples de SK20.....	69
Figura 38. DCL de la viga de 20 mm de diámetro y 900 mm de largo del eje longitudinal	70
Figura 39. DCL de una viga estáticamente indeterminada.	71
Figura 40. Cilindro y sus ejes.....	72

Figura 41. Deflexión en software CAE.....	73
Figura 42. Análisis de esfuerzos en la viga de 20 mm mediante software CAE.	74
Figura 43. Diagrama del cortante del perfil en X de Aluminio 7075 T6.	75
Figura 44. Diagrama de momentos en el perfil en X de Aluminio 7075 T6.....	75
Figura 45. Esfuerzos aplicados en el perfil en X de Aluminio 7075 T6.....	76
Figura 46. Diagrama del cortante del tubo cuadrado de Aluminio 7075 T6	77
Figura 47. Diagrama de momentos en el tubo cuadrado de Aluminio 7075 T6.	77
Figura 48. Diagrama del esfuerzo aplicado en el tubo cuadrado de Aluminio 7075 T6.	78
Figura 49. Diagrama del cortante del eje de 8 mm de acero AISI 304.....	79
Figura 50. Diagrama del momento flector del tubo cuadrado de acero AISI 304.. ...	79
Figura 51. Diagrama del esfuerzo aplicado del tubo de acero AISI 304.	80
Figura 52. Diagrama del cortante del ángulo en L de hierro..	81
Figura 53. Diagrama del momento flector del ángulo en L de hierro.....	81
Figura 54. Diagrama del esfuerzo aplicado al ángulo en L.....	81
Figura 55. Soportes SK20..	82
Figura 56. Columna izquierda del robot cartesiano.	83
Figura 57. Vista explosionada de la columna izquierda..	83
Figura 58. Placas de PMMA para una columna de la estructura Gantry, a) Columna lateral, b) Columna lateral posterior.....	84
Figura 59. Representación de una columna articulada y empotrada.....	85
Figura 60. Gráfico de un prisma rectangular con ejes de los centroides.....	86
Figura 61. Momentos que se generan debido a la base articulada y el tope empotrado.	88
Figura 62. Componentes del eje transversal..	88
Figura 63. Deflexión resultante. Deformación exagerada en escala de 142 a 1.	89
Figura 64. Esfuerzo de Von Mises resultante. Deformación exagerada en escala de 142 a 1.	89
Figura 65. Soporte de eje y piñón GT2, y chumaceras KFL08 para el eje longitudinal.	90
Figura 66. Esfuerzo de Von Mises resultante. Deformación exagerada en escala de 4000 a 1..	91

Figura 67. Deflexión en el eje perpendicular al eje. Deformación exagerada en 4000 a 1.....	91
Figura 68. Conjunto de soporte para la correa del eje transversal (Partes no mostradas para mejor visualización).....	92
Figura 69. Esfuerzo de Von Mises resultante en la estructura. Deformación gráfica exagerada en 160 a 1.....	92
Figura 70. Deflexión resultante en la estructura, Deformación grafica exagerada en 160 a 1.....	92
Figura 71. Dureza y su respectivo factor.....	94
Figura 72. Temperaturas y sus respectivos factores.....	94
Figura 73. Distribución de fuerzas y reacciones en el carro hecho con guías deslizantes.	96
Figura 74. Guías deslizantes en el carro longitudinal.....	97
Figura 75. Guías deslizantes en el carro transversal.....	99
Figura 76. Guías deslizantes en el carro vertical.....	102
Figura 77. Placa base del sistema de movimiento en el eje vertical.....	104
Figura 78. Esfuerzos provocados en el sistema de eje vertical. Imagen deformada en escala de 85 a 1.....	105
Figura 79. Deflexión en el sistema de eje vertical. Imagen deformada en escala de 85 a 1.....	105
Figura 80. Ejes verticales de acero inoxidable 304 en el sistema.....	106
Figura 81. Fuerzas aplicadas al eje del sistema de ejes vertical.....	106
Figura 82. Diagrama del cortante en la viga de 8 mm del eje vertical.....	107
Figura 83. Diagrama de momentos flectores en el eje de 8 mm del eje vertical.. ...	107
Figura 84. Esfuerzos en la viga de 8 mm del eje vertical.....	108
Figura 85. Deflexión en la viga de 8 mm del eje vertical.....	108
Figura 86. Empotramiento SHF8 para ejes de 8 mm.....	108
Figura 87. Representación de los elementos del robot Gantry.....	110
Figura 88. Movimientos positivos de los ejes.....	115
Figura 89. Esquema de las correas y piñones acoplados al motor con sus respectivas variables.....	116
Figura 90. Mecanismo de tornillo sin fin y tuerca con sus parámetros de cálculo.....	120

Figura 91. a) Correa trapezoidal, b) Correa curvilínea..	122
Figura 92. Distancia entre centros de la correa en el eje longitudinal	123
Figura 93. Distancia entre centros en el eje transversal..	124
Figura 94. Tensiones en la correa GT2..	125
Figura 95. Eje con piñón sobresaliente.	126
Figura 96. GT2 Clamp..	128
Figura 97. GT2 Clamp en el soporte de la columna, 1) y 2) agujeros para la correa, 3) orificio para el tornillo del GT2 Clamp	128
Figura 98. GT2 Clamp en el soporte del sistema de eje vertical. 1) y 2) agujeros para la correa, 3) orificio para el tornillo del GT2 Clamp..	128
Figura 99. Tuerca tipo T de 8 mm de bronce (izquierda), junto con el tornillo sin fin de acero inoxidable de 8 mm (derecha).	129
Figura 100. Tornillo sin fin y tuerca con sujeción doble en un lado y simple en otro.	129
Figura 101. Eslabones del robot cartesiano.....	133
Figura 102. Articulaciones del robot cartesiano	133
Figura 103. Ejes de traslación.	134
Figura 104. Sistemas de referencia pertenecientes a cada eslabón	134
Figura 105. Modelo cinemático del robot.....	136
Figura 106. Espacio de trabajo del robot	138
Figura 107. Dimensiones del espacio de trabajo.....	139
Figura 108. Mecanismo de paralelogramo articulado.....	147
Figura 109. Pinza diseñada con mecanismo del paralelogramo.	147
Figura 110. Trazo de movimientos en los eslabones 2 y 4	148
Figura 111. Análisis del desplazamiento angular del eslabón L2.....	148
Figura 112. Análisis del desplazamiento angular del eslabón L4.....	148
Figura 113. Trazo de movimientos en la apertura y cierre del efector por medio del mecanismo de barras paralelas.	153
Figura 114. Distancia ideal para el efector final	154
Figura 115. Desplazamiento lineal obtenido en el dedo derecho del efector.....	154
Figura 116. Desplazamiento angular obtenido en la articulación 6.	155
Figura 117. Análisis estático URES (desplazamiento estático) en el dedo del efector final.	156

Figura 118. Análisis estático de tensión nodal en el dedo del efector final	157
Figura 119. Análisis del factor de seguridad del dedo del efector final.....	157
Figura 120. Análisis estático URES (desplazamiento estático) en el efector final ..	158
Figura 121. Análisis estático de tensión nodal en el efector final.....	159
Figura 122. Análisis del factor de seguridad del dedo del efector final.....	159
Figura 123. Ensamble del efector final	160
Figura 124. Superficies de contacto existentes en el área efectiva del efector final	162
Figura 125. Ensamble del efector final con acoples	162
Figura 126. Fuerzas ejercidas en el efector final con mínima apertura	163
Figura 127. Posición inicial de las piezas en el tablero.	166
Figura 128. Especificaciones de diseño del rey.	167
Figura 129. Módulos del sistema con sus respectivos protocolos de comunicación	168
Figura 130. Diagrama de flujo del sistema	169
Figura 131. Topología de redes.....	171
Figura 132. Arquitectura de software.....	173
Figura 133. Diagrama de flujo del software desarrollado en el módulo de control.	174
Figura 134. Diagrama de flujo del software desarrollado en el controlador del robot	176
Figura 135. Diagrama de flujo del tipo "movimiento normal"	178
Figura 136. Diagrama de flujo del tipo "movimiento con captura"	179
Figura 137. Diagrama de flujo del movimiento "Enroque"	180
Figura 138. Diagrama de flujo del movimiento "promoción"	181
Figura 139. Toque infrarrojo con tecnología DL.	182
Figura 140. Toque resistivo 5-Wire..	183
Figura 141. Toque capacitivo superficial.....	184
Figura 142. Toque capacitivo proyectado.....	184
Figura 143. Toque SAW de ondas acústicas de superficie.	185
Figura 144. Componentes para la configuración RDI de este proyecto..	189
Figura 145. PlayStation Eye Camera..	190
Figura 146. Tamaño de la pantalla efectiva. (Vista superior del proyecto, robot en transparencia)..	191

Figura 147. Distancia focal dependiendo del ángulo de enfoque; distancia y campo de visión en pulgadas.....	193
Figura 148. Distancia (delta Y) del lente hasta la pantalla igual a 700.36 mm, medida en el software CAD/CAE.	194
Figura 149. Conteo de partículas de luz frente a la longitud de onda al pasar por el filtro del disco floppy usado.....	195
Figura 150. Lente infrarrojo del PlayStation Eye. A la derecha, lente original. A la izquierda, lente-filtro infrarrojo removido..	195
Figura 151. Reflector de LEDs infrarrojos de la compañía T8X15-140.....	196
Figura 152. Disposición de los reflectores infrarrojos T8X15-140 dentro de la mesa (mesa y robot invisibles para esta imagen)..	197
Figura 153. Proyector Epson PowerLite S17.....	197
Figura 154. Software calculador de distancias de proyección de Epson..	198
Figura 155. Distancia que la imagen del proyector recorre al rebotar en el espejo..	199
Figura 156. Materiales en la pantalla..	200
Figura 157. Lona Gray de la compañía Rosco.....	201
Figura 158. Diagrama de la creación de un objeto digital para ser usado en algún software de aplicación..	202
Figura 159. Diagrama cíclico en el reconocimiento y generación de burbujas operables.....	205
Figura 160. Propiedades Ajustables para la PlayStation Eye..	206
Figura 161. Enfoque correcto no distorsionado por la perspectiva.....	206
Figura 162. Filtro Gaussiano de difuminación y ruido..	208
Figura 163. Imagen en CCV después del filtro de thresholding a la imagen en escala de grises..	208
Figura 164. Objeto con función de cáscara convexa. Izquierda: original, derecha: después del algoritmo.....	209
Figura 165. Segmentación a partir del thresholding, también se aprecia el contorno y el centroide.....	209
Figura 166. IDs de sesión.....	211
Figura 167. Esquema del proceso de la visión artificial y el protocolo TUIO en el sistema.....	212

Figura 168. Área original captada por el CCV..	213
Figura 169. Posiciones calibradas y piezas comprobando la nueva posición.....	213
Figura 170. Logo de Unity5 3D..	214
Figura 171. Logo de ActionScript.....	214
Figura 172. Logo de processing.	214
Figura 173. Componentes del software de aplicación..	217
Figura 174. Esquema de las pantallas y su interacción entre ellas.....	218
Figura 175. Medidas del tablero proyectado.....	219
Figura 176. Diagrama de flujo para el algoritmo de visión artificial.....	219
Figura 177. Inspector de la librería touchscript en Unity. Aquí se configuran parámetros del control general y del puerto para el TUIO.....	220
Figura 178. Ejemplo de código en C# que tuvo que ser implementado conjuntamente con touchscript.....	220
Figura 179. Diagrama de flujo para el algoritmo de conexión vía TCP.	222
Figura 180. Validación al seleccionar la pieza de ajedrez.	223
Figura 181. Condiciones al invocar inicialmente las piezas.	223
Figura 182. Diagrama de flujo del algoritmo de control con motor de ajedrez.	224
Figura 183. Diagrama de flujo del algoritmo de control sin robot.	225
Figura 184. Zona delimitada para detectar el centroide del toque detectado.....	226
Figura 185. Diagrama de flujo para delimitar el cuadro.....	227
Figura 186. Error de pieza colocada en el lugar incorrecto..	228
Figura 187. Algoritmo para acceder a la base de datos de movimientos y reglas....	228
Figura 188. Piezas creadas en software CAD y renderizadas para usarse en Unity.	229
Figura 189. Animación de menú.	230
Figura 190. Animación del movimiento de una pieza	230
Figura 191. Conexión de los drivers a los motores a pasos.	233
Figura 192. Placa PCB para el proyecto.	236
Figura 193. Placa PCB para el proyecto con los elementos representativos.	236
Figura 194. Condensadores de desacople en la placa PCB simulada.	237
Figura 195. Circuito antirebote para un pulsador en la placa PCB simulada	238
Figura 196. Fusible y diodo antiretorno en la placa PCB simulada.....	238
Figura 197. Conexión general del sistema electrónico.	239

Figura 198. Pulido del ángulo de acople de columnas.....	250
Figura 199. Cortes en tubos	251
Figura 200. Fabricación de agujeros en tubo cuadrado de aluminio.....	251
Figura 201. Proceso de trazado para la mesa de madera.....	251
Figura 202. Proceso de corte para la mesa de madera	251
Figura 203. Proceso de clavado y lijado para la mesa de madera.....	252
Figura 204. Ensamble de la mesa de madera	252
Figura 205. Armado del Eje Vertical.	253
Figura 206. Sistema de ejes vertical armado con el gripper.	254
Figura 207. Sistema de eje vertical acoplado a los ejes transversales.	254
Figura 208. Armado del Eje Transversal.	255
Figura 209. Eje transversal armado casi en su totalidad.	255
Figura 210. Armado del Eje longitudinal.....	256
Figura 211. Ensamble completo del robot.	256
Figura 212. Ensamble del robot sujeto a la mesa con los ángulos en cada extremo.....	257
Figura 213. Renderizado del dedo del efector final	257
Figura 214. Tiempo de impresión 3D del dedo del efector final	258
Figura 215. Dedos del efector final impresos en 3D.....	258
Figura 216. Ensamble de la pinza del efector final.....	259
Figura 217. Ensamble del efector final	259
Figura 218. Ensamble del robot con el gripper.	260
Figura 219. Ensamble del efector final con el eje Z.	260
Figura 220. Control de la impresión 3D.....	264
Figura 221. Impresión 3D de las piezas de ajedrez.....	264
Figura 222. Piezas de ajedrez impresas en 3D	264
Figura 223. Juego completo de las piezas blancas.....	265
Figura 224. Soporte QualGear (izquierda) y montaje del proyector en el soporte en la caja (derecha).....	265
Figura 225. Ángulos en L para sostener los reflectores infrarrojos.	266
Figura 226. Mesa sin la pantalla (izquierda), solapa para soportar la pantalla (centro), mesa con la pantalla colocada (derecha).	266

Figura 227. Soporte y cámara Playstation Eye.	267
Figura 228. Cableado de todos los elementos electrónicos.....	267
Figura 229. Componentes interiores de la mesa.	268
Figura 230. Componentes electrónicos del sistema de control y su cableado.	269
Figura 231. De izquierda a derecha: pulido, limpieza e impresión en el cobre.	270
Figura 232. De izquierda a derecha: suelda de elementos, placa terminada.....	270
Figura 233. Fuente y circuito electrónico dentro de la mesa.	270
Figura 234. Panel de control en el sistema implementado.....	271
Figura 235. Calibración con el offset presente en el tablero.....	274
Figura 236. Posicionamiento del robot en diferentes casillas de ajedrez.....	275
Figura 237. Secuencia del movimiento de captura de pieza y prueba de agarre	276
Figura 238. Latencias presentes en la cámara PlayStation Eye.	278
Figura 239. Latencia entre la pantalla del computador y la pantalla proyecta del proyector EPSON PowerLite S17.	279
Figura 240. Efecto de imagen trapezoidal por el ángulo de inclinación del proyector.....	281
Figura 241. Ángulo del lente del proyector.	281
Figura 242. Aprovechamiento de la pantalla proyectada.....	282
Figura 243. Ángulo y distancia para calibrar la mejor recepción de luz.....	283
Figura 244. Imagen del CCV con los reflectores encendidos y funcionando.....	284
Figura 245. Rangos aceptados para el parámetro de umbral (<i>Threshold</i>).....	286
Figura 246. Rangos aceptados para el parámetro de Difuminado (<i>Blur</i>).....	287
Figura 247. CCV con los valores configurados para este proyecto.	288
Figura 248. Puntos de calibración de los vértices.	289
Figura 249. Área desfasada originalmente.....	289
Figura 250. Proceso de calibración. a) Punto sin tocar, b) pieza de ajedrez calibrando la posición.....	289
Figura 251. Posición calibrada.....	290
Figura 252. Puntos en CCV y en Unity.	291

RESUMEN

La robótica y los algoritmos de juego son temas que se han venido investigando conjuntamente en las últimas décadas con la intención de mejorar la interacción de los humanos con la tecnología. En el presente proyecto se analiza y diseña una solución tecnológica referente a la premisa anterior, creando un sistema automatizado de ajedrez enfocado en la enseñanza del juego con la mayor interactividad posible. Puntualmente, se detalla el proceso de diseño e implementación de un módulo robótico de configuración cartesiana con una interfaz visual retro-proyectada e interactiva mediante gestos multi – táctiles. El sistema se ha concebido para ser totalmente autónomo y ejecutar jugadas reales de ajedrez en contra del jugador (capítulo 3). Para ello, se ha realizado una extensa investigación en el estado del arte (capítulo 2) de los sistemas de manipuladores robóticos aplicados al ajedrez, sistemas de retroproyección, tecnologías multi-táctiles, comunicación, motores de ajedrez, hardware general, y algoritmos de aplicación para video juegos. El módulo de juego robótico de ajedrez descrito en este proyecto tiene 2 enfoques principales: El primero, es la investigación del alcance en cuanto a la enseñanza de ajedrez haciendo uso de la tecnología. El segundo, es la demostración de la viabilidad tecnológica para interconectar sistemas tecnológicos poco afines y complejos de combinar, como son, la visión artificial y reconocimiento multi-táctil, el software de predicción de ajedrez, el sistema de control del manipulador robótico, y el software de aplicación. El proyecto pretende ser un modelo inicial, y una guía para cualquier investigador que se encuentre resolviendo problemas tecnológicos similares.

PALABRAS CLAVE:

- VISION POR COMPUTADORA
- ROBOT CARTESIANO
- ROBOT DE AJEDREZ
- MOTOR DE AJEDREZ
- INTERFAZ MULTI – TÁCTIL
- INTERACCIÓN HUMANO – MÁQUINA.

ABSTRACT

Robotics and Game Algorithms have been investigated jointly in recent decades, in order to improve the interaction that humans have with technology. In the present investigation project, a technological solution based on the previous premise is analyzed and designed, with the development of an automatized chess system aimed in game teaching with the greatest possible interactivity. In time, the present project explains and details the design process of a Cartesian robotic module with a retro – projected visual system interactive trough multi – touch gestures. This system has been created to be totally autonomous and could perform real chess plays against the player (chapter 3). Also, an extensive investigation has been made in the state of art (chapter 2) in the systems listed: robotic manipulators systems applied for chess gaming, retro – projection systems, surface multi – touch technologies, communication technologies, chess engines, hardware, and videogames software. The robotic game module for chess described in this project has 2 main approaches: The first one, is the investigation of the scope in chess teaching to kids using technology. The project is intended to work as a tutor of chess. The second scope is the technic demonstration that allows the interconnection of technological systems which are complex and low related for combination. The systems are artificial vision, multi – touch recognition, chess engine for plays predictions, and the Control system of the robotic manipulator. It is intended to be an initial model – guide to any investigator who is resolving similar technological problems.

KEYWORDS:

- COMPUTER VISION
- CARTESIAN ROBOT
- CHESS ROBOT
- CHESS ENGINE
- MULTI – TOUCH INTERFACE
- HUMAN – MACHINE INTERACTION.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En el presente capítulo se detallan los antecedentes, justificación, alcance y objetivos que determinaron el desarrollo del módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez. Se presenta la importancia de la resolución del problema del trabajo de investigación y la inclusión del robot como material didáctico. Para alcanzar este fin se describe y presenta diferentes investigaciones existentes relacionadas. Se detalla de manera general el contenido de los siguientes capítulos.

1.2. Definición del problema

Antecedentes

Invespol CÍA. LTDA. es una empresa pionera en los campos de las investigaciones y la poligrafía. El servicio que ofrece integra un sistema de investigación médico científica, polígrafo y detección de mentiras que permite realizar pruebas de confiabilidad en el ámbito empresarial.

La empresa Invespol CÍA. LTDA. busca investigar y solucionar necesidades en el ámbito pedagógico y a la vez lúdico. Por lo cual se ha planteado la construcción, el diseño y la implementación de un módulo de ajedrez robótico, didáctico; para luego incorporarla en la lista de los múltiples servicios que ofrece.

Con esta premisa de la empresa, es necesario investigar algunos estudios y proyectos que se han realizado en el ámbito de la automatización aplicada al ajedrez y los beneficios de combinar estas áreas para conocer el estado del arte de este proyecto.

Según Francisco J. Fernández en su libro titulado “El ajedrez de la filosofía”, el cual presenta que a lo largo de la historia del ajedrez se han realizado varios estudios e investigaciones, usando búsquedas sistemáticas para diseñar algoritmos y programas de ajedrez por ordenador, tratando de averiguar qué beneficios genera la práctica de este deporte considerado una ciencia. En especial se ha trabajado

extensivamente en algoritmos de ajedrez en estas últimas décadas: en 1950 Alan Turing escribió el primer programa de ajedrez, haciendo uso de las reglas simplificadas y básicas debido a la baja potencia de cálculo disponible en esos momentos. En 1957, el primer programa de ajedrez completamente funcional fue desarrollado, a pesar que inicialmente fue demasiado débil para ganar contra un oponente humano. Hubo que esperar hasta 1996, cuando la computadora *Deep Blue* de la IBM derrotó al maestro de ajedrez Garry Kasparov como se muestra en la Figura 1. (Fernández, 2010).



Figura 1. Deep Blue vs Kasparov

Fuente: (J. Fernández, 2010)

Más adelante en la historia existen antecedentes que aportan al estado del arte de trabajos de investigaciones referentes a la robótica aplicada al ajedrez desarrollados por varias universidades y organizaciones empresariales. En la Universidad KU Leuven de Bélgica fue presentado en el Departamento de Ciencias de la computación el paper titulado “*MarineBlue: A Low-Cost Chess Robot*” por Urting & Berbers (Urting & Berbers, 2003), en el cual se presenta un novedoso brazo robótico de bajo costo llamado MarineBlue capaz de jugar ajedrez de manera autónoma debido a que tiene la capacidad de reconocer y calcular los movimientos ejecutados por un oponente humano en tiempo real. Dando como resultado un robot rentable autónomo ajedrecista.

Dentro del campo de los robots industriales, también se han realizado trabajos de investigación con aplicación al ajedrez. En el Instituto Politécnico de Bragança de Portugal fue presentado en el Departamento de Electrotecnia el paper titulado “*Chess*

robot system: a multi disciplinary experience in automation” por Lima, Leitaó y Goncalves (Gonçalves, Lima, & Leitão, n.d.), en el cual se describe un sistema de ajedrez adaptado al robot antropomórfico ABB IRB 1400 de seis articulaciones, el tiene una pinza electro-neumática de dedos paralelos que toma y coloca piezas de ajedrez de manera teledirigida. Cuenta también con un sistema de visión artificial simple para jugar al ajedrez como se muestra en la Figura 2.

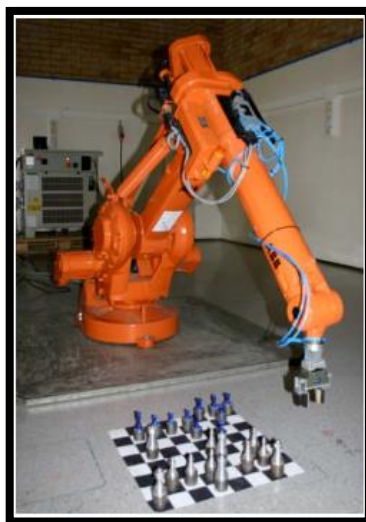


Figura 2. Robot ABB IRB 1400 moviendo piezas de ajedrez
Fuente: (Lima, Leitaó, & Goncalves, 2010)

Dentro del campo pedagógico, existe un estudio en la Universidad de Bucarest de Rumania titulado:”*Cognitive Benefits of Chess Training in Novice Children*” por Gliga & Flesner (Gliga & Flesner, 2014), cuyo objetivo es determinar el papel que tiene la formación de ajedrez con en el rendimiento escolar, la memoria, la atención sostenida y la creatividad. Ellos realizan una investigación de campo con una población de 20 estudiantes en la escuela primaria con novatos que participaron en clases de aprendizaje combinado con ajedrez. Los resultados muestran que se incrementaron las habilidades cognitivas del pre-test al post-test en ambos grupos, pero la prueba de rendimiento de la escuela aumentó significativamente en el grupo.

En otro estudio enfocado a los beneficios del aprendizaje del ajedrez, Olías y Plaza (2009) expresan:

“El ajedrez ejercita la memoria: ya sea la memoria a corto plazo, para recordar los movimientos que se han realizado durante la partida, o a largo plazo, para no olvidar otras partidas jugadas, la multiplicidad de alternativas a las que se enfrenta el jugador de ajedrez tiene como resultado una mejora en su capacidad de retener y recordar datos en la mente.” (p.145).

Las investigaciones citadas anteriormente dan inicio a este trabajo, puesto que impulsan a este juego como una estrategia motivacional para que los usuarios obtengan un aprendizaje significativo y se pueda estimular las potencialidades.

Marco institucional

Invespol CÍA. LTDA., servicios industriales de seguridad y tecnología, es una empresa privada que nace en el año 2000, con el fin de ofrecer servicios en todo lo referente a:

- Diseño e implementación de polígrafos.
- Investigación y estudio de seguridad para edificios
- Diversificación de productos, juguetes educativos lúdicos para niños.

Está ubicada en Edificio Amazonas N23-71 y Av. Amazonas, oficina 201. Se rige por la Constitución de la República del Ecuador, el Código de Trabajo, la Ley de Compañías, y otras leyes conexas, su Estatuto y reglamentos expedidos de acuerdo con la Ley y normas emitidas por sus autoridades.

Misión

Brindar un eficiente y especializado servicio de investigaciones y poligrafía a todos nuestros clientes.

Visión

Constituirse en la empresa líder en servicio de investigaciones y poligrafía a nivel nacional.

Valores Institucionales

- Puntualidad, que nos permita entregar nuestros trabajos con los tiempos establecidos.
- Compromiso, para cumplir con las normas y especificaciones a fin de satisfacer las necesidades de nuestros clientes.
- Confianza, para establecer un lazo de comunicación directa con nuestros clientes.
- Seguridad, en todo momento, durante la fabricación, montaje y operación de nuestros productos.
- Respeto, con el entorno y medio ambiente (Invespol CÍA. LTDA., 2000).

1.3. Justificación e importancia

En la actualidad la práctica del juego del ajedrez considerado una ciencia, es recomendado por diferentes psicólogos, debido a la estimulación en el desarrollo de muchas habilidades, potencialidades y capacidades propias de cada ser humano, varios países de América como Estados Unidos, Brasil y Cuba; así como países de Europa tales como Rusia y España han visto la necesidad de integrar al ajedrez como disciplina de enseñanza y aprendizaje en los niveles de formación, siendo una base en la educación del niño desarrollando la creatividad, memoria a largo y corto plazo y pensamiento crítico de acuerdo a Fernández (Fernández, 2010).

“La práctica del ajedrez es indispensable para el desarrollo mental en niños y adolescentes ya que este deporte ayuda a ejercitar la memoria y a reforzar el proceso de razonamiento lógico-matemático.” (Torres, 2007)

La siguiente investigación está destinada a diseñar e implementar un módulo robótico multifuncional interactivo de ajedrez con propósitos didácticos que contribuya al aprendizaje, y ser utilizado como herramienta pedagógica.

Teniendo en cuenta que una parte significativa de los estudiantes de primaria y secundaria tienen deficiencias en el rendimiento y nivel de conocimientos en diferentes materias escolares, se reconoce en este proyecto la necesidad de fomentar

la incorporación y aplicación del ajedrez, en la medida que representa una herramienta de aprendizaje, lúdica; de valor incalculable.

Según (Howard Gardner, 1986); “el ajedrez es un deporte que tiene una notable influencia en la personalidad y en consecuencia es esencial contribuir a su aprendizaje en los estudiantes desde las edades más tempranas”. (Fernández Amigo & Palláres Porcar, 2009), “TIC para enseñar y jugar al ajedrez”. Considera que, el ajedrez es una ciencia - deporte ampliamente ventajoso para el desarrollo de los niños y adolescentes en el área intelectual brindando razonamiento crítico analítico, así como una alta capacidad de toma de decisiones y un excelente estímulo en el desarrollo de la atención, la concentración, la memoria y la intuición.

Se presenta también a las TIC'S (Tecnologías de la información y el conocimiento) como un aliado intelectual en el aprendizaje creativo y constructivo. “En los últimos tiempos lo que se ha hecho es aprender de la tecnología, es decir, dejar que la tecnología plantee la tarea, haga preguntas y evalúe la calidad de las respuestas, mientras se recibe, almacena y recupera la información.” (Fernández Amigo & Palláres Porcar, 2009).

De esta manera, con los trabajos presentados; se quiere aprovechar los avances tecnológicos para destinarlos como instrumentos lúdicos, es decir instrumentos que tengan la capacidad de crear un ambiente de armonía en los estudiantes que están inmersos en el proceso de aprendizaje del ajedrez básico. Una herramienta que se está incorporando muy bien en el área del entretenimiento es la pantalla multi-táctil, ya que es una tecnología que permite la superposición en tiempo real, de imágenes generadas por un ordenador y proyectadas por alguno de los múltiples dispositivos disponibles hoy en día. En un entorno de este tipo, el usuario puede, además, interactuar con efectos, trazos y luces proyectadas.

Gracias a la acogida que tienen las pantallas táctiles interactivas en el área del entretenimiento y *merchandising* se han decidido escogerlas como herramienta para unir las formas de aprendizaje tradicional con las nuevas tecnologías y así crear un aplicativo interactivo basado en efectos y trayectorias proyectadas interactivas como apoyo a la apropiación de los conceptos y jugadas básicas de ajedrez.

La Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE ha venido desarrollando nuevos proyectos de tecnología en varias áreas de la robótica que han tomado un papel importante en la investigación y el desarrollo. Además, propone la innovación, la ciencia y tecnología.

La carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, es impulsora de emprendimiento y tecnología; además busca alternativas para satisfacer diferentes problemas productivos del Ecuador.

Invespol CÍA. LTDA., una empresa que ofrece servicios en el ámbito de tecnología e innovación. Actualmente se encuentra desarrollando una nueva línea dirigida al segmento de niños y jóvenes, orientado a la enseñanza lúdica utilizando juguetes y dispositivos electrónicos.

Por tal razón, el diseño y la construcción del módulo robótico pedagógico de ajedrez, se acopla a los objetivos de la empresa mencionados. El módulo generará un impacto tecnológico y ayudará para que cumpla su objetivo estratégico e incremente su participación en el mercado. Lo cual concebirá una gama de posibilidades de aprendizaje del ajedrez y motivará a los principiantes en la práctica de éste, además ayudaría a consolidar los conocimientos en los aprendices, puesto que dicha aplicación además de los beneficios aportados propios de su esencia, motivarían y harán atractivo el aprendizaje a los estudiantes escolares, convirtiéndose en un mediador instrumental.

De acuerdo a lo anterior, la integración de las técnicas de proyección multi-táctil con estrategias pedagógicas en busca del aprendizaje de ajedrez, beneficiará a la comunidad ajedrecista en la enseñanza y aprendizaje de los principiantes, reduciendo el tiempo dedicado a la enseñanza del juego y haciéndolo didáctico, entretenido y agradable para las personas que quieran aprender. Vinculando las tecnologías de hardware y software de código abierto con el campo del entretenimiento y la pedagogía.

1.4. Área de influencia

El proyecto pretende innovar y mejorar la línea de investigación para el entretenimiento y el aprendizaje mediante juguetes para niños y adolescentes que

ofrece Invespol CÍA. LTDA. en la ciudad de Quito. Con la inclusión de nuevas tecnologías como pantallas multi-táctiles y manipuladores robóticos cartesianos. Los cuales permiten al usuario interactuar y aprender ajedrez con proyecciones de jugadas preestablecidas, movimientos posibles de la pieza seleccionada por el usuario; añadiendo la posibilidad de enfrentar a un manipulador robótico cartesiano capaz de interpretar las señales del controlador y predecir jugadas del adversario lo cual beneficia el tiempo de aprendizaje del usuario permitiendo potenciar la inversión de la empresa en una nueva línea de producción.

1.5. Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar un módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza de ajedrez en la empresa Invespol CÍA. LTDA.

Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un sistema robótico autónomo posicionador de piezas de ajedrez.
- Diseñar e implementar una interfaz multi-táctil con efectos visuales proyectados orientados a la enseñanza del ajedrez.
- Diseñar y construir piezas de ajedrez en CAD/CAM especiales para este proyecto acoplables para la interacción con la pantalla multi-táctil y el sistema posicionador de piezas de ajedrez.
- Crear un aplicativo interactivo basado en efectos y trayectorias proyectadas interactivas como apoyo a la apropiación de los conceptos y jugadas básicas de ajedrez.

1.6. Alcance

Se busca obtener un sistema modular que permita al niño o al joven jugar y aprender ajedrez en un tablero multi-táctil con proyecciones de jugadas en tiempo real,

de una manera interactiva mediante un manipulador robótico autónomo posicionador de piezas capaz de interpretar las señales del controlador y predecir jugadas del adversario a través del uso de software libre y visión artificial. El manipulador robótico será de tipo cartesiano y tendrá 3 grados de libertad. El efector final consistirá en dos pinzas con base giratoria para la captura de piezas, enroque y promoción. La estructura del tablero estará compuesto por cuatro iluminadores infrarrojos y una cámara infrarroja para la detección de movimiento y piezas, también dispondrá un proyector de imágenes que será el encargado de proyectar la interfaz interactiva con trayectorias proyectadas en tiempo real. Se utilizará visión artificial como instrumento de retroalimentación para la detección de posición de piezas. El desarrollo del juego usará inteligencia artificial de software libre llamada Stockfish la cual es la más potente en cuanto a predicción y tratamiento de jugadas.

1.7. Estructura del documento

El presente documento está conformado por cinco capítulos en los cuales se describirá toda la investigación, componentes y diseños necesarios para el desarrollo del módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez.

En el capítulo 1 se desarrollan los antecedentes necesarios para el desarrollo del módulo, una descripción general del proyecto. En base al planteamiento del problema, se detallan los objetivos, el área de influencia y el alcance del proyecto.

El capítulo 2 (Estado del Arte), presenta la disponibilidad tecnológica y los avances realizados en los conceptos de: manipuladores robóticos enfocados a interactuar con las personas y el ajedrez, y, en pantallas interactivas que hacen uso de gestos táctiles. Además se mencionan varias técnicas que se utilizarán para desarrollar el proyecto.

El capítulo 3 (Metodología y Diseño) se detalla la metodología usada para el diseño del prototipo, las alternativas de diseño y los conceptos seleccionados para la implementación del sistema.

El capítulo 4 (Construcción y Pruebas) muestra la construcción de los módulos obtenidos en el capítulo 3, el ensamble del sistema mecánico, electrónico y de

software. Se presentan además las pruebas realizadas en el dispositivo (tanto técnicas como sociales) y los resultados obtenidos en dichas pruebas.

En el capítulo 5 (Conclusiones y Recomendaciones) se resume puntualmente toda la investigación realizada mediante conclusiones, las cuales son obtenidas a partir del análisis de los resultados del capítulo 4. También se incluyen recomendaciones para futuros trabajos, mejoras en el diseño, y pautas utilizables para nuevos investigadores que se enfoquen en investigaciones similares.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

El presente proyecto se basa en una investigación bibliográfica científica que garantiza la calidad del artículo y que muestra el trabajo realizado adaptando las nuevas tecnologías en el módulo robótico de ajedrez con interfaz multi-táctil.

2.1. La Robótica

Según Barrientos, la robótica es una ciencia aplicada que integra tecnologías de electrónica, mecánica, eléctrica y sistemas de computación. Concierta destrezas de traslación y manipulación con habilidades de percepción y razonamiento implementados en una computadora y aplicadas en el robot. (Antonio Barrientos, 2007)

2.2. Robot industrial y su clasificación

Según la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), se puede definir a un robot industrial como un manipulador multifuncional reprogramable, con la habilidad de trasladar piezas o instrumentales siguiendo trayectos independientes y alternos, previamente establecidos en un programa para ejecutar aplicaciones específicas (Robotic Industries Association, 2010).

La Organización Internacional de Estándares (ISO) define al robot industrial como un manipulador que puede ejecutar multitareas caracterizado por varios grados de libertad, con la capacidad de manipular herramientas siguiendo trayectorias específicas (Antonio Barrientos, 2007).

Teniendo las premisas citadas, es necesario exponer una última definición dada por la Federación Internacional de Robótica (IFR) presentado en su informe técnico ISO 83737 (septiembre 1988) en el cual se expone que un robot industrial es una máquina de manipulación autómatas, reprogramable y multifuncional con varios ejes que pueden posicionar y orientar herramientas para la realización de distintas aplicaciones en varios niveles de producción (Antonio Barrientos, 2007). En la

Tabla 1 se especifica la clasificación de los manipuladores robóticos de acuerdo a la Asociación Francesa de Robótica Industrial.

Tabla 1.
Clasificación de los robots según La Asociación Francesa de Robótica Industrial

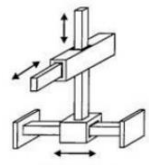
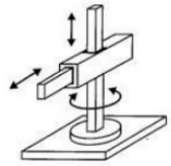
TIPO	CARACTERISTICA
A	Manipulador con control manual o telemando
B	Manipulador automático con ciclos prefijados; regulación mediante fines de carrera o topes; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de éstos.

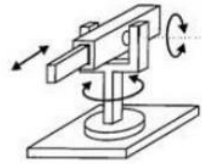
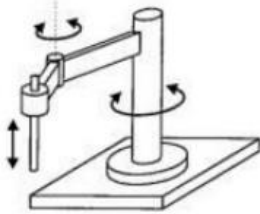
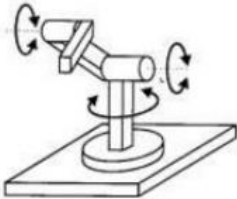
Fuente: (Barrientos Cruz, Peñín Honrubia, Balaguer Bernaldo de Quiroz, & Aracil Santoja, 1997)

2.3. Tipos de los robots Industriales

Los tipos de robots industriales actuales según Barrientos et al. (2007) son: cartesiano, cilíndrico, polar, SCARA, antropomórfico. Estos se describen con más detalle en la Tabla 2.

Tabla 2.
Clasificación de los robots industriales

Robot	Características	Aplicaciones	Figura
Cartesiano	3 actuadores lineales X,Y,Z y un opcional rotacional R	Tareas monótonas y físicamente pesadas	
Cilíndrico	2 movimientos lineales y uno rotacional	Traslado de materiales, ensamblaje, soldadura por punto	
			Continúa →

Esférico o polar	1 movimiento lineal y 2 rotacionales	Alto torque Transferir presión a una prensa de troquel. Alzar piezas pesadas	
Scara	2 movimientos rotacionales y un prismático	Rápidos ciclos de trabajo. Excelente repetibilidad. Aplicaciones industriales realizadas en un plano.	
Antropomórfico	3 movimientos rotacionales	Soldadura Pintura Pulido Paletizado Empacado Carga y descarga	

Fuente: (Barrientos Cruz et al., 1997).

2.4. Robot Cartesiano

En esta sección se muestran los avances tecnológicos, ventajas y desventajas de los tipos de diseños robóticos, y cómo influyen en el proyecto actual.

Hafiz Muhammad Luqman y Mubeen Zaffar en su trabajo “*Chess Brain and Autonomus Chess Playing Robotic System*” (2016) explican que el diseño mecánico del robot y el cálculo de las trayectorias de las jugadas, representan un reto amplio entre funcionalidad y limitaciones.

En su caso, decidieron aplicar un diseño combinado entre un robot antropomórfico y un cartesiano. Como explican, el diseño debe interactuar con el usuario humano siendo lo más liviano y visual posible, asemejando a la mano humana. No consideran el uso de robots industriales como KUKA o ABB por estar

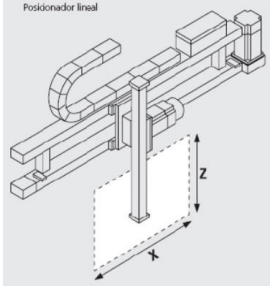
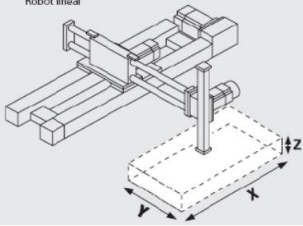

destinados a procesos industriales (cargar piezas pesadas o manipulación de objetos peligrosos), sin embargo, afirman que se ha hecho para mostrar su potencial.

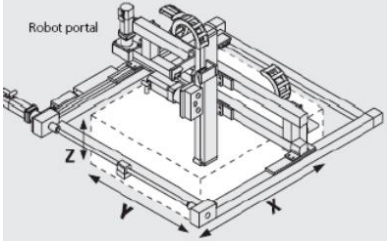
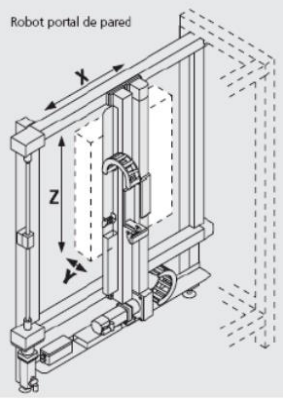
También indican que el diseño debe ser lo más eficiente y simple posible. Por ello, quitaron el giro (*yaw*) de su robot combinando un eje cartesiano con 2 ejes antropomórficos. De esta manera lograron evitar un grado de libertad adicional para la programación. Por esta razón se pretende que el robot de ajedrez aplicable para la presente tesis sea un robot cartesiano, pues evita complejidad innecesaria como por ejemplo en un robot antropomórfico.

Como se ha visto, controlar un diseño mecánico de manipulador con el menor número de grados de libertad, y la mayor funcionalidad, es el objetivo a alcanzar. Es necesario conocer el fundamento teórico y los diferentes tipos de robots cartesianos que existen para entender cómo afecta su disposición espacial en este proyecto.

Según la empresa Schneider Electric los robots se clasifican como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.
Tipos de robots cartesianos

Tipo	Descripción	Forma Característica
Posicionador Lineal	Se ubica sobre o debajo del área de trabajo, y se desplaza solo en 2 direcciones. Traslada cargas en espacios grandes.	
Robot Lineal	Se usa para manipular cargas con gran rapidez y en trayectorias cortas. Se encuentra justo al lado del área de trabajo.	
Continúa 		

Robot Portal	Ahorra espacio y mueve cargas en una gran área.	
Robot Portal de Pared	Misma funcionalidad que el robot portal pero en un plano perpendicular al suelo.	

Fuente: (Schneider Electric, 2013).

De acuerdo a la tesis de grado de Roberto Andino y Christian Salgado, “Diseño e implementación de una estación de entrenamiento con un robot cartesiano para el laboratorio de robótica y PLC’s del departamento de eléctrica y electrónica de la ESPE” (2012) existen ventajas y desventajas a considerar en los manipuladores cartesianos.

Ventajas

- Su capacidad de carga no es proporcional al último eslabón de este, como por ejemplo en el robot antropomórfico.
- La resolución espacial es la más fina y constante en todo el volumen de trabajo.
- La precisión y exactitud son mayores en este tipo de robots.
- El cálculo de la posición resulta muy sencillo frente a otro tipo de configuraciones robóticas.
- Son las estructuras con mejor estabilidad, y poseen la repetibilidad más confiable de todos los tipos de configuraciones robóticas.

Desventajas

- Su estructura comprende el mayor gasto de material
- Se necesita de mayor potencia para mover toda la estructura.

- El volumen de trabajo es menor que el volumen de la estructura.

Guangyue Du, Shuhui Bi, Yongfei Xiao y Wenguang Li demuestran en su artículo “The compliance control study of Chinese chess robot in Cartesian coordinate system” (2013), un robot cartesiano con la capacidad de jugar ajedrez en su versión china (Figura 3). Como parte del diseño cinemático del robot explican que el juego del ajedrez es un juego de movimiento esencialmente planar, por lo que un diseño de un robot que se desplace con soltura en el plano es lo más apropiado. En tal virtud concluyen que el diseño cartesiano es el indicado por desplazarse en el plano mejor que otros sistemas robóticos.

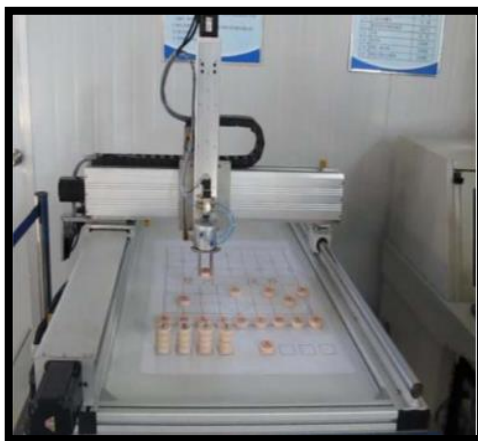


Figura 3. Robot cartesiano para jugar ajedrez versión china.

Fuente: (Du et al., 2013).

2.5. Trabajos relacionados a la Robótica aplicada al Ajedrez

En la mayoría de los estudios e investigaciones de robots que juegan ajedrez analizados en esta investigación, se usan estructuras con brazos sencillos de entre 3 y 6 grados de libertad, además el brazo robótico es generalmente implementado sobre una base fija con una cámara acoplada encima del tablero de ajedrez. Existen algunas excepciones como es el caso del robot humanoide REEM-A desarrollado por PAL Robotics, el cual posee 30 grados de libertad. REEM-A utiliza cámaras y sensores para adquirir información sobre la percepción del medio ambiente y brazos costosos para manipulación.

El robot *MarineBlue* desarrollado en 2003 es uno de los pocos robots simplistas en el juego del ajedrez. Fue construido con segmentos separados, servos en las extremidades, y con una cámara de alta calidad fijada directamente encima del tablero (Urting & Berbers, 2003).

Por lo que respecta al desarrollo de robots que juegan ajedrez construidos recientemente, se tiene a *Gambit* el cual tiene un brazo moderadamente costoso de 6 grados de libertad y utiliza dos cámaras para interactuar con el entorno y ejecutar la manipulación de las piezas en la mesa. *Gambit* también utiliza piezas de ajedrez y tablero modificados para ayudar al sistema de visión. (Matuszek & Mayton, 2011)

Finalmente, la asociación de inteligencia artificial (AAAI) y la Conferencia internacional de robótica y automatización (ICRA) organizó un campeonato de manipulación de piezas de ajedrez como tarea de la competencia. Participaron distintos robots resaltando a *Chiara robot* de la Universidad de Alabama, por ser el menos costoso en cuanto a implementación. (TEKKOTSU LAB, n.d.)

Las características de estos robots se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.
Comparación de trabajos relacionados

Robot	Año	Grados de libertad	Sensores	Características
Gambit	2010	6	2 cámaras	Cuesta más de 3000 dólares.
REEM-A	2005	30	Cámara estéreo	Humanoide con sensores adicionales.
Marine Blue	2003	5	Cámara Sony DFW de alta calidad	Cuesta 550 dólares y su tablero es modificado.
Chiara	2010	6	Logitech Webcam	Implementado con 24 servos <i>Dynamixel</i> .

2.6. Efecto final

- **Efecto**

Estudios realizados en el diseño y construcción del efecto final para robots con tareas específicas han concluido que el efecto final es un componente fundamental en la ejecución correcta de aplicaciones.

En la presente investigación el efecto final tiene una remarcable importancia para el manejo, posicionamiento y colocación de piezas de ajedrez. El cual se basó en investigaciones realizadas, siguiendo lineamientos, recomendaciones y corrigiendo errores en el diseño.

El estudio titulado “*MarineBlue: A Low-Cost Chess Robot*” por Urting & Berbers (2003), señala que para aumentar la precisión, y reducir problemas de oscilación y vibración, se debe construir la pinza con materiales livianos. Además recomiendan diseñarlo con 1 grado de libertad exclusivamente en aplicaciones para el posicionamiento de piezas de ajedrez.

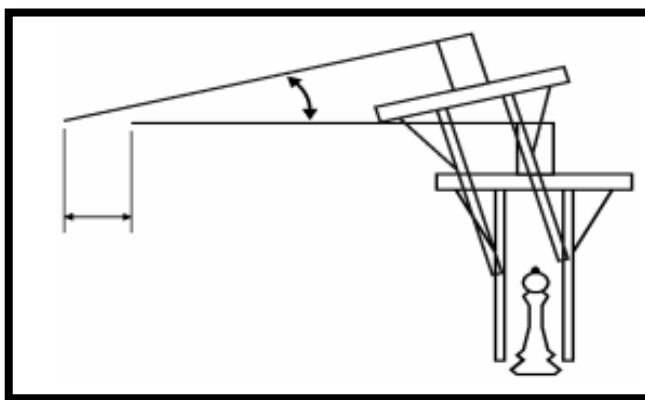


Figura 4. Mecanismo de barras paralelas para posicionamiento de piezas de ajedrez.

Fuente: (Urting & Berbers, 2003).

Por lo que respecta a la colisión con otras piezas y alteración de posicionamiento inicial y final, Urting y Berbers (2003) concluyen que la posición de las barras laterales del efecto deben ser mecanismos de barras paralelas, es decir en el momento de la apertura y cierre de la pinza las barras laterales deben siempre formar un rectángulo (Figura 4).

En la investigación titulada “*A Simple Autonomous Robotic Manipulator for playing Chess against any opponent in Real Time*” por Banerjee, Saha, Singh, y Sanyal (2012) se experimentaron errores en el momento del diseño del efector debido a su tamaño y el posicionamiento de piezas, lo cual fue solucionado estimando correctamente la posición inicial desde que la pieza que se desea mover es agarrada por la pinza y la altura media de la pieza de ajedrez; concluyendo que para evitar colisiones y no alterar el posicionamiento inicial, el tamaño de la pinza debe ser de la mitad del tamaño del rey y debe posicionarse en la altura media o en el mecanismo de agarre de la pieza de ajedrez (Figura 5), se añade como recomendación que se debería utilizar pinzas de barras paralelas. Urting y Berbers (2003) coinciden que para tener una mayor precisión se debe aumentar el tamaño de las pinzas y recomiendan disminuir el tamaño del tablero.

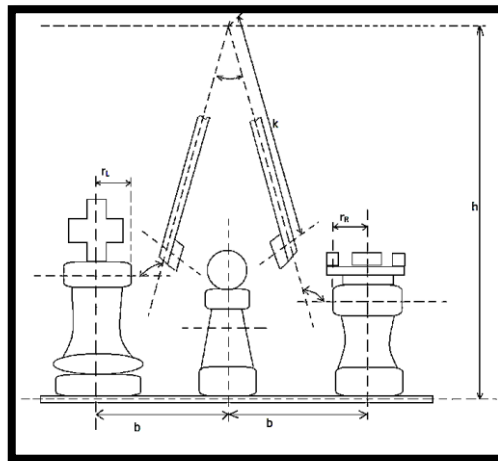


Figura 5. Agarre de pieza por efector final sin colisiones
Fuente:(Banerjee et al., 2012)

En el trabajo de investigación titulado “*Chess Brain and Autonomous Chess Playing Robotic System*” por Luqman y Zaffar (2016) se implementó un efector con criterios de diseño únicos para la aplicación y se tomó en cuenta la interferencia con las demás piezas en el momento de posicionamiento. Luqman y Zaffar recomiendan construir la estructura de aluminio con caucho por dentro para una sujeción firme y transmitir movimiento por medio de un tornillo sin fin controlado por motor DC (Figura 6).



Figura 6. Robot jugando ajedrez en la competición del proyecto de fin de año IEEE

Fuente: (Luqman & Zaffar, 2016)

2.7. Motor de ajedrez

En la presente investigación se integró un motor de ajedrez de software libre en lugar de desarrollar uno, debido a que el objetivo del proyecto se enfoca en la robótica, la integración de nuevas tecnologías, propósitos educativos y de entretenimiento.

El motor de ajedrez representa la inteligencia artificial por lo cual es necesario entender de manera general su concepto, según Banerjee, Saha, Singh, y Sanyal (2012) un motor de ajedrez es un programa que tiene la capacidad de jugar una partida de ajedrez contra un humano u otra inteligencia artificial, existen tanto de licencia pagada como de software libre y usan su respectivo protocolo. Sarker (2015) afirma: “Actualmente los motores de ajedrez son accesibles a cualquier consumidor. Pueden ser descargados gratuitamente desde Internet, por ejemplo, Stockfish, Crafty, Fruit, GNU Chess, etc. Estos motores pueden superar incluso a los jugadores que han sido campeones mundiales”.

Teniendo una premisa del concepto se resalta que los trabajos de investigación citados usan distintos motores de ajedrez que varían dependiendo la capacidad de procesamiento y el nivel de cálculos en un tiempo dado. Así en la investigación titulada “*Wizard chess: An autonomous chess playing robot*” por Sarker (2015) se utilizó una PC portátil con el motor de ajedrez llamado Crafty, manipulando actuadores por medio de la tarjeta de adquisición Arduino. En la citada investigación se recomienda que para tener un robot de ajedrez robusto y portable se debería utilizar el computador de placa reducida Raspberry Pi para el procesamiento de jugadas a través de la inteligencia artificial.

En la investigación titulada “*Chess robot system: A multi-disciplinary experience in automation*” por Goncalves José y Leitao Paulo (2004) se utiliza el motor de ajedrez GnuChess, el cual se caracteriza por:

- Comunicación y ejecución de comandos en modo texto.
- Software libre.
- Envío de datos de modo asíncrono,
- Protocolo xboard.

Se debe resaltar que estas características poseen la mayoría de inteligencias artificiales de ajedrez, diferenciándose una de otra por su robustez y el protocolo que usan para la comunicación.

Al igual que Goncalves José y Leitao Paulo (2004), Banerjee et al. (2012) en su estudio utiliza el motor de ajedrez GnuChess versión 6.0.1 para adquirir las jugadas que deberá ejecutar del robot de ajedrez, también utilizan el programa de software libre Qt para que interactue como interfaz del juego (Figura 7) . En el citado estudio se concluye que la comunicación de la inteligencia artificial con el sistema de procesamiento y captura de datos funcionó de manera eficaz recomendando altamente dicho motor de ajedrez.

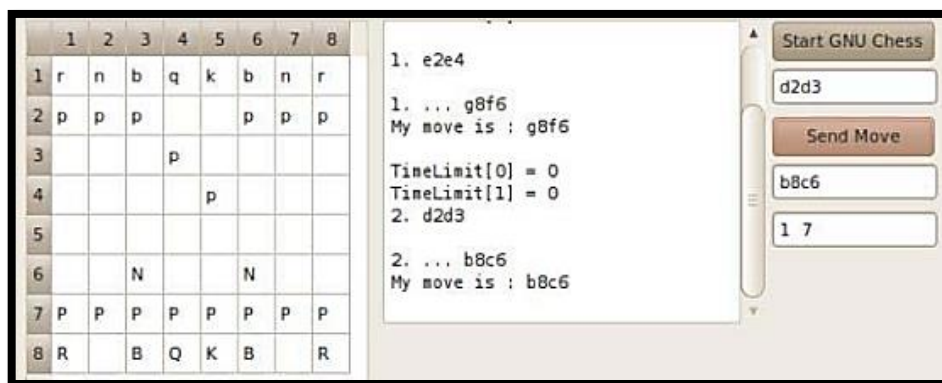


Figura 7. Interfaz del motor de ajedrez GNU Chess usando programa Qt.
Fuente: (Banerjee et al., 2012)

En el presente proyecto se utilizó el motor de ajedrez de software libre llamado Stockfish, el cual destaca por los siguientes puntos:

- Determina cómo responder a un movimiento de usuario mientras obedece reglas de ajedrez.
- La comunicación es de manera asíncrona lo cual permite que mientras la inteligencia artificial esté procesando se pueda continuar con el juego y la interfaz sin ralentizar ni parar la comunicación, además puede recibir varias cadenas de datos sin necesidad de confirmarlo.
- Lidera varios rankings a nivel mundial los cuales son evaluados según el tamaño de procesamiento, victorias y pérdidas frente a otras inteligencias artificiales. Actualmente se encuentra por delante del programa gratuito Houdini y del comercial Rybka2.
- Los movimientos de ajedrez son analizados, enviados, recibidos y procesados en notación algebraica de ajedrez, la misma que es estándar de la FIDE (*Federation Internationale des Echees*). Cada fila es representada por un número alfanumérico desde 1 hasta 8 y las columnas son nombradas desde la letra “a” hasta la letra “h” (Figura 8). Cada pieza de ajedrez es representada con la letra mayúscula inicial de su nombre en inglés, así la reina será representada con la letra Q, la torre con la letra R y el rey con la letra K. De esta manera la inteligencia artificial reconoce coordenadas de movimiento de las piezas colocando los códigos de los cuadros desde donde inicia el movimiento hasta donde termina por ejemplo h2e5. (Luqman & Zaffar, 2016).

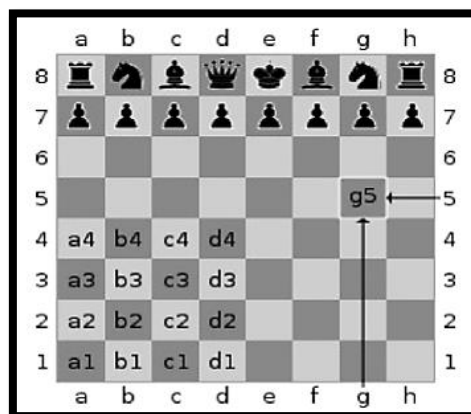


Figura 8. Notación algebraica de Ajedrez
Fuente: (Federation Internationale Echees, 2016)

En la investigación titulada “*Computer Vision Based Chess Playing Capabilities for the Baxter Human*”, Chen y Wang (2016) utilizan el motor de ajedrez Stockfish y

resaltan su alta confiabilidad y prestigio, además exponen cualidades únicas del motor de ajedrez como la selección de nivel, el cual se basa en el número de movimientos que el motor busca para encontrar el mejor. Mantiene un seguimiento de cada pieza durante el juego para saber cuándo ha concluido; se puede añadir programas de software libre basados en Python para añadir características como verificar si un movimiento hecho por el usuario es válido. Chen y Wang concluyen que el motor de ajedrez Stockfish fue esencial para que el robot Baxter (Figura 9) emule el comportamiento humano diferenciándose de otros robots. Además se añadió a la inteligencia artificial una cooperación con sistemas de visión artificial y subsistemas mecánicos dándole la capacidad de percibir, calcular y actuar lo cual es por mucho el enfoque de la presente investigación.

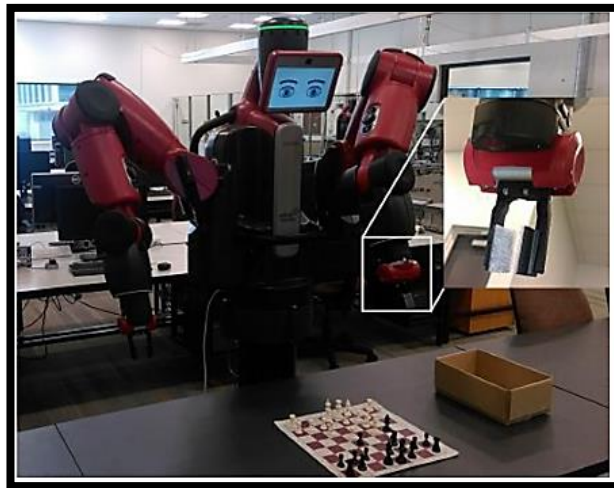


Figura 9. Robot Baxter, con cámara y efector final expandido

Fuente:(Chen & Wang, 2016).

Con las premisas citadas se determina que el motor de ajedrez Stockfish, es el que más se ajusta a las necesidades del proyecto en términos de funcionalidad. Finalmente para corroborar la presente afirmación se expone los resultados que se obtuvieron en el robot Baxter. Chen y Wang experimentaron que el subsistema del motor de ajedrez devuelve un movimiento en menos de un segundo, además ninguna persona promedio es capaz de vencerlo, todo esto dependiendo del nivel de dificultad programado.

2.8. Sistemas electrónicos

En esta sección se analizan las técnicas y dispositivos destinados a la transformación de las señales eléctricas en movimientos de motores, circuitos de protección, alimentación, comunicación, circuitos de control, y transmisión de potencia relacionados con la robótica y la visión artificial.

Nandan Banerjee, Debal Saha, Atikant Singh y Gautam Sanyal en su trabajo “*A Simple Autonomous Robotic Manipulator for playing Chess against any opponent in Real Time*” para el Instituto Nacional de Tecnología de Durgapur, India (2012) explican, entre otras cosas, los dispositivos eléctricos y electrónicos usados en su módulo robótico, y como fueron conectados para cumplir la función de mover las piezas y lograr jugar una partida de ajedrez.

En su caso, se usó un micro controlador ATMEL ATmega32 corriendo a 11.06 Mega Hertz tomando en cuenta la gran cantidad de pines digitales que posee. En dicho microprocesador van conectados los drivers de los motores a pasos, sensores y la comunicación serial necesaria para hacer controlable al robot desde el computador. En este diseño se logran ver las ventajas de centralizar la información que sale y entra al microcontrolador. Las señales de entrada de este robot en particular conectan: la salida de un potenciómetro que actúa como sensor rotativo del eje cilíndrico a los pines del ADC y un encoder que pasa por un filtro hecho con un amplificador operacional LM324 que de acuerdo a los autores, minimiza el riesgo de lecturas erróneas en largas distancias (debido al largo resultante de los cables eléctricos).

Nandan Banerjee et al. (2012), ratifica el uso de MOSFETs por sobre transistores de potencia por su bajo consumo de voltaje y su resistencia casi nula. Con esto se logra el máximo rendimiento de giro de los motores sin pérdidas eléctricas importantes y bajo consumo eléctrico. Además explican que el robot necesita de cierto grado de potencia por lo que un integrado L293 con un circuito de arreglo de transistores no es buena opción porque el integrado no posee una base de disipación. Los transistores de efecto de campo MOSFETs se aplican mejor en su proyecto.

Indican también que una comunicación eficiente con el computador para conocer el estado de la posición y otras variables, es importante. En tal virtud, usaron el puerto serial con inversores hexadecimales de Schmitt 74CHT14 para comunicarse con el

puerto UART del micro controlador, y finalmente con un adaptador de USB a Serial. Todo esto corriendo a una tasa de transferencia de 115.2 kbps.

Recomiendan integrarlo todo en una sola placa con alimentación AC convertido a DC con un rectificador y reductores de voltaje. En su caso se usó una placa Vero board (conocida comúnmente como galleta) prefabricada, para ensamblar los componentes.

Otros autores, Rubén Darío Godoy Hernández y Willy Rodríguez Quintero en su tesis de pregrado “Diseño y modelamiento de un robot cartesiano para el posicionamiento de piezas” (2007), en cambio usan puentes H (arreglos de transistores) puesto que su robot no está destinado a soportar demasiado peso.

Taj Mohammad Khan (PhD), Muhammad Arshad (PhD) y Prof. Dr. Muhammad Ahmad Choudry en su artículo “*Modeling and Control of Cartesian Robot Manipulator*” para la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Taxila (2013), desarrollaron un sistema cartesiano para optimizar el tiempo de procesamiento en el robot y mejorar la respuesta dinámica. Uno de los ámbitos desarrollados y mejorados por el grupo fue el controlador del dispositivo.

En él, Mohammad Khan et al. desarrollan un circuito con lógica de reseteo, un circuito con lógica de decodificación, y un controlador de movimiento dedicado. Esta configuración de los 3 módulos permite al procesador central deshacerse de tareas redundantes como el conteo de bits para mover los motores a pasos, o transformar las señales de los sensores, entre otros. Esto brinda fiidez y autonomía al sistema general. Por tanto, y para este proyecto, se ha tomado la idea de los autores y se ha planteado distribuir las tareas redundantes entre la inteligencia artificial de la Raspberry, el control de los motores y la adquisición de señal proveniente de los sensores del robot. Con esto se gana procesamiento vital en la placa Raspberry y se le encarga la tarea del control del robot a la placa Arduino.

En otro acercamiento de Shaizan Bin Jusoh y Khairuddin Omar en su trabajo “*The Mechanical and Circuit Design of Robot Soccer: A Study*” para la Universidad Nacional de Malasia (2011) se indica como el diseño electrónico debe ser preponderantemente modular. Sin embargo, afirman que debe intentarse agrupar todos los elementos en un solo circuito. Esto le da características de implementación

rápida, y permite evitar errores humanos de conexión en circuitos complejos conservando la característica modular del circuito. Por ende, lo que Jusoh y Omar proponen, es el desarrollo de un circuito de módulos adaptables a un circuito central (Figura 10).

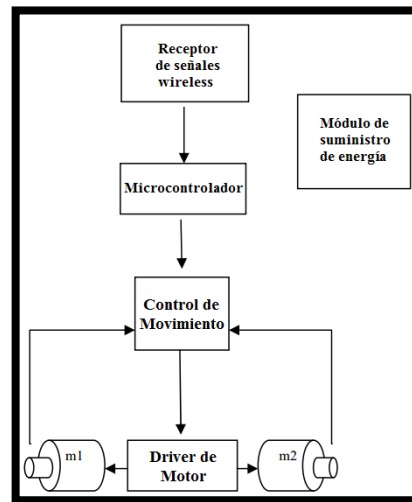


Figura 10. Vista del circuito del robot de fútbol.

Fuente: (Shaizan Jusoh, 2011).

Su diseño electrónico debe ser robusto debido a que estos modelos se usan en batallas recreativas de robots. Recomienda que para aplicaciones con una velocidad media a alta es necesario un control PID o afines (a través del PWM de los pines digitales, por ejemplo) en los motores, para dotarles de suavidad y rapidez en el movimiento. En el caso del robot de ajedrez esta opción es aplicable pues los ejes del plano en donde recorre el robot son largos y necesitan de cierta velocidad para que el juego sea más fluido y la estructura no sufra golpeteos por vibración. Jusoh y Omar también recomiendan usar circuitos prefabricados para competencias de robots sin importar la aplicación que el robot tenga. Esto debido a que dichos circuitos están diseñados y perfeccionados para soportar cambios rápidos, manejos bruscos y condiciones no óptimas.

Aplicado más al control del robot de ajedrez, Hafiz Muhammad Luqman y Mubeen Zaffar en su trabajo *“Chess Brain and Autonomus Chess Playing Robotic System”* (2016), demuestran las ventajas de conectar todos los dispositivos en un solo circuito PCB y a la vez sea modular. En su caso poseen módulos para controlar los motores a

pasos pero que son intercambiables por si llegasen a fallar. Explican también que un sistema de comunicación como el serial es importante para obtener una retroalimentación del estado del robot y verificar su funcionamiento. En su proyecto, el circuito debe comunicarse a través de un puerto serial con la palabra de la jugada predicha por la inteligencia artificial. Así, este puede decodificarla y transformarla en pasos del motor. Esta técnica tiene la ventaja de procesar dualmente la información, es decir entre el circuito de control y la inteligencia artificial. Esto evita que el procesador de la computadora haga todo el trabajo y se sature provocando errores.

Por último, se muestra un cuadro basado en las conclusiones y ventajas de poseer un controlador robusto por parte de todos los métodos de diseño de los autores vistos anteriormente (Tabla 5).

Tabla 5.
Características de optimización para los circuitos de un robot.

Parte Electrónica	Ventajas y Conclusiones
Procesadores Duales (sensores y actuadores)	Calcula y procesa los datos de movimiento de motores, y al tiempo que capta las señales de sensores teniendo el mejor rendimiento del sistema.
Drivers de motores con transistores de efecto de campo MOSFET	Basados en la tecnología MOSFET, estas placas circuitales brindan comodidad y seguridad en el control de motores, su uso es extendido gracias al gran rendimiento y altas protecciones eléctricas que manejan. Estos drivers permiten quitar trabajo en el procesamiento al control central y además se encargan de la fase de potencia en los motores.
Dispositivos de presensorización	En este campo se encuentran las protecciones y filtros para los sensores. Permite ahorrarle procesamiento al control general y hacer aún más fluido el proceso que este lleva a cabo.

2.9. Interfaz Multi – Táctil

Una interfaz multi-táctil (en electrónica y computación) de acuerdo a Jeff Han en su estudio “Multi-Touch Interaction Research” (Han, 2007) involucra una superficie sensible al contacto (sea un trackpad o una pantalla táctil) que puede reconocer la presencia de uno o más puntos de contacto mediante algún dispositivo electrónico e interpreta la información espacial relativa del gesto táctil.

La interface ha sido desde siempre un aspecto decisivo en la comunicación con los dispositivos electrónicos. Así, según Norbert Hóz et al., en la publicación de “Hall Position Encoder-based Touch Surface” para el seminario IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011) (2011), explican que las técnicas físicas de entrada de datos que han prevalecido en el tiempo son los botones y combinaciones de mouse/teclado. Sin embargo, gracias a la evolución de la electrónica, los botones discretos virtuales proyectados mediante algún método visual, son posibles en los monitores, volviéndose estos últimos, entradas gráficas continuas y dinámicas (Figura 11). Esto, cabe mencionar, es un avance significativo en la manipulación de la electrónica y su interacción con ella.

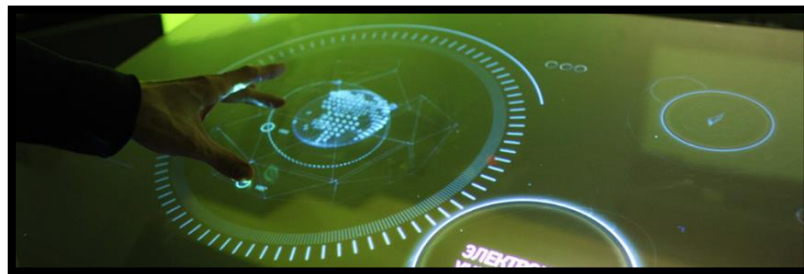


Figura 11. Modelo de una interfaz gráfica multi - táctil.

Fuente: (Valentin Simonov, 2015)

En la actualidad como señala Lan-Rong Dung, Guan-Ying Lai, y Yin-Yi Wu en su publicación “Shadow Touching For Interactive Projectors” para el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación de la Universidad Nacional de Chiao - Tung (2013), el problema de reconocimiento multi-táctil ha sido perfeccionado para asegurar una experiencia intuitiva en la comunicación entre humano y máquina, pero advierten que en el estado del arte para los acercamientos a la experiencia multi – táctil

actuales se vuelven costosos e inviables a medida que las dimensiones de la superficie interactiva aumenta.

En tal virtud, también afirma que el diseño de un nuevo tipo de tecnología táctil gran precisión, exactitud y escalabilidad es necesario. Así también lo determinan Norbert Hóz et al. (2011) que muestran una solución de encoders usando el efecto Hall para determinar la posición de acuerdo al lugar de la presión como indica la Figura 12. Este, resulta más barato de implementar que las ya conocidas tecnologías resistiva y capacitiva. Sin embargo, este método resulta no ser el más efectivo para este proyecto si se analiza en dimensiones grandes.

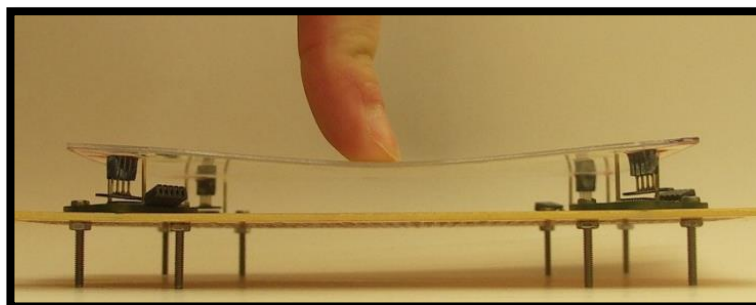


Figura 12. Deformación causada por la presión que es detectada por los encoders de efecto Hall.

Fuente: (Norbert Hóz, 2011)

2.9.1. Tecnologías de mapeo

En el presente proyecto se estudia la posibilidad del reconocimiento simultáneo de piezas de ajedrez en un tablero táctil. Puesto que debe reconocer al menos 32 piezas al mismo tiempo, la detección debe ser precisa, liviana y robusta. La dimensión de la pantalla debe guardar proporcionalidad con las dimensiones de las piezas.

En esta sección se recopilan y analizan estudios de las diferentes técnicas de adquisición de datos para superficies de contacto, con el fin de investigar el estado del arte que la tecnología actual ofrece, mostrando la influencia de cada una de las tecnologías en el proyecto.

KG Ramsundar (2015) en su estudio “Interactive Touch Board using IR Camera” de la RBDI, indica las diferentes tecnologías de captación de coordenadas existentes

para hacer de una superficie, un medio interactivo táctil. Demuestra la tecnología resistiva, capacitiva, electromagnética, óptica y ultrasónica. Esto apuntaría a una variedad de tecnologías posiblemente aplicables a este proyecto, pero como se verá más adelante, se evalúan las ventajas y desventajas respecto de la más acertada.

Andreas Holzammer, en su tesis doctoral “Combining Diffuse Illumination and Frustrated Total Internal Reflection for touch detection” para la Technische Universitat Berlin (2009) analiza las aplicaciones de las tecnologías eléctricas de detección táctil, como se muestra a continuación para entender sus limitaciones y ventajas:

2.9.1.1. Tecnología resistiva de mapeo

Holzammer (2009) explica que la tecnología resistiva funciona a partir de 2 placas flexibles, una con líneas conductivas horizontales y otra con líneas conductivas verticales. Al hacer presión en un punto arbitrario, la línea horizontal choca con la línea vertical que está separada por una capa aislante hecha de puntos de silicón. Un controlador conectado a estas líneas envía un valor de voltaje que determina la posición exacta de toque mediante la medición del cambio de dicho voltaje en la red creada por la red.

El problema con este método es que la capa donde se ejerce el toque solo tiene una difusión de la luz del 75% al 80% creando una imagen oscura en la pantalla. También al insertar una capa de protección la luminosidad baja aún más. Por último, solo se han creado dispositivos con pantalla pequeña como el de Nintendo DS o de celulares con esta técnica. El proceso de fabricación requiere de un proceso industrial.

2.9.1.2. Tecnología capacitiva de mapeo

De acuerdo a Holzammer (2009) la tecnología capacitiva es una de las más difundidas en la actualidad, sin embargo es una de las más ineficientes y caras de producir en relación a otras tecnologías, pero la ventaja es que son muy adecuadas para dispositivos portátiles por su claridad de imagen.

Las técnicas de pantalla táctil capacitiva se dividen en 2 categorías, la de capacitancia superficial y capacitancia proyectada.

- **Capacitancia Superficial:** Se usa una fina capa conductiva debajo de un cristal que actúa como electrodo. El usuario al hacer contacto con la superficie actúa como medio de transmisión y recibe la carga de la capa conductiva. La descarga de corriente es medida y se establece la posición en el toque. Para fabricar este dispositivo se usan procesos industriales de avanzada y todavía no se encuentran desarrollados para superficies de gran tamaño; por ende no se contempla en este proyecto.
- **Capacitancia Proyectada:** Este método se usa en ambientes no convencionales o de climas extremos. Cuenta con micro capacitores en toda la superficie táctil. Dos placas que generan una red de sensores permiten detectar el acercamiento de un objeto incluso antes de ponerse en contacto con la superficie. Sus prestaciones son buenas para zonas de trabajo como minas o fábricas, sin embargo, para el proyecto actual no se consideran por su costo y de nuevo, porque no se han inventado soluciones para pantallas de gran tamaño.

2.9.1.3. Tecnologías ópticas de mapeo

Como se ha expuesto, los métodos eléctricos no son aptos para este proyecto pues incurriría en un desarrollo externo de una pantalla táctil de dimensiones mayores a las existentes con un costo que sobrepasa el presupuesto destinado para este proyecto.

Debido a esto, la tecnología óptica es el mejor candidato para ser estudiado e implementado. Sus prestaciones y funciones se adaptan a los requerimientos del proyecto a realizar, y su costo es moderado a bajo.

En el estudio de Ramsundar (2015) y su equipo, se analizó y construyó un dispositivo que consiste en una cámara con su lente enfocado en paralelo hacia la superficie de contacto. Como afirman, este es un método de relación costo/efectividad alto y ampliamente utilizado en experimentos y desarrollos de pantallas multi-táctil. La máquina de Ramsundar (2015) aprovecha una cámara infrarroja para detectar posiciones de objetos y toques en una superficie. Por esta razón el área táctil depende únicamente de la distancia de la cámara a la superficie y el alcance del lente. También se puede extender este resultado al desarrollo de

Holzammer (2009) que se diferencia del de Ramsundar (2015) en el hecho de que combina dos tecnologías, la FTIR y la DI (tecnologías infrarrojas) para obtener las mejores características de cada uno.

Indica también la diferencia de implementar una pantalla de las mismas dimensiones con otras tecnologías como la capacitiva o resistiva, las cuales son inviables por su alto costo mientras se intenta alcanzar dimensiones demasiado grandes de superficie de contacto. Así mismo de acuerdo a Chao-Hsuing Tseng y Yung-Chiang Wei en el artículo “*Design and Implementation of the Multi-Touch Tables*” de la universidad de Kun Shan, la tecnología capacitiva de sensorización no se ha inventado todavía para superficies demasiado grandes.

Ramsundar (2015) también muestra a la cámara infrarroja como alternativa superior en cuanto al bajo costo con igual rendimiento frente a métodos ópticos como la técnica con el mando Wiimote de la consola Nintendo o el Kinect de Windows en la consola Xbox.

Para entender las dimensiones y distribución espacial del sistema de dicho estudio con la cámara infrarroja en el proyecto citado, se muestran la Figura 13 y la Tabla 6 respectivamente.

Se pretende extrapolar los resultados del proyecto de Ramsundar (2015) a este en particular, tomarlos como referencia, compararlos y evaluarlos en una etapa posterior de diseño.

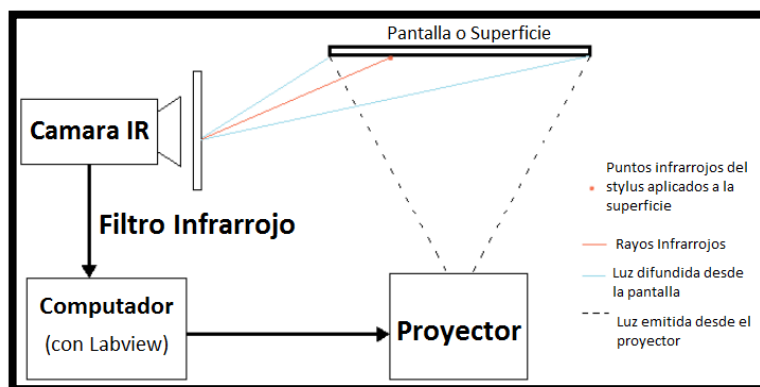


Figura 13. Distribución de los componentes en método óptico infrarrojo de detección.

Fuente: (Ramsundar, 2015).

Tabla 6.
Parámetros del sistema multi - táctil con método de cámara infrarroja.

Parámetros	Valores
Resolución de la pantalla proyectada	1024 x 768 pixeles
Resolución capturada por la cámara	800 x 600p a 30 FPS
Tamaño Proyectado	2,25 x 1,7 m
Distancia de la superficie a la cámara	~3 m
Precisión promedio	98,90%
Desviación de Pixeles promedio a lo largo del eje X	± 4 pixeles
Desviación de Pixeles promedio a lo largo del eje Y	± 5 pixeles
Latencia promedio en segundos	0,28 segundos

Fuente: (Ramsundar, 2015).

El método de Ramsundar se basa en el efecto luminoso de un lápiz con una punta con LED infrarrojo (Figura 14) que al encenderse y apuntar sobre la superficie (o un poco alejado de ella) crea una señal luminosa que es reconocida por la cámara. Este método, aunque eficiente no analiza la opción de extenderse a objetos sin un led infrarrojo de apoyo, por ejemplo, un dedo humano.

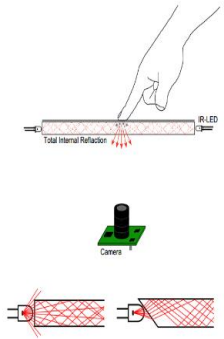
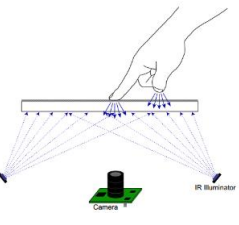


Figura 14. Stylus con IR nótese el botón que activa la luz IR.

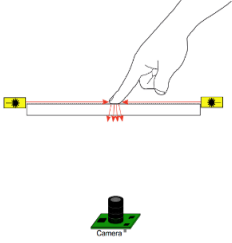
Fuente: (Ramsundar, 2015).

Sin embargo, y como se analiza en la tesis de Holzammer (2009), existen algunos métodos para captar la señal de cualquier objeto sin luz infrarroja propia. Así, se tienen métodos desarrollados y probados con características de operación como se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7.
Características y propiedades de los métodos de detección infrarrojos.

Método y Distribución Espacial	Descripción	Ventajas y Desventajas	Influencia en el presente proyecto
<p>Reflexión total interna frustrada (FTIR) Frustrated Total Internal Reflection</p> 	<p>La luz infrarroja es esparcida por los bordes del tablero.</p> <p>Aprovecha el principio físico de la reflexión total interna frustrada.</p> <p>Usa una cámara para detección y un proyector para visualizar la pantalla, ambos apuntados a la superficie táctil.</p>	<p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Detecta la presión el toque - No se requiere de caja aislada del ambiente - Burbujas tienen mejor contraste, - Cuando su superficie está bien pulida puede detectar presiones de hasta un lápiz. <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Necesario un marco de leds y calibrarlos difícil - Se requiere de una capa de silicón que necesita un proceso químico para evitar el deslizamiento por el uso - No puede reconocer objetos livianos o marcas fiduciales. - No se puede usar otra superficie adicional como vidrio para protección 	<p>No considerado por el costo de materiales especializados calibración difícil.</p> <p>La detección de objetos no está contemplada en este método lo cual es poco apropiado si se pretende usar piezas de ajedrez.</p>
<p>Iluminación Difusa (DI) Diffused Illumination</p> 	<p>No requiere de una superficie pulida en los marcos ni material especializado.</p> <p>La iluminación infrarroja se coloca detrás de la superficie en el plano de la cámara infrarroja.</p> <p>Existe también la variante de iluminadores IR sobre la superficie.</p>	<p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No necesita de materiales especiales para la superficie de contacto. Simplemente con un vidrio o acrílico y algún material para reflejar la imagen del proyector. - No se requiere de un marco especial de LEDS infrarrojos, puede mapear objetos, burbujas, fiduciales y hovering. - Como variantes para la iluminación se pueden optar por barras de leds de 120 grados o iluminadores de seguridad de gran ángulo. <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dificultad para obtener la iluminación correcta y ángulos de los iluminadores. - Gestos sin tanto contraste (tratamiento adicional de la imagen por software). - Amplio rango de falsas burbujas. - Se requiere de una caja cerrada. 	<p>Técnica a escoger en el proyecto por su simplicidad y amplio rango de utilidades con diferentes tipos de gestos y su poco trabajo y materiales requeridos.</p> <p>Afecta en cuanto al hermetismo que debe poseer la estructura que contiene el sistema y también la calibración de la imagen perfecta.</p>

Continúa ➡

<p>Plano de luz láser (LLP) Laser Line Plane</p> 	<p>Posee la misma configuración espacial del proyector y la cámara.</p> <p>Este método consiste en aprovechar la luz (rayo de 120 grados de apertura) de láseres infrarrojos dispuestos de manera que cubran a la pantalla con una altura pequeña entre la superficie y el haz de luz</p> <p>Para detectar las burbujas la luz debe rebotar en el objeto hacia la dirección de la cámara.</p>	<p>VENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No requiere una superficie especializada (silicón). - No requiere de un marco de led. - No es necesario una estructura cerrada, pero se recomienda por seguridad de los láseres. - Puede ser un método un poco más barato que los anteriores. <p>DESVENTAJAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No puede reconocer objetos especiales como fiduciales. - No puede detectar la presión del gesto. - Puede causar oclusión si la disposición de los láseres no es adecuada. - Se requiere de equipo de seguridad como gafas de protección al momento de implementar la mesa. 	<p>No se recomienda el uso de esta técnica pues aun cuando es una técnica más barata, su implementación es peligrosa tanto como el mantenimiento.</p> <p>Además su calibración debe ser más precisa (en mm).</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Nota: Existen métodos ópticos de recepción no descritos en esta tabla, como la superficie de iluminación difusa (DSI) que no se tratan en esta tabla pues resultan de derivaciones de las técnicas expuestas.

Como conclusión de este apartado, la combinación de las tecnologías ópticas y eléctricas podría ser posible. Sin embargo, y como demuestra Holzammer, a medida que la superficie de contacto crece, también lo hacen los problemas de sensorización y la complejidad electrónica. Estos problemas crecen en mayor medida en la tecnología eléctrica que en la óptica. En la última sin embargo, se tiene una mejor adaptabilidad como demuestran los estudios anteriores. Por ende, se ha establecido una configuración de Iluminación Difusa Posterior (RDI) y su respectiva estructura para ser utilizada en este proyecto (Figura 15).

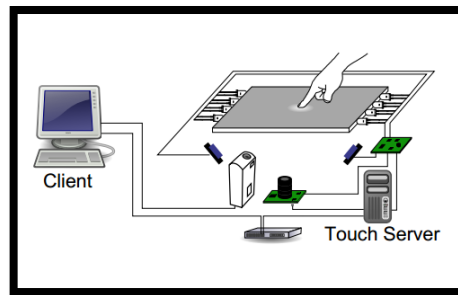


Figura 15. Mesa para albergar la superficie multi - táctil y su distribución electrónica en la máquina de Holzammer que combina FTIR y DI.

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009)

Método de iluminador difuso posterior (RDI) Rear Diffuse Illuminator

El siguiente apartado se enfoca de manera más profunda en la tecnología del iluminador difuso posterior (RDI) para indagar los métodos y dispositivos que hacen posible esta tecnología. Este es el método que mejor adaptación brinda al objetivo inicial de esta tesis.

Chao-Hsuing Tseng y Yung-Chiang Wei (2011) indican que una configuración básica para la tecnología de iluminador difuso posterior (Figura 16) posee los siguientes elementos en la estructura interna:

- Cámara Infrarroja
- Estructura (Mesa)
- Proyector
- Iluminadores Infrarrojos
- Computador



Figura 16. Estructura de referencia para una técnica de iluminador difuso.

Fuente: (INSTRUCTABLES, 2014).

2.9.1.4. Cámara infrarroja (IR)

Es el elemento principal en esta tecnología. Ramsundar (2015) explica que la cámara usada debe tener la característica especial de captar rayos infrarrojos mediante filtros de imagen (Figura 17). De fábrica, la mayoría de cámaras pueden reconocer la luz infrarroja, pero traen en sus componentes un filtro de rayos infrarrojos para evitar que el sensor CCD logre captarlos. Con el filtro se logra evitar la distorsión de la imagen original tomada con todo el espectro de la luz.

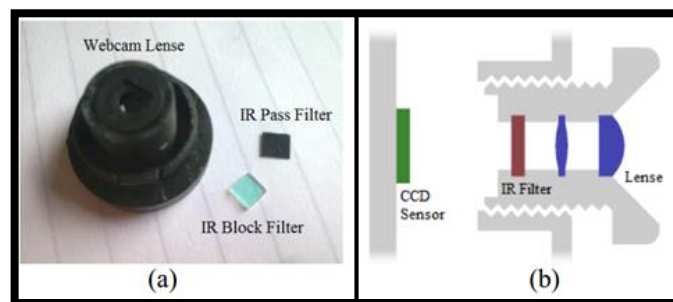


Figura 17. a) Lente de cámara web, filtros de paso y bloqueo para la luz infrarroja respectivamente, b) Disposición de los filtros y lentes en el compartimento.

Fuente: (Somanader, Saylor, & Levin, 2011).

Algunos autores como Tseng et al. (2011), Ramsundar (2015) y Holzammer (2009) indican que un buen procedimiento para evitar gastar en cámaras infrarrojas de fábrica, es modificar los lentes de cámaras regulares extrayendo los filtros anti-infrarrojos y añadiendo nuevos filtros. Holzammer analiza tres cámaras que pueden ser modificables para el paso de luz infrarroja:

- PlayStation 3 Eye Camera, graba a 60 FPS en una resolución de 640x480 píxeles y que es relativamente fácil de modificar con un filtro.
- DMK 21BF04, posee un sensor muy pequeño de CCD el cual a pesar de ser modificable, necesita de herramientas de precisión ser modificado.
- Firefly MV de Point Grey, graba a 63 FPS con una resolución de 752x480 píxeles y que su filtro es modificable para recibir los rayos infrarrojos.

Otro caso es de Chao-Hsuing Tseng y Yung-Chiang Wei (2011) que al evitar el precio de una cámara infrarroja costosa, decidieron modificar y adaptar una cámara VX-3000 de Microsoft y usarlo en su proyecto.

Para la elaboración del proyecto de Chao-Hsuing Tseng y Yung-Chiang Wei (2011) se analizaron los siguientes métodos de modificación de la cámara para captar rayos infrarrojos:

- Usando un disco antiguo de 3 y media pulgadas y cortándolo hasta encajar en el puesto del lente. Este método no filtra la luz de las lámparas fluorescentes, pero si la luz visible y permite pasar la luz infrarroja (Figura 18).
- Negativos expuestos de las cámaras fotográficas antiguas. Este fue el método menos acertado porque no permite un eficiente filtro de la luz visible (Figura 18).
- Filtros comerciales para cámara. Este es el método por excelencia pues aun cuando actúa como el disco de 3 y meda pulgadas, la claridad de la imagen es nítida. Sin embargo estos filtros suelen ser caros y difíciles de conseguir (Figura 18).
- Combinación de un disco de tres y media pulgadas y el filtro comercial de IR. Esta combinación fue la más acertada para este proyecto, pues alcanzo una oscuridad casi total en luz visible y una claridad muy alta en luz infrarroja.



Figura 18. De Izquierda a derecha: disco reciclado de 3 1/2 pulgadas, negativos expuestos, filtro comercial IR para cámaras.

Fuente: (Tseng & Wei, 2011).

Un efecto que Ramsundar (2015) señala es su estudio, es el de la distorsión de la perspectiva. Se trata de una propiedad de la cámara para traducir las imágenes de tres

dimensiones a dos en un plano dando la idea de perspectiva y ángulo en una imagen. Este efecto transforma las coordenadas reales del ambiente (que derivan de una función no lineal) y las traduce a puntos de una función lineal. Sin embargo se puede contrarrestar el efecto en casos donde la cámara se encuentre en perspectiva y no ortogonalmente a la superficie de contacto. Para esto es necesario aplicar una Transformación de Perspectiva Inversa, logrando que una imagen en perspectiva se vea igual a una ortogonal como muestra la Figura 19. Para el proyecto a desarrollar en esta tesis no se ahonda en el efecto porque la disposición interna de la cámara apunta directamente a la pantalla y es ortogonal. Sin embargo se considera el método en caso de variantes del diseño.

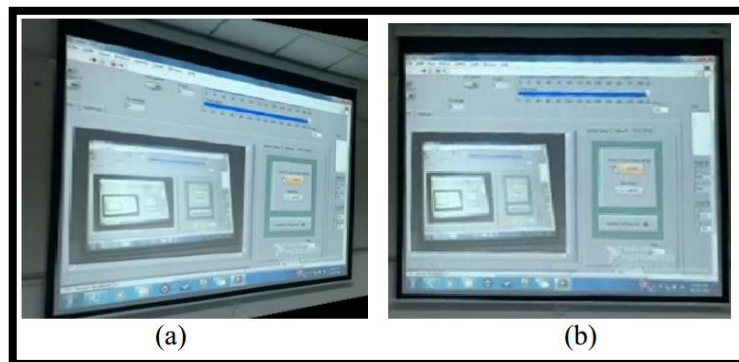


Figura 19. a) Toma en perspectiva con la cámara de prueba al aplicado el algoritmo de transformación de perspectiva inversa, b) Cámara ortogonal a la superficie de contacto. Nótese que la imagen es la misma en ambos casos aun cuando el ángulo de toma es totalmente distinta.

Fuente: (Ramsundar, 2015).

Un tema importante a considerar tal como afirma Holzammer (2009), es la distancia de separación entre el lente de la cámara respecto de la superficie de contacto para obtener el área efectiva de cobertura en la pantalla.

Holzammer (2009) afirma que se puede calcular esta distancia conociendo dos parámetros: el tamaño de la pantalla y el tamaño del sensor de la cámara.

Esta distancia se estima dividiendo el eje X del tamaño de pantalla sobre el eje X del tamaño del sensor, y, la distancia en el eje Y de la pantalla sobre el tamaño del sensor en el eje Y . Los resultados se multiplican por la distancia focal del lente, provisto por el fabricante. El valor determina la separación desde el foco del lente a

la superficie. En el caso de Holzammer y su dispositivo, se analizó la distancia con los siguientes datos:

$$\text{Sensor} = 4.55 \text{ mm (alto)} \times 2.07 \text{ mm (ancho)}$$

$$\text{Pantalla} = 1200 \text{ mm (alto)} \times 900 \text{ mm (ancho)}$$

En la Figura 20 se muestra como se consideran dichos parámetros para estimar el área de enfoque de la cámara. Como acotación, también afirma que el mejor lugar para situar la cámara es en la línea ortogonal y en el centro de la pantalla.

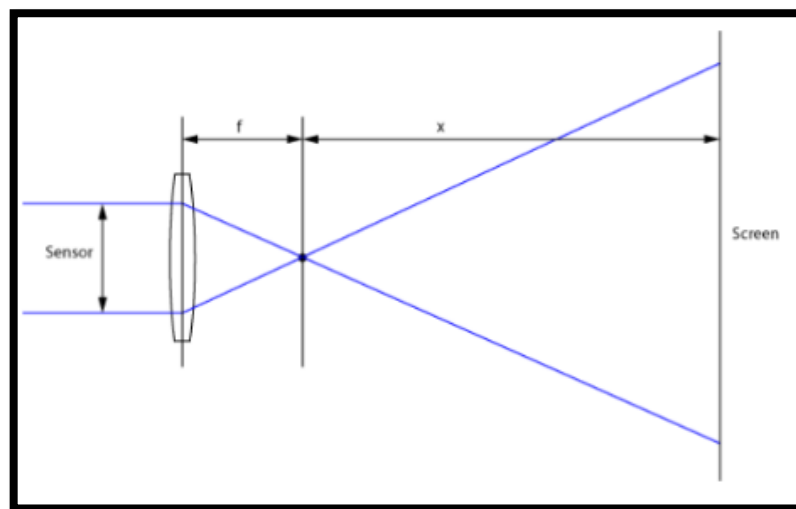


Figura 20. Representación gráfica de la distancia del foco del lente a la cámara.

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

2.9.1.5. Proyección

Otro componente importante es el sistema de proyección. Puesto que la luz del proyector es invisible para la cámara, no interfiere con su lectura, como demuestra Holzammer (2009) en su estudio. Por lo tanto, la cámara solo capta la luz infrarroja de los iluminadores y no la del sistema de proyección. La combinación de estos dos dispositivos (y su algoritmo) recrean la sensación de que el objeto o evento en pantalla se encuentra posicionado.

Otra parte fundamental para considerar, es la distancia de proyección. Dependiendo del equipo y las especificaciones del fabricante, se debe considerar el ángulo de proyección y la distancia necesaria en la configuración del dispositivo. De ser el caso,

Holzammer (2009) recomienda instalar espejos para alcanzar la distancia de proyección en el tamaño especificado. O, como en su caso, adquirir un tipo especial de proyector que se denomina dispositivo de disparo ultra corto, que permite la proyección de la imagen en el mismo plano de instalación del proyector (Figura 21).

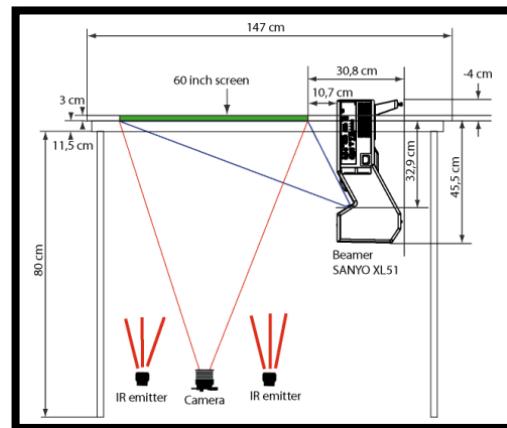


Figura 21. Proyector con el sistema de disparo ultra corto.

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009)

2.9.1.6. Iluminación Infrarroja

Otro punto a considerar, es el tipo de rayo infrarrojo y como conseguirlo. En los últimos años la tecnología LED infrarroja ha venido sustituyendo a otros tipos de lámparas IR, debido a su potencia y economía, como afirma (Ramsundar, 2015). En el presente estudio se recomienda usar las siguientes fuentes de luz infrarrojas de tecnología LED.

- **LEDs adquiridos por separado:** Pueden ser, LEDs normales o LEDs de montaje superficial. Al adquirirlos por separado, se debe desarrollar el circuito de potencia para encenderlos. También se debe diseñar la estructura o marco que los soportan. Generalmente se los utiliza en las tecnologías como la FTIR donde se construye el marco de LEDs de acuerdo a los requerimientos de la pantalla.
- **Iluminadores LED infrarrojos:** De fábrica, los iluminadores vienen sellados en forma de luminaria para ser ocupados por las cámaras infrarrojas de seguridad. Sin embargo se adaptan muy bien en configuraciones como la DI.

- **Cintas de LED:** Las cintas de LEDs infrarrojos se utilizan en métodos de FTIR por que se fabrican en tiras flexibles con LEDs de montaje superficial, lo que permite una fácil implementación en el marco.

2.9.1.7. Capa Protectora y Pantalla de Proyección

En este apartado se hace referencia a los materiales utilizables como medio de detección táctil, proyección, y protección. Se recomienda considerar la selección de los materiales como explican Holzammer et al. (2009) y Ramsundar (2015) en sus respectivos trabajos.

- **Pantalla de Proyección:** La pantalla de proyección depende de la tecnología empleada. En el caso de FTIR, de acuerdo Tinkerman (2014), generalmente se recomienda añadir una solución hecha a base de silicón con aditivos (como el Xylol) sobre una superficie de acrílico no reflectivo como base de la pantalla. Después se coloca un papel tipo pergamino sobre la solución previamente seca; esta combinación produce una textura suave que logra captar la presión de los objetos o gestos táctiles en el acrílico subyacente de manera uniforme. Además brinda una claridad extra en la imagen proyectada. La gran desventaja es su fragilidad si esta expuesto a un uso frecuente. Por tanto no se recomienda usarlo sin una capa protectora flexible. En el caso de tecnologías de proyectado como la RDI, se recomienda solamente usar lonas o telas especializadas de retro proyección. Las lonas, que son fabricadas a base de plásticos flexibles, permiten una imagen proyectada clara y nítida. Adicionalmente, se ha comprobado que su poca reflectividad permite a la cámara captar la luz reflejada del gesto táctil, y no de la pantalla, como afirma Holzammer et al. (2009). Este material sin embargo no está exento de rajaduras o desgarres, pero es más resistente que en la tecnología FTIR.
- **Capa Protectora:** El material de proyección y detección de gestos en ambas tecnologías suele ser un tanto delicado y propenso a rasgaduras. Para la tecnología FTIR generalmente la capa de protección se limita a capas delgadas de pegamento o materiales flexibles sobre el papel tipo pergamino, y no es posible usar vidrios o acrílicos pues la detección del gesto guarda relación con la presión aplicada sobre la superficie. En la tecnología RDI existe una

flexibilidad mayor para integrar pantallas de protección. En este caso, se puede optar por vidrio o acrílico claro pasado por un proceso de *sandblasting* para opacarlo y brindar una mejora en la calidad de la imagen proyectada. Este método protege la tela de proyección en su totalidad.

Percepción de gestos y los algoritmos de reconocimiento

Ahora se explicarán y analizarán las técnicas de manipulación de los gestos captados por la cámara. Se conocerán también los algoritmos que permiten interpretar las formas y transformarlas en objetos con coordenadas espaciales y patrones de digitación (Figura 22).

Para entender el problema de la percepción, se realiza un diagrama de flujo del proceso, desde la imagen captada por la cámara hasta convertirse en información útil para el algoritmo. El diagrama es un compendio de los autores: Holzammer et al. (2009) y su trabajo sobre “Combining Diffuse Illumination and Frustrated Total Internal Reflection for touch detection” (2009); Ramsundar y su trabajo de “Interactive Touch Board using IR Camera” (2015), y Jangwoon Kim, Jaewan Park, HyungKwan Kim Chilwoo Lee en su trabajo “HCI (Human Computer Interaction) Using Multi-touch Tabletop Display” (2007).

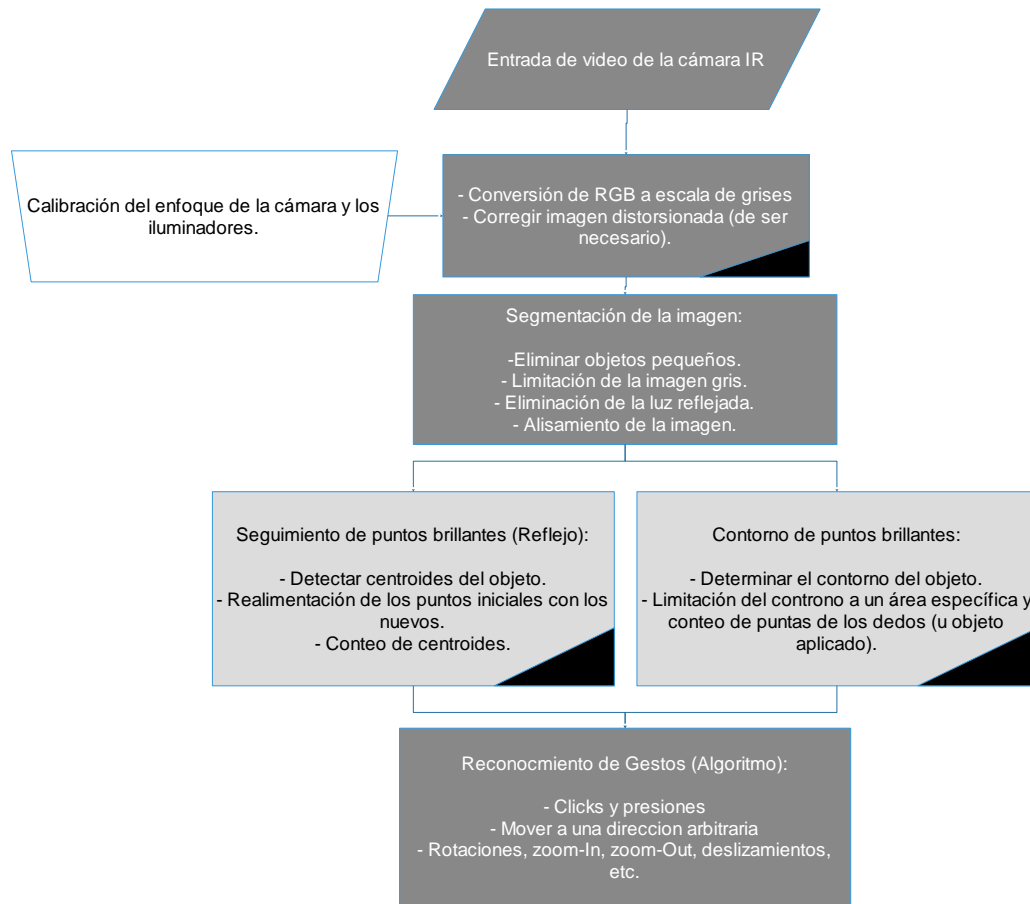


Figura 22. Diagrama de flujo del proceso multi – táctil analizando el trabajo de Ramsundar (2015), Kim et al., (2007) y Holzammer (2009).

2.9.1.8. Adquisición de objetos

Jangwoon Kim, Jaewan Park, HyungKwan y Kim Chilwoo Lee (2007) usaron una cámara RGB con un filtro IR, a la que aplicaron un filtro de Gauss desarrollado en software. De esta forma, la imagen se transforma a escala de grises (Figura 23). El formato en escala de grises es recomendable porque el algoritmo es menos complejo para desarrollar. Además, en este formato se segregan los gestos táctiles más fácilmente que en un formato a color. En su trabajo, indican un aumento en el ángulo de video de la cámara al usar un lente gran angular, sin embargo, el lente especial provoca una distorsión de barril. Para corregir el efecto, se calibra la entrada de la cámara mecánicamente y por software.



Figura 23. Pantalla convertida de RGB a escala de grises detectando al stylus con luz infrarroja.

Fuente: (Ramsundar, 2015)

Un problema que Holzammer (2009) registra al hacer la captura inicial de los objetos en el video, es el de imagen sobreexpuesta. El problema se origina porque la captura nunca logra ser estática, ni completamente uniforme a través del tiempo, lo que impide al algoritmo diferenciar entre los gestos táctiles y el resto de la imagen en la pantalla. Una solución ingeniosa aplicada por el autor y algunos creadores de algoritmos de detección (como CCV u OpenCV) consiste en capturar una imagen inicial lo más uniforme y vacía posible de la pantalla, para luego crear un histograma de pixeles que se compara con respecto al tomado cuadro a cuadro (*frame*) por la cámara. Así, el algoritmo determina si existió algún cambio entre la imagen inicial y la nueva imagen del cuadro. El algoritmo identifica dicho cambio entre imágenes como un objeto o gesto sobre la pantalla. En el siguiente apartado se ahonda con el algoritmo de segmentación.

2.9.1.9. Segmentación de la imagen

Se realiza la limpieza de objetos en pantalla, como la luz de ambiente reflejada (infrarroja y visible), el trasfondo propio de la pantalla y los falsos objetos provenientes de la iluminación del proyector.

Holzammer (2009) analiza 3 aspectos preliminares que se recomiendan tomar en cuenta antes de aplicar el algoritmo de segmentación.

- **Eliminación de la luz ambiente:** La luz infrarroja es un problema si la iluminación cambia su brillo o posición constantemente. El efecto negativo que tiene esta variación es que distorsiona el sustrato (pantalla vacía) donde actúa

el algoritmo. Como se explica anteriormente, Holzammer (2009) propone la comparación del sustrato con la imagen obtenida cuadro a cuadro por la cámara. De acuerdo al trabajo de Marc Alexa et al. *“Touch sensing based on FTIR in the presence of ambient light”* de la Technical University of Berlin, 2008, se puede implementar un algoritmo dinámico de detección de sustratos, que se basa en tomar dos imágenes iniciales: una con luz ambiente y sin luz infrarroja, y otra con la luz infrarroja de los iluminadores más la luz ambiente; juntarlas y a partir de ello, generar un doble histograma que resulta más robusto que el método simple de luces infrarrojas de Holzammer (2009). El nuevo método soporta variaciones dramáticas en la luz del entorno (en exteriores por ejemplo).

- **Eliminación de “puntos calientes”:** De acuerdo a Holzammer (2009), un punto caliente, es cualquier efecto de luz que interfiere con la lectura de los gestos (Figura 24). Un ejemplo es la luz proveniente del sistema de proyección, que puede provocar un punto de luz infrarroja detectado como un gesto táctil por la cámara de video. El efecto se soluciona de diversas maneras: creando sustratos dinámicos, cambiando los materiales de la pantalla por no reflectivos, y/o ajustando los parámetros de brillo emitido por el proyector.



Figura 24. "Punto caliente" reflejado en la pantalla y adquirido por la cámara.
Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

2.9.1.10. Segmentación con umbral (Threshold)

El siguiente paso es la segmentación de la imagen en escala de grises. El método consiste en limitar el umbral de luz que la cámara acepta de un objeto sobre la pantalla;

el valor del umbral se determina variando el rango de tonalidad y brillo (de la imagen en escala de grises) permisible, que se acepta como toque. De esta manera se recoge el gesto táctil de acuerdo al brillo que este emite. Kim et al.,(2007) indica cómo se recomienda variar el valor del umbral en la captura y en el histograma (Figura 25) hasta detectar gestos sólidos con buena apariencia.

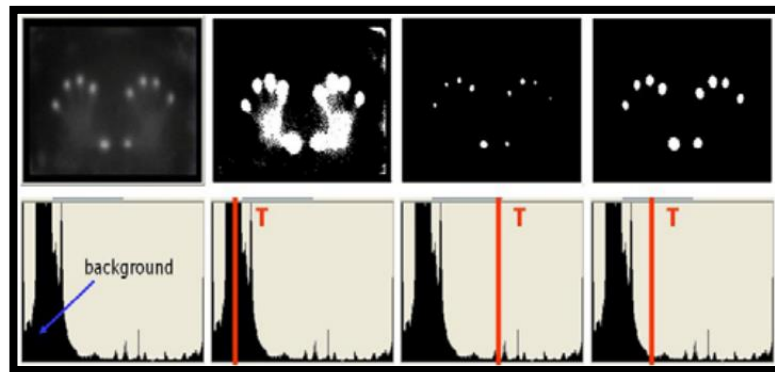


Figura 25. Diferentes tipos de umbrales aplicados a la imagen original. De izquierda a derecha: imagen original, valor umbral muy bajo, valor de umbral muy alto, y umbral apropiado.

Fuente: (Kim et al., 2007).

La tecnología RDI presenta el problema de reconocer la palma de la mano además de los dedos apoyados en pantalla, porque la luz infrarroja sobrepasa el material de proyección y protección. El threshold (umbral de luz) soluciona dicho problema logrando segmentar el gesto táctil a solo los puntos de interés.

Ramsundar (2015) recomienda aplicar algoritmos de envoltura convexa (*convex hull*) que matemáticamente es la agrupación convexa más pequeña de puntos que pertenecen a un plano o espacio euclidiano. Un ejemplo es la banda elástica que al ser sostenida por tres dedos encierra dentro de él, un espacio. Ramsundar explica que mediante el algoritmo de segmentos convexos se encierra a la imagen proyectada y se forma la burbuja determinando así el contorno del gesto táctil después de haber pasado por el umbral.

Holzammer (2009) indica en su estudio cómo actúa su algoritmo de envoltura convexa con suavizado y sin suavizado (Figura 26).

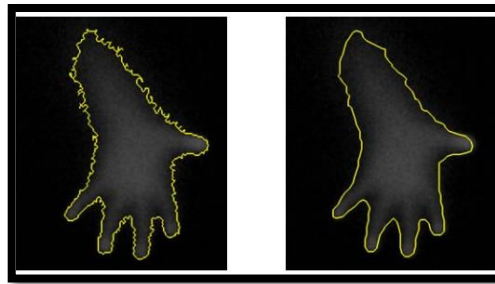


Figura 26. Antes (izquierda) y después (derecha) de aplicarse el suavizado en el algoritmo de envoltura convexa.

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Un buen acercamiento para aplicar al proceso de filtrado y tratamiento de imagen inicial con software lo demuestra Ramsundar en la Figura 27:

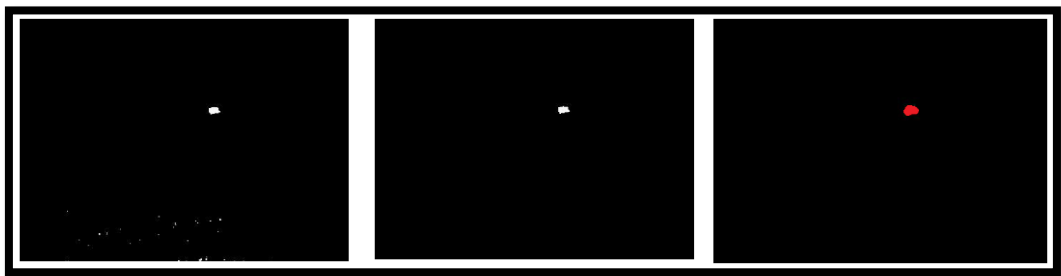


Figura 27. De izquierda a derecha, captura aplicada con thresholding, eliminación de objetos pequeños, y por último, aplicar un algoritmo de envoltura convexa.

Fuente: (Ramsundar, 2015).

Una vez se tiene definido el objeto en pantalla, se recomienda observar el comportamiento de la burbuja durante un tiempo para comprobar que la burbuja no tiene cambios drásticos en su posición, forma o tamaño. Con esto se puede determinar si la imagen es lo suficientemente estable para generar gestos táctiles sólidos sin vibraciones ni desapariciones repentinas.

Un paso posterior, es el cálculo del centroide relativo de la burbuja. Ramsundar (2015) analiza el punto luminoso con las herramientas de “Vision and Motion toolkit for image processing” de NI Labview para determinar el centroide relativo de la burbuja.

En otro estudio, Chao-Hsuing Tseng y su colega (2011) realizan una operación de segmentación mediante un algoritmo de erosión en la imagen general para después crear una dilatación en los objetos más luminosos y generar burbujas con formas geométricas definidas y fáciles para determinar su centroide.

2.9.1.11. Reconocimiento de manos, gestos y objetos

Una vez que se tiene la información de los puntos discretos reconocidos como burbujas, es tiempo de generar patrones de comportamiento con ellos. Hasta ahora se ha visto que en los anteriores estudios se sigue un proceso muy similar en cuanto a la obtención de la información de la burbuja. Sin embargo la interpretación posterior de estos gestos táctiles depende mucho de la funcionalidad que cada diseño requiera. Es decir, en esta etapa se desarrollan los algoritmos de arrastre de objetos, clics, zoom con dos dedos, rotaciones, esclamamientos, entre otros.

Por ejemplo, Jangwoon Kim et al. (2007) desarrollan un algoritmo que compara la distancia euclidiana relativa entre dos puntos táctiles encontrados (Figura 28). De esta manera, al variar la distancia o el ángulo de un punto respecto de otro pueden traducirlos en rotaciones, selección de objetos, zoom, etc. En el mismo trabajo se analizan gestos de doble mano incrementando su funcionalidad.

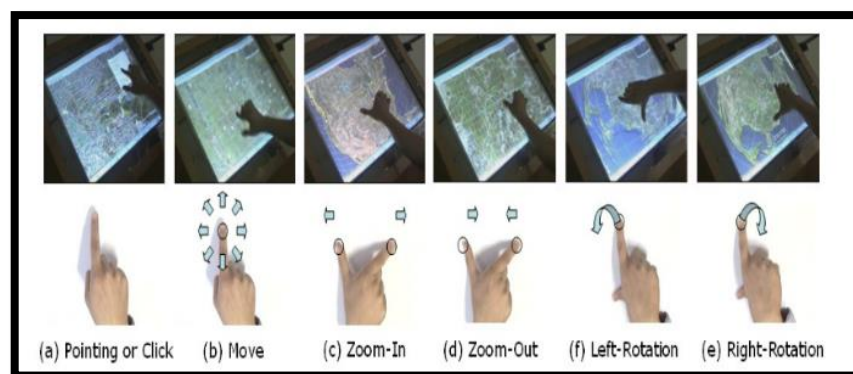


Figura 28. Set de gestos. a) apuntado o click, b) Movimiento a una direccion, c) zoom-In, d) zoom-Out, e) rotación a la derecha, f) rotación a la izquierda.

Fuente: (Jangwoon Kim, 2007).

Otro caso de interpretación de gestos de acuerdo al algoritmo, es el de Touchscript, que es una librería desarrollada por Valentin Simonov (2015) para Interactive Lab. Este conjunto de instrucciones en código libre permite la

manipulación de gestos como tapeo, presión por tiempo, alejamiento, movimiento y rotación de objetos, entre otros.

Es posible entonces, crear un sinnúmero de variantes en cuanto a la interpretación de gestos táctiles. En el presente proyecto serán necesario técnicas de tapeo, clics y movimientos relativos de objetos programados en el algoritmo.

2.9.1.12. Diseño de la interfaz

La interfaz debe englobar las características educativas y lúdicas del ajedrez, así como las características de interactividad y control.

Para entender el diseño de un interfaz de ajedrez se analiza el estudio de Juliano Picussa, et al. denominado “*A user-interface environment solution for an online educational chess server*” (2004). En este trabajo se explica la metodología a seguir para implementar una interfaz interactiva destinada a la enseñanza del ajedrez, sus componentes y variantes.

En la tesis actual se pretende diseñar una interfaz que pueda ser interactiva con el robot de ajedrez y la persona que juega. Juliano Picussa, et al. (2004) describen en un diagrama (Figura 29) los factores que deben poseer los juegos virtuales de ajedrez para cubrir todos los rasgos de juego educativo electrónico dispuesto en la red y como puede ser representado (Figura 30).

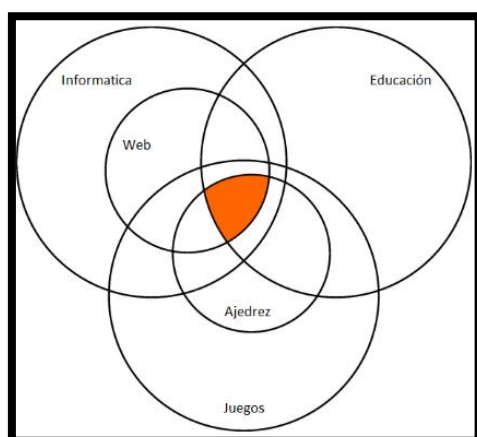


Figura 29. Diagrama de factores en un juego de ajedrez interactivo.
Fuente: (Picussa et al., 2004)

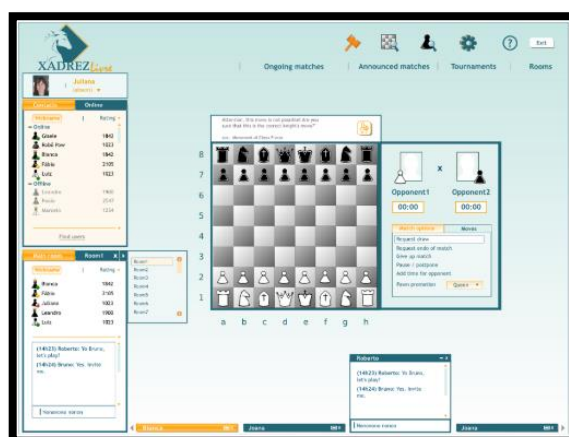


Figura 30. Interfaz de ajedrez diseñada para interactuar vía online.
Fuente: (Picussa et al., 2004).

En el artículo de Picussa et al. (2004) se estudian los juegos comerciales para jugar al ajedrez. Si bien en su estudio combinan programas de ajedrez de código libre como inteligencia artificial y servidores para jugar online, el diseño de la interfaz de ajedrez siempre se mantiene, y deberá estar constituido de estos elementos básicos para ser oficial:

- El tablero virtual con sus piezas
- Los jugadores, sus nombres y estadísticas
- La notación del juego o PGN (Portable Game Notation)
- La puntuación y el tiempo
- Código de colores de las piezas y los movimientos permitidos.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO

En el presente capítulo se habla acerca del desarrollo del diseño para el sistema autónomo interactivo de ajedrez. La metodología usada en el diseño y desarrollo del sistema se basa en el modelo de Ulrich (Ulrich & Eppinger, 2012). El diseño parte de la definición del concepto del módulo robótico y pantalla de retroproyección, se establecen necesidades, características, y análisis de las factibilidades tecnológicas y económicas. Posteriormente se detalla el diseño mediante módulos.

En el aspecto técnico, el capítulo muestra el proceso de diseño aplicado para el sistema mecánico robótico de manipulación y traslación en tres dimensiones, así como su estructura de soporte y fijación. Se diseña el efector final especializado para este sistema, y se detallan los aspectos físicos (hardware) considerados en el diseño del módulo de visión artificial. Se muestra también el diseño electrónico, las técnicas de obtención de datos de sensores, el tratamiento de señales y el diseño del circuito general. En cuanto al software se muestra el proceso de diseño de los algoritmos para el software de aplicación (interfaz), la conectividad con el motor de ajedrez, visión artificial, y el sistema de control del robot.

3.1. Definición del Concepto

Para desarrollar el concepto del sistema, se describen las características técnicas, las funciones que desempeña, y la forma física de la estructura móvil, cubriendo las necesidades del proyecto de acuerdo a Ulrich y Eppinger (2013).

Necesidades del Concepto

Para tratar las necesidades del usuario, Ulrich y Eppinger (2013) proponen realizar una tabla de requerimientos viniendo directamente de la voz del usuario. Mediante un sondeo a la tecnología actual y a las tendencias que los posibles clientes y usuarios demandan, se determinó la tabla de requerimientos mostradas en la Tabla 8:

Tabla 8.
Necesidades del Usuario

No.	NECESIDADES DEL USUARIO
1	Manejo fácil e intuitivo del dispositivo
2	Interacción en tiempo real entre robot y usuario
3	Reacción y decisión confiable del dispositivo a las entradas del usuario
4	Mantener la autonomía y evitar conflictos de operación en la partida de ajedrez.
5	Ser seguro y estable
6	Ser interactivo y atractivo para el usuario mediante gestos y movimientos táctiles
7	Enseñar al usuario mediante una experiencia de juego fluida con tutoriales
8	Movimientos suaves pero rápidos del robot
9	Precio accesible a grupos
10	Fácil implementación y puesta a punto

Características Técnicas

En la Tabla 9 se muestran las especificaciones técnicas encontradas para el presente proyecto.

Tabla 9.
Especificaciones Técnicas

No.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
1	Grados de libertad del manipulador
2	Resolución espacial, exactitud, precisión y repetibilidad del robot (mm)
3	Capacidad de Carga (kg)
4	Velocidad del efector final
5	Costo del sistema (USD)
6	Tamaño y resolución de pantalla HMI (Dispositivo de Proyección)
7	Resolución y claridad de la cámara infrarroja (visión artificial)
8	Tipo de tecnología multitáctil (FTIR, DI, etc.)
9	Tipo de sensorización (burbujas, fiduciales, etc)
10	Velocidad de procesamiento de imágenes
11	Tipo de inteligencia artificial
12	Conectividad de los procesadores (TCP, serial, etc.)
13	Estructura mecánica modular (interfaz y robot)
14	Tamaño de la estructura multi - táctil y piezas
15	Sistema de Control (Robot e interfaz)
16	Diseño PCB compacto y modular

Función QFD

En la Figura 31 se describe el despliegue de la función de calidad para este proyecto de de titulación, con la metodología mostrada por Enrique Yacuzzi et al. (2016). El objetivo se centra en determinar la satisfacción del proyecto en etapas iniciales de diseño.

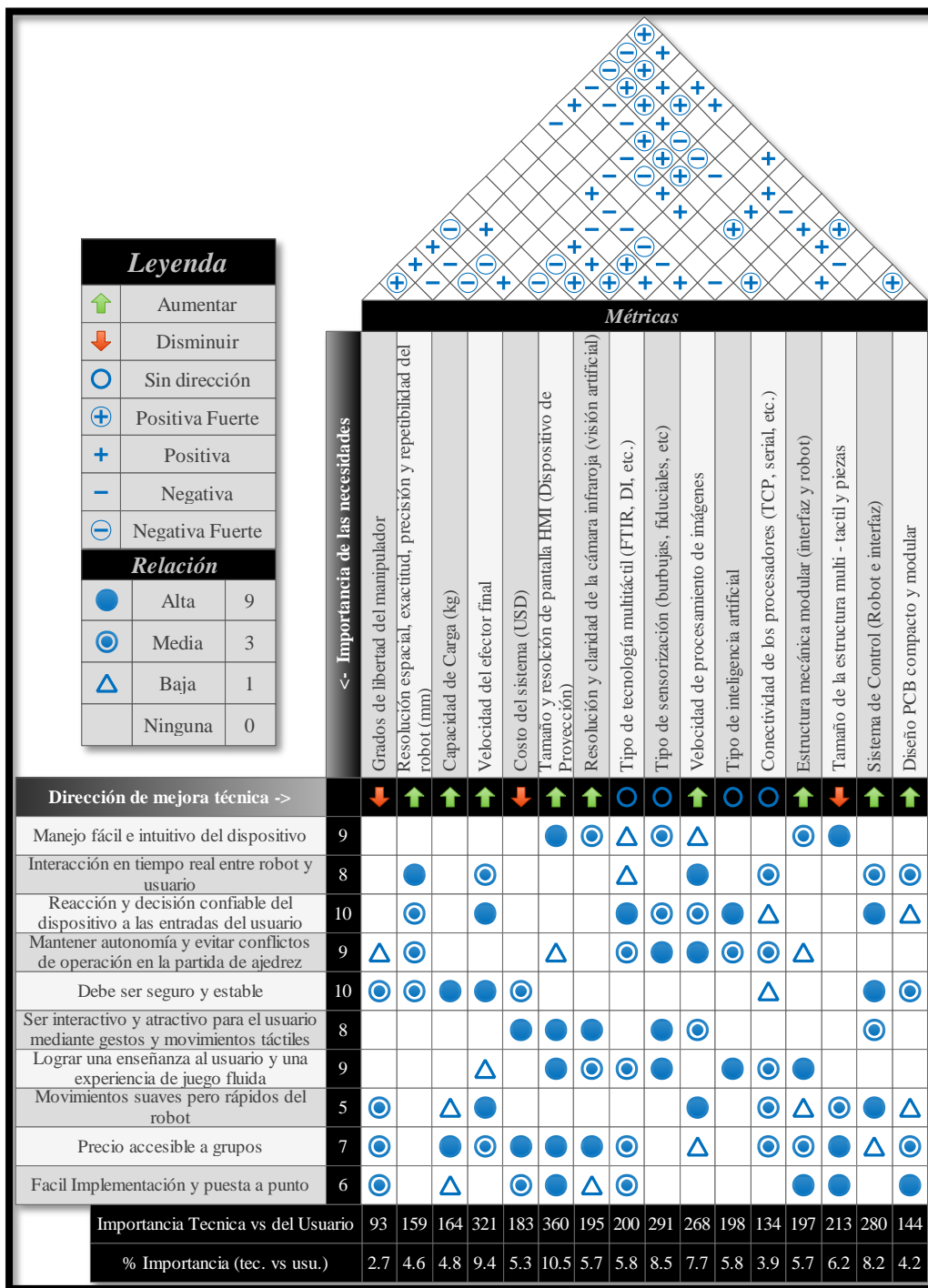


Figura 31. Matriz QFD.

Fuente: Propia.

Tabla 10.**Resultados de la Matriz QFD**

HITOS	MÉTRICAS	PONDERACIÓN %
1	Tamaño y resolución de pantalla HMI (Dispositivo de Proyección)	10,5
2	Velocidad del efector final	9,4
3	Tipo de sensorización (burbujas, fiduciales, etc)	8,5
4	Sistema de Control (Robot e interfaz)	8,2
5	Velocidad de procesamiento de imágenes	7,7
6	Tamaño de la estructura multi - táctil y piezas	6,2
7	Tipo de tecnología multitáctil (FTIR, DI, etc.)	5,8
8	Tipo de inteligencia artificial	5,8
9	Estructura mecánica modular (interfaz y robot)	5,7
10	Resolución y claridad de la cámara infrarroja (visión artificial)	5,7
11	Costo del Sistema (USD)	5,3
12	Capacidad de Carga (kg)	4,8
13	Resolución espacial, exactitud, precisión y repetibilidad del robot (mm)	4,6
14	Diseño PCB compacto y modular	4,2
15	Conectividad de los procesadores (TCP, serial, etc.)	3,9
16	Grados de libertad del manipulador	2,7

Al analizar la Figura 31 y la Tabla 10 se tienen las siguientes conclusiones de diseño:

3.1.1.1. Relación entre características técnicas

- En la matriz triangular superior se observa como los parámetros del robot son proporcionales en crecimiento a las características de control y sistemas electrónicos, sin embargo no poseen mucha relación con elementos técnicos de la interfaz.
- Un hito importante que influye directamente sobre casi todas las características técnicas es el costo de materiales y procedimientos.
- Los elementos como el tamaño del sistema, estructura robótica y soporte, son críticos porque influyen directamente con los todos los hitos existentes.
- Otro elemento crítico se encuentra en la fase de diseño informático, a saber, el sistema de control del robot, y los algoritmos de visión artificial, motor de ajedrez e interfaz. Como indica la matriz triangular, son dependientes de los elementos

mecánicos y dispositivos electrónicos. Por tanto, se debe diseñar el software hasta alcanzar un funcionamiento óptimo.

3.1.1.2. Relación entre características técnicas y necesidades del usuario

- Los hitos técnicos preponderantes y mejor adaptados a la necesidades del usuarios son, el tamaño de la interfaz multi – táctil, el sistema de control del robot con la interfaz, y el tipo de sensorización de la visión artificial. Sobre estos ítems se concentra el mayor tiempo de diseño, implementación y pruebas porque en ellos recae la mayor cantidad de necesidades a cumplir.
- Las necesidades críticas del usuario respecto de la tecnología aplicada son, la autonomía y fluidez de la partida del ajedrez sin errores, el precio de todo el sistema, y su implementación fácil y modular.

3.2. Factibilidad y Planeación

Como se ha definido, la factibilidad de este proyecto es dependiente de las características tecnológicas que se pueden alcanzar para satisfacer las necesidades del usuario. Para ello, es necesario considerar la ponderación de las características técnicas y así, definir un concepto de diseño abarcado en módulos visto en la Tabla 11.

Tabla 11.
Módulos del Sistema Robótico de Ajedrez

No.	MÓDULO	SUBSISTEMAS	FUNCIÓN	HITOS RELACIONADOS
1	Estructura	Manipulador Robótico	Análisis estático y dimensional, Diseños y Simulación CAD CAE.	2, 4, 9, 11, 13, 16
		Efector Final (Gripper)	Análisis estático y dimensional, Diseños y Simulación CAD CAE.	2, 4, 9, 11, 13, 16
		Piezas de Ajedrez	Dimensionamiento y criterios de diseño basado en normas de la FIDE.	1, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13
		Cinemática del robot	Características de las articulaciones, ecuaciones de movimiento. Características del robot.	4, 9, 13, 16
2	Sistema de Control	Arquitectura del sistema	Diagrama de flujo de todo el sistema, topología general del sistema.	4, 8, 14, 15
		Topología de redes	Protocolos y módulos de comunicación utilizados.	4, 8, 14, 15
		Arquitectura de Software	Diagrama de flujo del software utilizado en los módulos.	4, 8, 14, 15
3	Sistema de Retro proyección	Hardware del sistema	Selección y dimensionamiento de cámara, lentes, pantalla, reflectores, proyector y CPU	1, 3, 5, 6, 7, 10, 15
		Software del sistema	Algoritmos para procesar la imagen. Calibración de parámetros.	1, 3, 5, 7, 10, 15
		Comunicación y Protocolos	Sistema de comunicación con el módulo de software de aplicación.	1, 3, 4, 5, 7, 10, 15
4	Software de Aplicación (Interfaz)	Algoritmos y flujogramas	Procesamiento de la imagen, comunicación del sistema y control del juego.	4, 8, 14, 15
		Diseño Visual y Normas	Sistema de animaciones de acuerdo al ajedrez reglamentario.	4, 8, 15
5	Sistema Electrónico	Actuadores	Diseño y dimensionamiento de los motores.	4, 8, 14, 15
		Componentes electrónicos	Selección y puesta a punto de los elementos eléctricos y electrónicos.	4, 8, 14, 15
		Diseño Electrónico	Diseño PCB y cableado.	4, 8, 14, 15

Antes de analizar todo el sistema, Ulrich & Eppinger (2013) recomiendan 2 etapas adicionales en el desarrollo del diseño:

- Diseños Iniciales.
 - Diseños y métodos disponibles.
 - Evaluación y valoración de alternativas.
- Diseño Final.

Este proceso de diseño indica las limitaciones y soluciones de cada método y permite conocer el camino elegido en el diseño.

3.3. Módulo 1: Estructura

Subsistema 1. Manipulador Robótico

3.3.1.1. Alternativas de Diseño

Este apartado brinda una visión global de cómo ha sido concebido el manipulador robótico desde sus orígenes. Se realizan tablas comparativas de ventajas y desventajas para evaluar el desempeño del manipulador robótico en diferentes condiciones de acuerdo a la Tabla 10.

Selección de la Morfología del Robot

La selección del modelo del concepto nace a partir del análisis de las necesidades propias del usuario respecto del manipulador de piezas de ajedrez (Tabla 12).

Tabla 12.
Necesidades del usuario con el manipulador robótico

No.	Necesidades
1	Moverse con fluidez sobre el tablero de ajedrez
2	Movimientos rápidos
3	Liviano
4	Estable en su estructura
5	Seguro
6	Precisión y Exactitud
7	Precio Bajo

Se realiza la tabla de métricas técnicas del diseño del manipulador robótico en la Tabla 13.

Tabla 13.
Métricas del manipulador robótico.

No.	Características Técnicas
1	Selección de materiales
2	Velocidad en las articulaciones
3	Mecanismos y transmisiones
4	Capacidad de Control
5	Tamaño y peso
6	Costo de manufactura
7	Potencia

CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA SELECCIÓN DEL MANIPULADOR

- Un criterio importante es la selección de los materiales, el peso y el tamaño, y su acople con los mecanismos y transmisiones.
- La capacidad de carga del sistema debe ser tomada en cuenta al diseñar el manipulador para que pueda soportar su propio peso y la carga que traslada.
- El diseño del controlador para el manipulador debe ser robusto, fluido, y poco complejo.
- La controlabilidad de los mecanismos usados en el sistema son los factores críticos para cumplir los requerimientos del usuario.
- Los factores de costo y potencia son importantes pero no primordiales para el diseño. Esto brinda libertad de diseño en la estructura.

En tal virtud se analizan las morfologías que cumplen los criterios técnicos de selección del manipulador robótico del presente proyecto:

- Robot Cartesiano
- Robot Antropomórfico
- Robot tipo SCARA

En esta lista, no se cuentan la morfología polar, ni cilíndrica, por ser el robot SCARA una variación de ambos. Tampoco se considera el robot tipo delta por su sistema de control complejo que no cumple con el hito de controlabilidad simple.

En la Tabla 14 se ponderan cualitativamente los criterios propuestos para el diseño del manipulador robótico, calificando como 1 el más idóneo y 0 el menos idóneo.

Tabla 14.

Resultado de los criterios y soluciones propuestas para el manipulador.

	Manufatura	Precio	Repetibilidad	Precisión	Vol. De Trabajo	Velocidad	Controlabilidad	Suma + 1	Pond.
Cartesiano	0,75	0,25	1	1	0,5	1	1	5,5	0,4297
Antropomórfico	0,25	0,25	0,75	0,8	1	0,75	0,25	4,05	0,3164
SCARA	0,5	0,5	0,75	0,5	0,25	0,25	0,5	3,25	0,2539
							Suma	12,8	1

Como se observa en la Tabla 14, el robot cartesiano califica con la ponderación más alta entre criterios de morfologías del robot.

Entre sus principales características se tienen:

- Buena precisión y velocidad en toda su zona de trabajo
- Capacidad de carga alta
- Sus articulaciones son ortogonales y de tipo prismático
- Posee 3 grados de libertad que corresponden directamente a los ejes *X*, *Y* y *Z*.
- Generalmente se usa en aplicaciones de Pick and Place

Antes de adentrarse en el diseño puntual del manipulador cartesiano, se especifica el tipo de movimiento aplicable del robot del presente proyecto, de los cuales, existen 4 tipos como indica Barrientos, et al. (1997).

- Robot Secuencial
- Robot de Trayectoria Controlable
- Robot Adaptativo
- Robot Tele-manipulado

Para el presente proyecto se ha escogido el robot de trayectoria controlable, con atributos de control adaptativo producto de la visión artificial para encontrar las piezas de ajedrez.

Selección de Materiales Estructurales

Una vez determinado el tipo de morfología y tipos de movimiento del robot, es necesario adentrarse en la selección de los materiales que conforman el sistema.

Para la selección de los materiales estructurales, se analizan las ventajas y desventajas en la Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18.

Tabla 15.
Ventajas y Desventajas del PLA.

PLA (Ácido Poliláctico)	
Ventajas	Desventajas
Mecanizado fácil en impresoras 3D	Poca vida mecánica útil al ser sometido a esfuerzos y deflexiones recurrentes.
Formas complicadas y diseños de precisión	Costoso
Bajo Peso y poca inercia	Tamaño dependiente de la impresora 3D
Apariencia llamativa y de calidad	Tiempo de fabricación moderado

Fuente: (MakeItFrom, 2009).

Tabla 16.
Ventajas y Desventajas del acrílico PMMA.

Acrílico PMMA	
Ventajas	Desventajas
Costo medio a bajo	Gran dureza pero fragilidad considerable
Poca inercia y peso	Poca vida útil en elementos sometidos a esfuerzos cíclicos
Manufactura Sencilla (Córte por láser)	Disponibile solo en planchas con grosores determinados
Apariencia de calidad	Costoso en formas de varillas o similares.

Fuente: (IdePlas, 2012).

Tabla 17.
Ventajas y Desventajas del acero inoxidable AISI 302.

Acero Inoxidable AISI 302	
Ventajas	Desventajas
Gran resistencia mecánica	Alto costo del material
Soporta las condiciones atmosféricas	Manufactura costosa
Buena maleabilidad	Alta inercia y peso
Apariencia favorable	

Fuente: (SUMITEC, 2010).

Tabla 18.
Ventajas y Desventajas de la aleación de aluminio.

Aleación de Aluminio T6	
Ventajas	Desventajas
Buena resistencia y propiedades mecánicas	Dificultad en la soldadura
Excelente relación peso/resistencia a la tensión	Costo de maquinación y adquisición considerables.
Buena maleabilidad	
Poca inercia en relación a su peso	

Fuente: (VALENCIANA DE ALUMINIOS, n.d.)

Ahora se realiza una tabla de ponderaciones mostrada en la Tabla 19, donde se establecen los criterios técnicos más importantes para seleccionar los materiales en este proyecto.

Tabla 19.
Resultados de ponderar los materiales y los criterios de selección.

	Disponibilidad	Costo	Fac. de Maquinar	Inercia y Peso	Res Mecánica	Suma + 1	Pondera
PLA	0,027	0,013	0,065	0,094	0,023	1,22	0,24
PMMA	0,038	0,023	0,043	0,069	0,053	1,23	0,25
Acero Inox	0,070	0,019	0,065	0,038	0,082	1,27	0,25
Aluminio	0,081	0,029	0,043	0,050	0,076	1,28	0,26
					Suma	5,00	1,00

Como conclusión del análisis de la Tabla 19 se tiene:

- La aleación de aluminio 7075 T6 debe ser aplicada con mayor frecuencia que los otros materiales debido a sus propiedades mecánicas favorables.
- El PLA y el acrílico PMMA deben ser usados con poca frecuencia debido a sus propiedades de alta ductilidad y fragilidad. Sin embargo deben ser considerados para la sujeción de uniones no soldables, por ejemplo, con el aluminio.
- Así mismo, el PMMA y el PLA deben ser combinados con los elementos metálicos para formar estructuras sólidas.
- Como alternativa al PLA se puede ocupar el plástico sintético ABS, pero se recomienda el anterior porque posee mejores propiedades mecánicas.
- Un factor determinante en la estabilidad del robot es la inercia y el peso. Para ello se deben considerar a los materiales más livianos y resistentes.
- El acero inoxidable es un elemento que brinda la mayor estabilidad a la estructura cartesiana. Este debe ser usado con moderación debido a su peso.

En la siguiente fase de diseño, se analiza, específicamente, el impacto de cada uno de los materiales sobre el desempeño estructural, mediante el modelamiento y el análisis estático de los componentes, mecanismos y ensambles.

Selección de Mecanismos y Transmisiones mecánicas.

En el siguiente apartado se analizan los mecanismos disponibles para transmitir el movimiento de las articulaciones del manipulador robótico.

Para tener un criterio técnico de los mecanismos usados en robótica, se denotarán los ejemplos de mecanismos más usados en estructuras robóticas según Barrientos et al. (1997), expuestos en la Tabla 20.

Tabla 20.
Sistemas de transmisión para robots.

Entrada - Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular - Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa Dentada	Distancias Grandes	Holguras
	Cadena	Distancias Grandes	Ruido
	Paralelogramo	Distancias Grandes	Giro Limitado
	Cable	Distancias Grandes	Deformidad
Circular - Lineal	Tornillo sin Fin	Poca Holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura Media	Rozamiento
Linear - Circular	Paral	Holgura Media	Control Difícil
	Cremallera	Holgura Media	Rozamiento

Fuente:(Barrientos Cruz et al., 1997).

En base a la información de la Tabla 20, se pueden obtener las siguientes conclusiones de selección para la transmisión de movimiento.

- El sistema correa dentada/piñón logra cubrir grandes distancias pero posee una holgura mayor que otros sistemas de transmisión. Este sistema es ideal para el desplazamiento del robot cartesiano sobre el plano de ajedrez.
- El sistema de correa dentada/piñón puede producir una gran velocidad con fuerza moderada dependiendo de los tamaños de las poleas. Este sistema sin embargo no es apto para el eje vertical, pues resbalaría con facilidad y su torque sería insuficiente para soportar o mover el peso del efector final y la carga.
- El sistema de tuerca/tornillo sin fin es un sistema idóneo para el movimiento del eje vertical, debido a su gran agarre y torque, empleando poca fuerza. Las desventajas son el rozamiento y la baja velocidad.

Para escoger los mecanismos de acuerdo a la articulación, se ha dividido al sistema en 3 ejes basados en la clasificación de Schneider Electric (2008) para manipuladores cartesianos (Figura 32):

- Eje portal vertical.
- Eje portal longitudinal.
- Eje portal transversal.

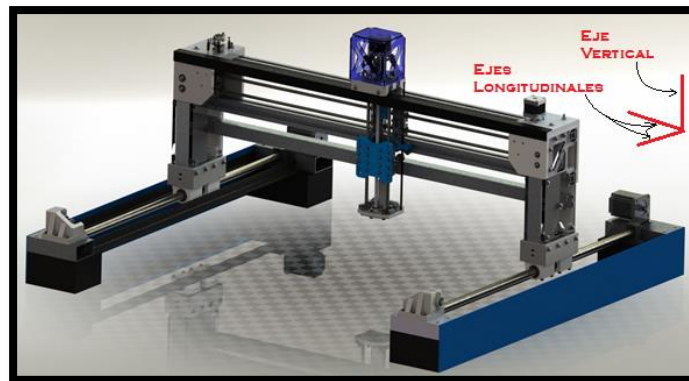


Figura 32. Ejes en el manipulador robótico cartesiano.

Fuente: Propia.

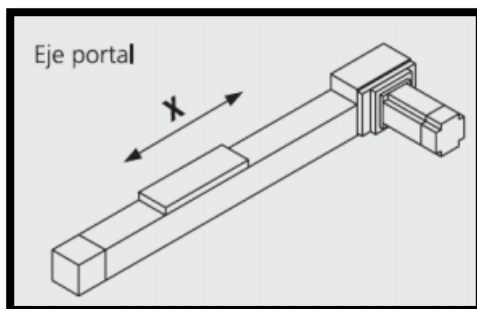


Figura 33. Eje portal.

Fuente: (Slazar Pereyra, 2008).

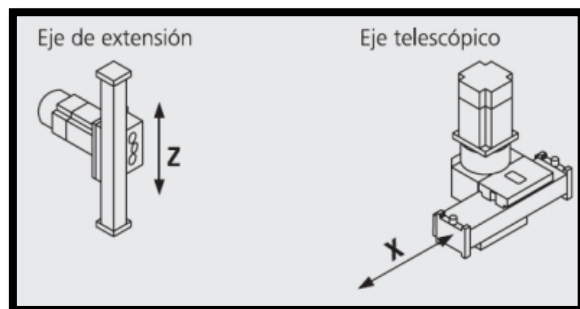


Figura 34. Ejes extensible y telescópico respectivamente.

Fuente: (Slazar Pereyra, 2008).

Los sistemas de eje portal (Figura 33) tienen ventaja sobre los sistemas de ejes telescópicos o extensibles (Figura 34) en cuanto a la distribución de fuerzas y soporte estructural. La única desventaja con el eje portal es la cantidad de material y mecanismos ocupados, pero son justificados debido a su confiabilidad en el movimiento y en la gran capacidad de carga. Por ello se descartan los sistemas extensibles y telescópicos al presentan mayor imprecisión en su carrera y la distancia que alcanzan no es la suficiente.

Se ponderan entonces los ejes portales de cada articulación de acuerdo con los criterios de diseño mostrados a continuación.

Eje longitudinal y transversal

Como se observó en el análisis de la Tabla 20, los sistemas de transmisión mejor adaptados para el eje longitudinal y transversal son los siguientes:

- Piñón/Correa Dentada
- Cadena/Rueda Dentada
- Piñón/Cremallera

Se evalúan los mecanismos de acuerdo a los parámetros técnicos de la Tabla 21.

Tabla 21.

Resultados de ponderar los mecanismos en los ejes del plano de acuerdo a criterios de selección.

	Poco Juego	Rapidez	Fuerza	Distancia	Suma + 1	Pondera
Correa/Piñón	0,75	1	0,4	1	4,15	0,3739
Cadena/Rueda dentada	0,25	0,75	0,5	0,8	3,3	0,2973
Piñón/Cremallera	0,5	0,9	1	0,25	3,65	0,3288
				Suma	11,1	1

Como se observa en la Tabla 21, el mecanismo de Correa dentada/Piñón cumple de mejor manera con los criterios de diseño.

Eje vertical

Se consideran los mecanismos de transmisión de la Tabla 20 para el eje vertical:

- Tornillo sin fin/Tuerca
- Tornillo sin fin/Corona
- Piñón/Cremallera

Ahora, se evalúan los mecanismos de acuerdo a criterios técnicos cualitativos tal y como se observa en la Tabla 22.

Tabla 22.

Resultados de ponderar los mecanismos en el eje vertical de acuerdo a los criterios de selección.

	Poco Juego	Rapidez	Fuerza	Distancia	Suma + 1	Pondera
Tornillo sin fin/Tuerca	0,75	0,25	1	0,5	3,5	0,3784
Tornillo sin fin/Corona	0,5	0,5	0,75	0,25	3	0,3243
Piñón/Cremallera	0,25	0,75	0,25	0,5	2,75	0,2973
				Suma	9,25	1

Como se observa en la Tabla 22, el tornillo sin fin/tuerca es el mecanismo más apto para desempeñar el movimiento a lo largo del eje vertical.

3.3.1.2. Diseño final mecánico del manipulador robótico cartesiano

En este apartado se estudian a fondo los materiales, mecanismos y morfologías del manipulador robótico cartesiano mediante el dimensionamiento y el modelamiento. Además se hacen uso de herramientas de CAD y CAE para garantizar los estudios sobre la parte física del manipulador.

Análisis estructural de la morfología del manipulador cartesiano

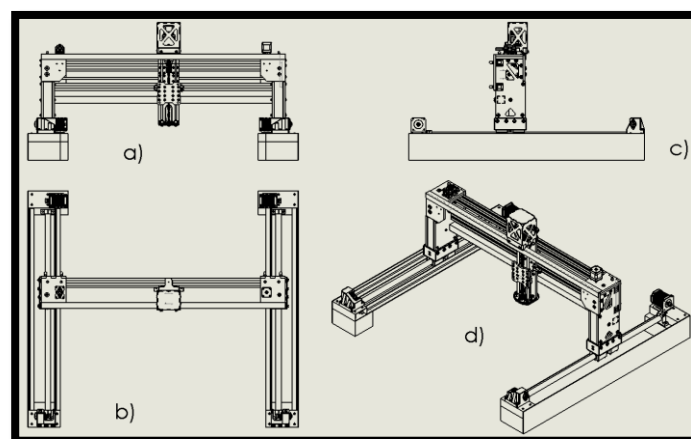


Figura 35. Diferentes vistas del manipulador cartesiano para este proyecto. a) vista frontal, b) vista superior, c) vista lateral, d) vista isométrica.

Fuente: Propia.

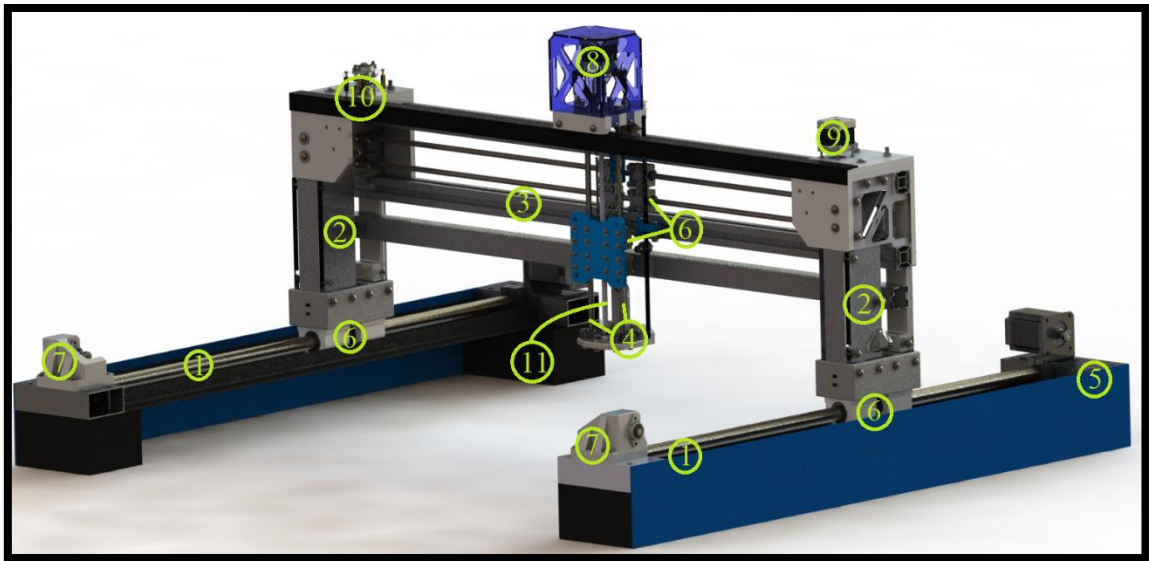


Figura 36. Numeración de partes el manipulador robótico cartesiano
Fuente: Propia.

Tabla 23.

Lista de componentes generales del manipulador robótico cartesiano.

No.	Nombre de la Parte
1	Ejes longitudinales
2	Columnas
3	Eje transversal
4	Ejes verticales
5	Actuador eje longitudinal
6	Cojinetes lineales
7	Soporte de los piñones para los ejes longitudinales
8	Soporte del actuador y motor del eje vertical
9	Soporte del actuador y motor del eje transversal
10	soporte del piñón del eje transversal
11	Mecanismo tornillo sin fin/tuerca

Para estudiar la factibilidad estructural del sistema mecánico, primero es necesario enlistar los componentes del robot (Figura 35 y Figura 36) como se muestra en la Tabla 23.

Antes de continuar con los análisis posteriores, se deben conocer las dimensiones objetivo del manipulador robótico. Para ello se tiene en la Tabla 24, el volumen de trabajo del robot cartesiano en cada articulación.

Tabla 24.***Volumen de Trabajo del manipulador robótico cartesiano.***

Parámetro	Valor
Distancia a alcanzar, Eje Longitudinal	722,5 (mm)
Distancia a alcanzar, Eje Transversal	712 (mm)
Distancia a alcanzar, Eje Vertical	185 (mm)

Ahora, se muestra la estrategia de diseño estructural del robot. Para ello se dividirá el robot en 7 sub-módulos, a saber, dimensionamiento de las articulaciones, estudio del movimiento, análisis estructural, columnas, cojinetes deslizantes/rodantes, ejes y empotramientos.

Análisis estructural de los ejes de la base

Se seleccionaron barras de acero inoxidable AISI 302 (Figura 37) para soportar las columnas y el sistema de eje transversal y vertical. Las barras de acero se comportan de acuerdo a la teoría de vigas empotradas. Por ello se realizará el estudio de las vigas y determinar los siguientes aspectos:

- Deflexiones y esfuerzos resultantes por la incidencia del peso de la estructura del arco, columnas y sus mecanismos, efector final y la carga (piezas de ajedrez).
- Factores de seguridad

Como consideraciones, Budynas et al. (2008) afirman que se puede realizar el análisis simplemente donde la carga sea crítica, por ejemplo en ubicaciones axiales donde se produzcan momentos flexionantes importantes, concentradores de esfuerzos o en las superficies del material.



Figura 37. Viga de 20 mm de diámetro de acero inoxidable soportada por acoples de SK20.

Para empezar es necesario conocer el peso que una sola viga va a soportar:

$$P_T = \frac{P_{Sist\ Eje\ vertical} + P_{Actuadores} + P_{Eje\ transversal}}{2} + P_{viga} + P_{Columna} \quad (1)$$

$$P_{Columna} = 3.973\ Kg$$

$$P_{Sist\ Eje\ vertical} = 2.674\ Kg$$

$$P_{Actuadores} = 1.58\ Kg$$

$$P_{Eje\ transversal} = 3.903\ Kg$$

$$P_{viga} = 2.261\ Kg$$

La división entre 2 significa que el peso está distribuido entre las 2 vigas paralelas que soportan la estructura.

$$P_T = \frac{2.674 + 1.58 + 3.903}{2} + 2.261 + 3.973 = 10.31\ Kg$$

$$F_T = 10.31 \times 9.8 = 101.0625\ N$$

De aquí, se realiza el Diagrama de Cuerpo Libre para interpretar gráficamente las fuerzas y momentos involucrados (Figura 38).

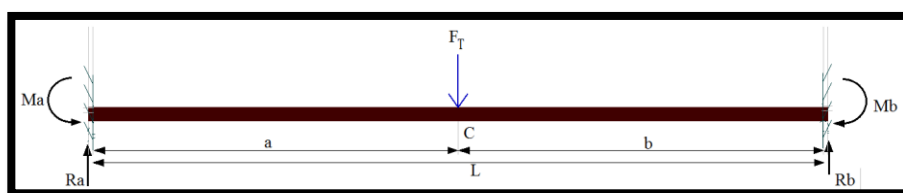


Figura 38. DCL de la viga de 20 mm de diámetro y 900 mm de largo del eje longitudinal.
Fuente: Propia.

Budynas et al. (2008) en el libro de Diseño de elementos mecánicos de Shigley recopilan una serie de fórmulas para calcular las reacciones y momentos en una viga estáticamente indeterminada (Figura 39).

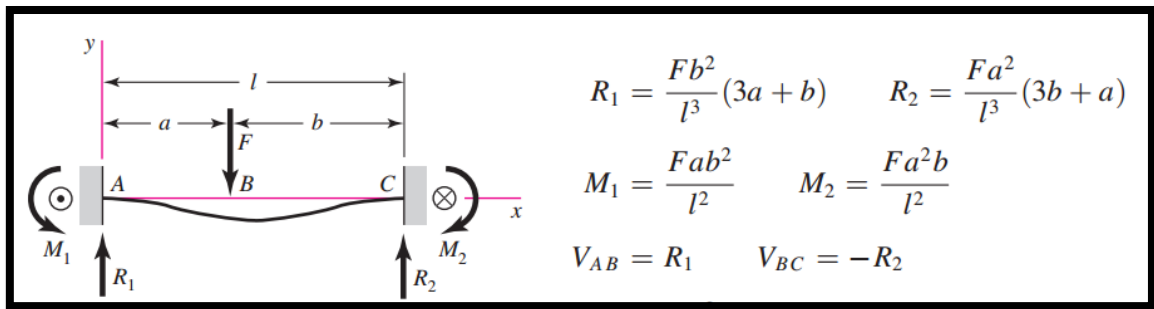


Figura 39. DCL de una viga estáticamente indeterminada.

Fuente: (Budynas & Keith Nisbett, 2008).

En tal razón:

$$R_A = R_B = \frac{(F_T)(b)}{L^3}(3a + b) \quad (2)$$

$$M_A = M_B = \frac{(F_T)(b)(a)^2}{L^2} \quad (3)$$

Conociendo que:

$$a = b; \quad a = 0.44 \text{ mm}; \quad b = 0.44 \text{ mm}; \quad L = 880 \text{ mm}.$$

Nota: el valor de 880 mm resulta de los 900 mm de la viga menos 10 mm que los soportes SK20 utilizan para empotrar las vigas.

Se reemplazan los valores en (2) y (3):

$$R_A = R_B = \frac{(101.0625)(0.44)}{0.88^3}[3(0.44) + (0.44)] = 50.531 \text{ N}$$

$$M_A = M_B = \frac{(101.0625)(0.44)(0.44)^2}{0.88^2} = 11.11 \text{ N.m}$$

Ahora, es posible conocer el esfuerzo y la deflexión aplicada en la zona crítica y determinar con estos datos la factibilidad del componente.

Para la deflexión se usa la fórmula descrita por Budynas & Keith Nisbett, (2008) en vigas estáticamente indeterminadas.

$$\delta_{AC} = \frac{(F)(x)^2}{48EI} (4x - 3L) \quad (4)$$

Recopilando los datos:

Módulo de elasticidad:

$$E_{\text{acero AISI 304}^*} = 192000 \frac{N}{mm^2}$$

* tomado del manual técnico del acero inoxidable (Irestal Group, n.d.)

El momento de inercia:

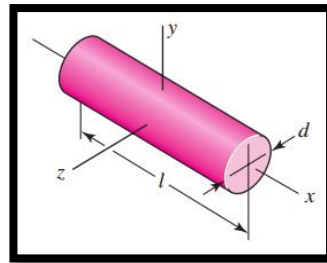


Figura 40. Cilindro y sus ejes.
Fuente: (Budynas & Keith Nisbett, 2008).

$$I_y = I_z = \frac{m}{48} (3d^2 + 4l^2) \quad (5)$$

Reemplazando en (5):

$$m = 2.261 \text{ Kg}; \quad d = 20 \text{ mm}; \quad l = 900 \text{ mm}$$

$$I_z = \frac{2.261}{48} (3(20)^2 + 4(900)^2)$$

$$I_z = 152674.025 \text{ Kg} * \text{mm}^2$$

Y la deflexión (reemplazada en (4)) en el punto crítico que es en el centro $x = 450 \text{ mm}$, equivaldría a:

$$\delta_{AC} = \frac{(101.0625)(450)^2}{48(192000)(152674.025)} (4(450) - 3(900))$$

$$\delta_{AC} = -0.01309 \text{ mm}$$

Lo que indica una deflexión negativa (hacia abajo) de -0.013 mm , que se comprueba mediante el análisis en un software de simulación CAD/CAE.

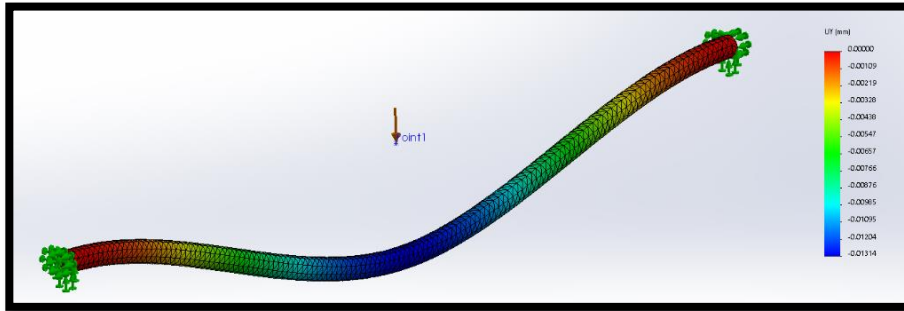


Figura 41. Deflexión en software CAE.

Fuente: Propia.

También se obtiene el esfuerzo ocasionado por la aplicación de la fuerza total en esta viga, considerando el área circular de la viga seccionada transversalmente mostrada en la ecuación (6).

$$\sigma = \frac{F_T}{\pi \times \frac{D^2}{4}} \quad (6)$$

$$\sigma_{viga \ 20 \ mm} = \frac{101.0625}{\pi \times \frac{20^2}{4}}$$

$$\sigma_{viga \ 20 \ mm} = 0.3216 \frac{N}{mm^2}$$

Y en el software de simulación CAD/CAE mostrado en la Figura 42.

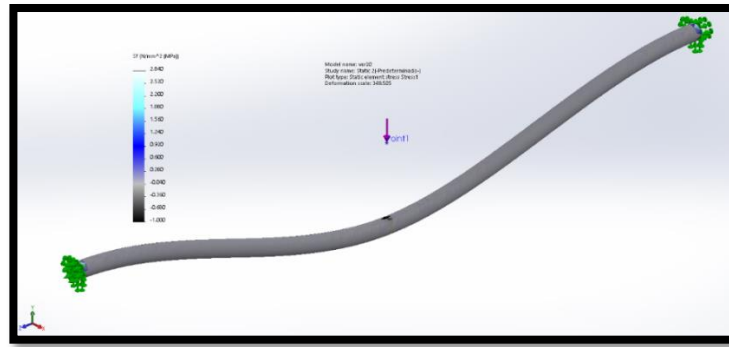


Figura 42. Análisis de esfuerzos en la viga de 20 mm mediante software CAE.
Fuente: Propia.

Se determina el factor de seguridad del material mediante la ecuación (7):

$$FS = \frac{\sigma_{ultima}}{\sigma_{admisible}} \quad (7)$$

Se conoce que el acero inoxidable AISI 304 posee una resistencia última a la tracción de $517.02 \frac{N}{mm^2}$, de acuerdo a las tablas de la AISI descritas en (Budynas & Keith Nisbett, 2008). En este caso se opta por la resistencia última a la tracción para brindar un margen de seguridad apropiado calculado con el esfuerzo admisible calculado: $\sigma_{viga\ 20\ mm} = 0.3216 \frac{N}{mm^2}$. Reemplazando en (7):

$$FS = \frac{517.05}{0.3216} = 1607.283$$

El factor de seguridad de **1607.283** indica que el cuerpo está sobredimensionado y no va a fallar en estas condiciones. Su utilización es aceptada.

Análisis estructural del sistema de ejes transversales

Con la estabilidad de los ejes longitudinales, se realiza el análisis de las vigas que conforman el eje transversal, sus reacciones y momentos descritos en la Figura 62 y los resultados en la Tabla 26.

En esta subsección se analizarán las vigas mediante el método de elementos finitos con el uso de un software CAD/CAE. Se omitirá el análisis teórico y se aplicará el estudio numérico de elementos finitos por resultar igual o más eficiente que el método teórico.

- **Perfiles en X:**

Para el perfil en X de aluminio se considera únicamente la distribución de la carga puesto que no soporta ninguna fuerza adicional que no sea la suya propia, y solo cumple con la opción de sujetar ambas columnas. Por ende se considera solamente el peso del perfil como se muestra en la ecuación (8).

$$F = (W_{Peso\ Perfil\ X} \times L_{Perfil\ X}) \times G \quad (8)$$

$$F = (0.745 \times 1.07) \times 9.8 = 3.907\ N$$

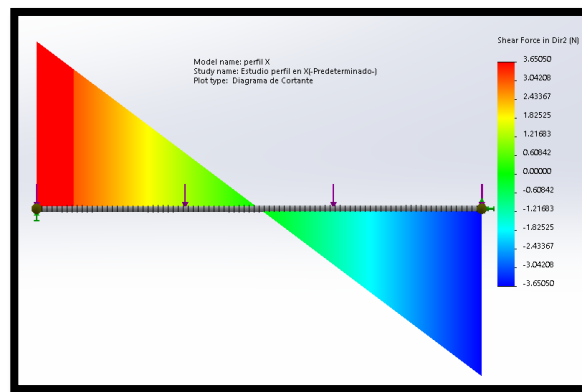


Figura 43. Diagrama del cortante del perfil en X de Aluminio 7075 T6.
Fuente: Propia.

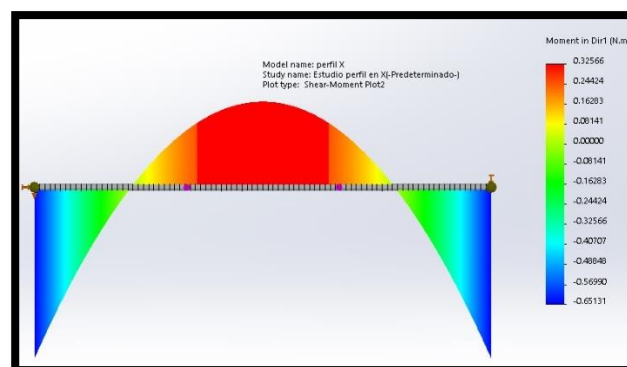


Figura 44. Diagrama de momentos en el perfil en X de Aluminio 7075 T6.
Fuente: propia.

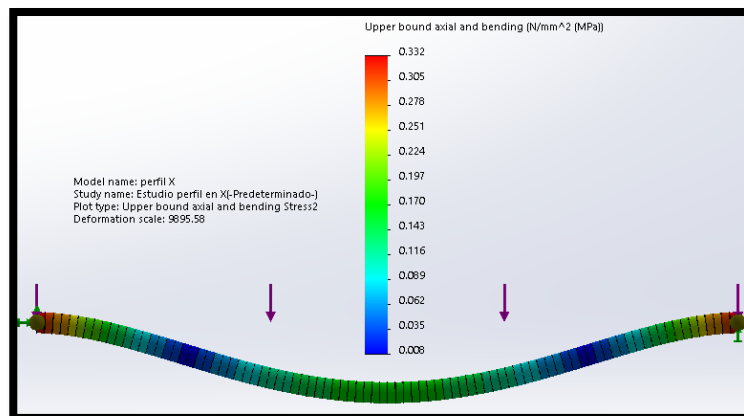


Figura 45. Esfuerzos aplicados en el perfil en X de Aluminio 7075 T6.
Fuente: Propia.

Como se observa en la Figura 43 y Figura 44, la fuerza máxima del cortante es **3.6505 N** y el máximo momento aplicable es **0.6513 N.m**. En la Figura 45 se observa que el esfuerzo máximo aplicable es **0.332 MPa**. En la tabla VALENCIANA DE ALUMINIOS, (n.d.), el aluminio 7075 T6 tiene un esfuerzo último de hasta **480 MPa**, el mismo que se usará en la ecuación (7) para calcular su factor de seguridad.

$$FS = \frac{480}{0.332} = 1445.783$$

Con este factor de seguridad de **1445.783**, se comprueba la factibilidad para ser usado en este sistema.

- **Tubo Cuadrado de Aluminio 7075 T6**

Otro componente estructural del eje transversal es el tubo cuadrado de aluminio 7075 T6 que permite la estabilidad en la parte central de las columnas. Dicho tubo evita que las columnas tiendan a flejar por torsión ocasionando una interrupción del movimiento de los cojinetes lineales.

Para este elemento solo se toma la distribución del peso del propio tubo cuadrado mostrado en la ecuación (9).

$$F = (W_{Peso\ Tubo\ Cuadrado} \times L_{Tubo\ Cuadrado}) \times G \quad (9)$$

$$F = (0.358 \times 1.1) \times 9.8 = 3.859\ N$$

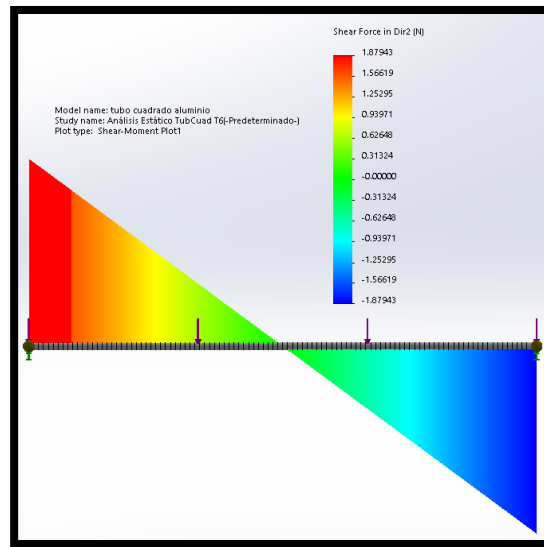


Figura 46. Diagrama del cortante del tubo cuadrado de Aluminio 7075 T6.
Fuente: Propia.

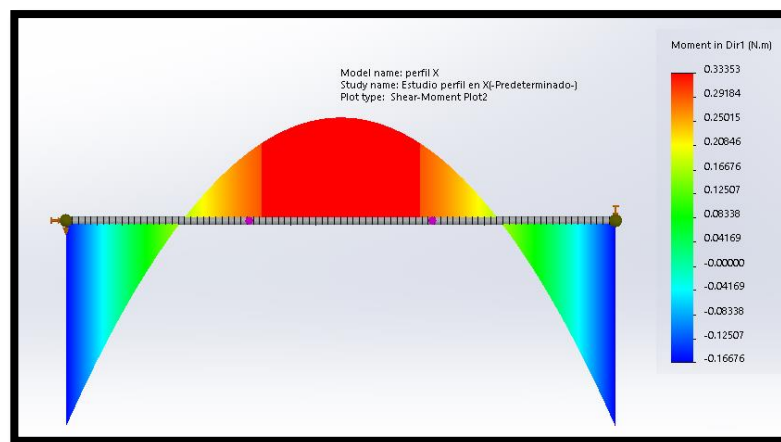


Figura 47. Diagrama de momentos en el tubo cuadrado de Aluminio 7075 T6.
Fuente: Propia.

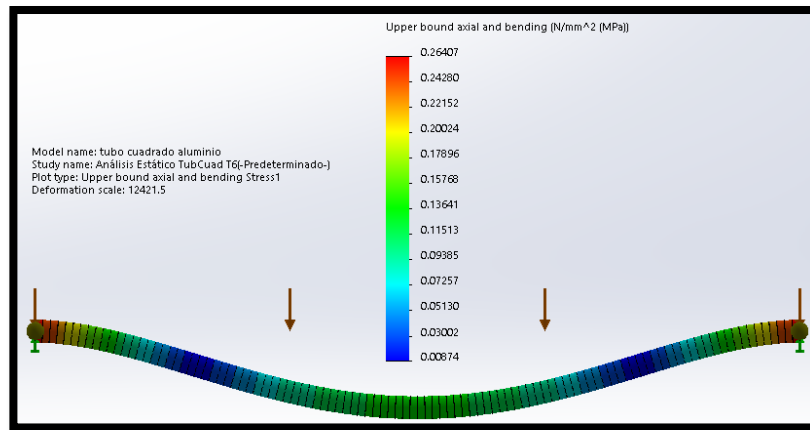


Figura 48. Diagrama del esfuerzo aplicado en el tubo cuadrado de Aluminio 7075 T6.
Fuente: Propia.

En la Figura 46 y Figura 47, se establecen los diagramas de cortante y momento flector **1.8794 N** y **0.3354 N.m** respectivamente. De acuerdo a la tabla de aluminios de VALENCIANA DE ALUMINIOS, (n.d.), el esfuerzo último para calcular el factor de seguridad es de **480 MPa**. Ahora para calcularlo se usa la ecuación (7) junto con el resultado del esfuerzo es **0.26407 MPa** de la Figura 48.

$$FS = \frac{480}{0.26407} = 1817.699$$

Con lo que se comprueba su factibilidad estructural en este proyecto.

- **Eje de acero AISI 304 (8 mm)**

Otro componente estructural importante que sirve de guías para los cojinetes deslizantes es el eje de 8 mm de acero AISI 304.

Dichos componentes son importantes pues son las guías del carro deslizante en el eje transversal, por ende se considera la distribución del peso y el peso parcial del carro (sobre 4 cojinetes) que estos ejes soportan. El peso del carro transversal esta soportado en los dos ejes de acero AISI 304 y en el perfil de hierro dúctil como se muestra en la ecuación (10).

$$F = \left[\frac{W_{Sist\ Eje\ Vertical}}{4} + (W_{Peso\ eje\ 8mm} \times L_{eje\ 8mm}) \right] \times G \quad (10)$$

$$F = \left[\frac{3.464}{4} + (0.402 \times 1.1) \right] \times 9.8 = 12.8203 \text{ N}$$

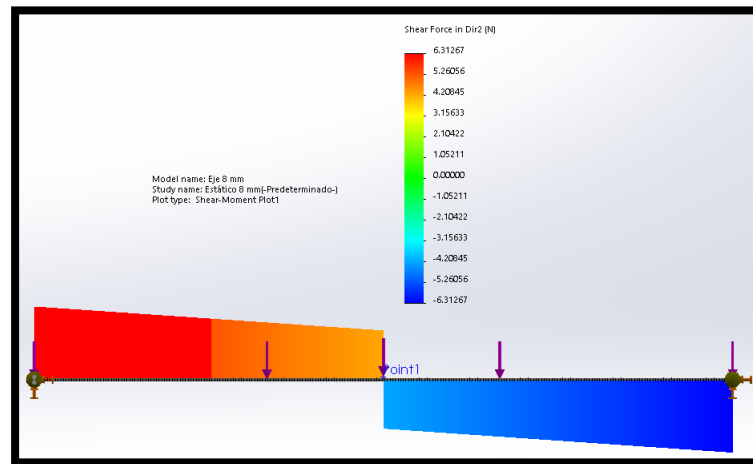


Figura 49. Diagrama del cortante del eje de 8 mm de acero AISI 304.
Fuente: Propia.

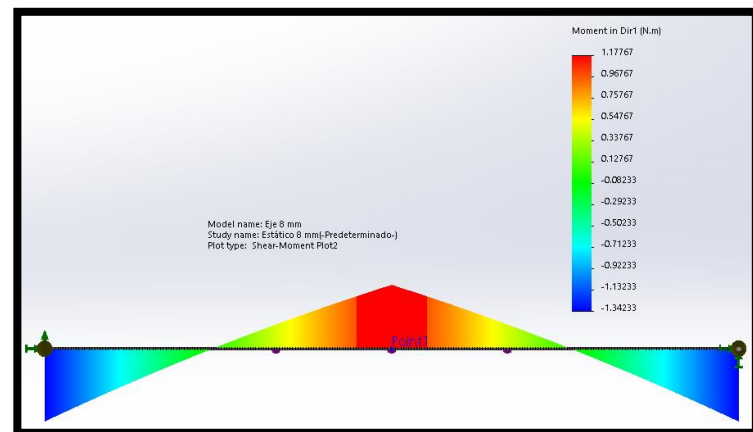


Figura 50. Diagrama del momento flector del tubo cuadrado de acero AISI 304.
Fuente: Propia.

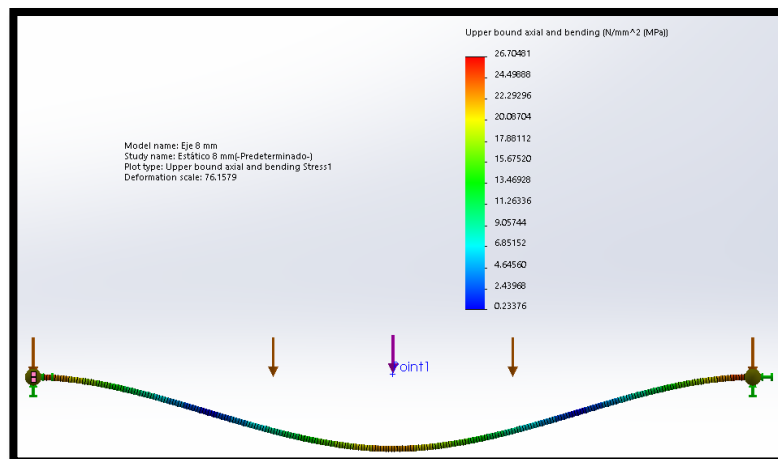


Figura 51. Diagrama del esfuerzo aplicado del tubo de acero AISI 304.

Fuente: Propia.

Con la Figura 49 y Figura 50 se obtienen los datos del cortante y el momento flector respectivamente: **6.312 N** y **1.117 N.m**. Y con el dato del esfuerzo calculado de **26.704 MPa** de la Figura 51 más el dato del esfuerzo último obtenido del manual del acero de SUMITEC (2010) aproximado en **620 MPa**, se calcula el factor de seguridad con la ecuación (7).

$$FS = \frac{620}{26.704} = 23.21$$

Por tanto es adecuado para el uso en los cojinetes lineales SC8UU.

- **Perfil en L de hierro dúctil.**

Este perfil tiene dos funciones, servir de soporte estructural para evitar la torsión en la parte superior de las columnas y, de soporte para el eje vertical donde descansan los rodamientos superiores del sistema de ejes verticales. Se realiza entonces su respectivo análisis de fuerzas, momentos y esfuerzos para conocer su factibilidad en el diseño.

Para este diseño se utilizan la distribución de peso del perfil y del sistema de eje vertical dividido para la mitad que es soportado por este perfil mostrado en la ecuación (11).

$$F = \left[\frac{W_{Sist Eje Vertical}}{2} + (W_{Peso Perfil L} \times L_{Perfil L}) \right] \times G \quad (11)$$

$$F = \left[\frac{3.464}{2} + (1.0281 \times 1.1) \right] \times 9.8 = 28.0565 \text{ N}$$

Con esta fuerza se utiliza el software de CAD/CAE y analizarlo.

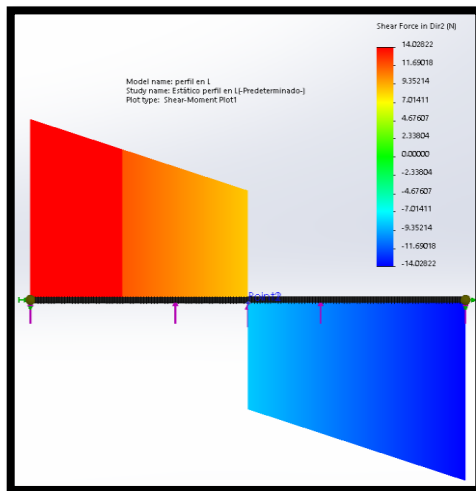


Figura 52. Diagrama del cortante del ángulo en L de hierro.
Fuente: Propia.

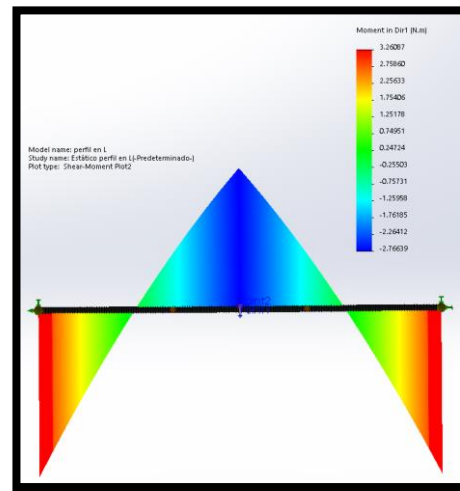


Figura 53. Diagrama del momento flector del ángulo en L de hierro.
Fuente: Propia.

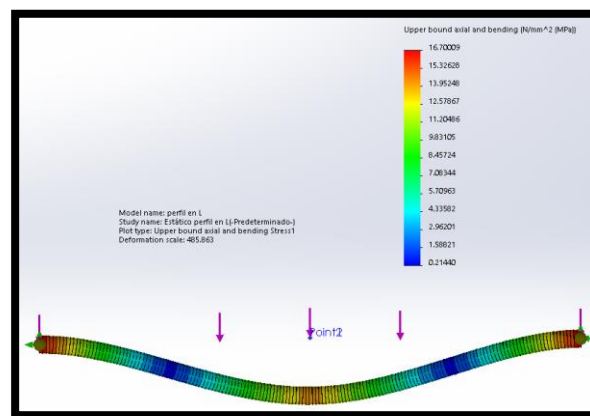


Figura 54. Diagrama del esfuerzo aplicado al ángulo en L.
Fuente: Propia.

En la Figura 52 y la Figura 53 se observa que la fuerza del cortante máximo **14.028 N** y el momento flector máximo, **3.2608 N.m**. También se tiene el esfuerzo máximo aplicado a esta viga que es de **16.7 MPa** obtenido de la Figura 54, que servirá para calcular el factor de seguridad con la ecuación (7). Adicional, se incluye el esfuerzo de ruptura del hierro dúctil el cual, de acuerdo a ACIPCO (n.d.) que es igual a **420 MPa**.

$$FS = \frac{420}{16.7} = 25.14$$

Por tanto, el elemento al ser mayor que la unidad, no fallará estáticamente.

Empotramientos SK20

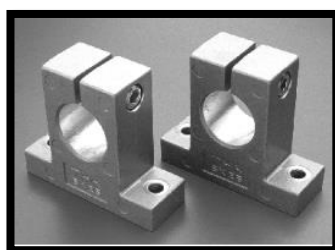


Figura 55. Soportes SK20.

Fuente: (T.E.A. Transmissions Pty Ltd, n.d.).

Una parte esencial de las vigas de los ejes longitudinales, son los soportes SK20 apreciables en la Figura 55, que sostienen la barra de los ejes longitudinales y los fijan al piso.

De acuerdo al catálogo de materiales ThyssenKrupp, (n.d.), el acero AISI/SAE 1060 del SK20 tiene una resistencia mecánica a la tracción de **850 MPa**. De acuerdo al esfuerzo obtenido en el análisis de los ejes longitudinales anteriormente, se tiene que el esfuerzo es **185.191 MPa**. Entonces, el factor de seguridad de este elemento resulta de utilizar la ecuación (7).

$$FS = \frac{850}{185.191} = 4.58$$

Con lo que se comprueba su factibilidad para soportar las vigas del eje longitudinal.

Análisis estructural de las columnas.

Como se observa en la Figura 36, el diseño de este robot cartesiano tipo Gantry consta de 2 columnas laterales (Figura 56), por lo que es necesario efectuar un análisis estático de columnas en ellas para conocer su solidez estructural.



Figura 56. Columna izquierda del robot cartesiano.
Fuente: Propia.

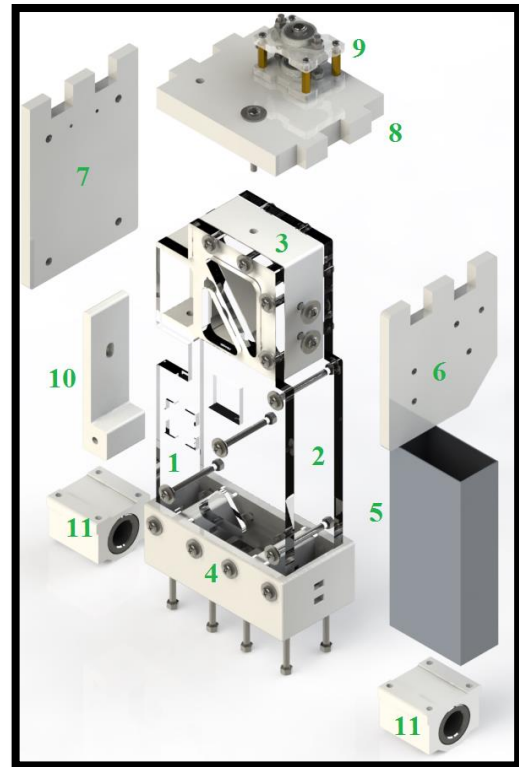


Figura 57. Vista explosionada de la columna izquierda.
Fuente: Propia.

Tabla 25.
Partes de la columna.

No.	Parte
1	Columna lateral posterior de PMMA
2	Columna lateral de PMMA
3	Acople de las columnas, perfiles de aluminio y soportes de PMMA
4	Soporte de placas PMMA, cojinetes lineales y correa de transmisión.
5	Tubo cuadrado de aluminio para añadir soporte entre placas
6	Soporte de PMMA frontal para el acople de columnas
7	Soporte de PMMA posterior para el acople de columnas
8	Soportes de PMMA superiores para el acople de columnas
9	Soporte del mecanismo giratorio para la correa en eje transversal
10	Sujetador de perfiles de aluminio y soporte adicional para columnas
11	Cojinetes lineales

La columna se analiza como un todo sólido y se efectúan los análisis en un software CAD/CAE. Además, con la teoría de columnas se determinarán los siguientes parámetros.

- Fuerza crítica de pandeo
- Factor de seguridad
- Deflexiones y esfuerzos

Primero es necesario considerar los elementos estructurales que actúan puramente como columnas mostrados en la Figura 58, detallados en la Figura 57 y Tabla 25.

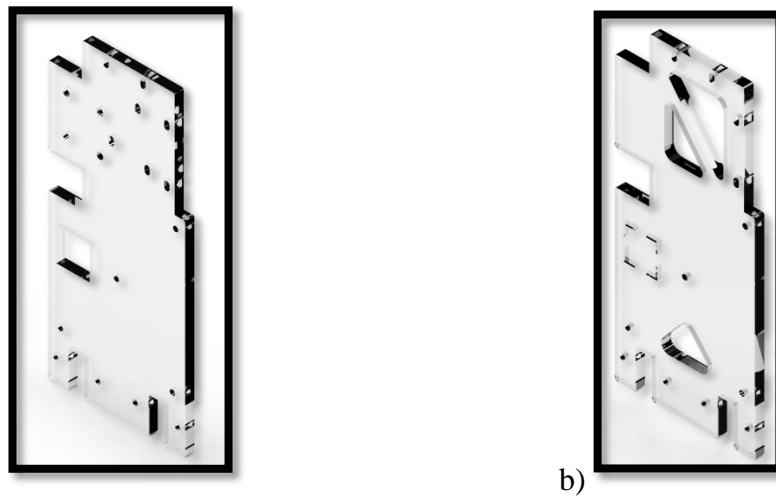


Figura 58. Placas de PMMA para una columna de la estructura Gantry, a) Columna lateral, b) Columna lateral posterior.

Fuente: Propia.

De aquí se hacen las siguientes consideraciones:

- Se toman como rectangulares a las columnas puesto que en los espacios vacíos encajan piezas adicionales sin crear concentradores de esfuerzos importantes.
- Los elementos internos de las columnas como el acople en impresión 3D o el tubo rectangular de aluminio dan firmeza a la columna y aportan con propiedades estructurales, pero solo se consideran al par de placas en acrílico PMMA, como columnas.

De acuerdo a Budynas & Keith Nisbett, (2008), se recomienda tomar a la estructura como empotrada en el tope y articulada en la base. Esto debido a que las dos columnas de todo el eje transversal se encuentran conectadas entre sí generando solidez que se manifiesta como empotramiento en la parte inferior (nótese que en la Figura 56 se tiene la

articulación en la parte inferior y el empotramiento en la parte superior; en la Figura 59, esta se encuentra al revés pero no afecta en el cálculo).

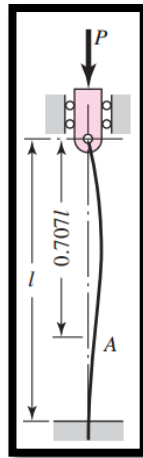


Figura 59. Representación de una columna articulada y empotrada.

Fuente: Budynas & Keith Nisbett, (2008).

Para determinar si la columna es corta o larga, se debe determinar la relación de esbeltez por materiales y por geometría. Para ello se usará la fórmula obtenida en Budynas & Keith Nisbett, (2008) mostrada en la ecuación (12).

$$\sigma_{cr} = \frac{C\pi^2 E}{\left(\frac{l}{k}\right)^2} \quad (12)$$

Siendo k es el radio de giro.

Para analizar el esfuerzo crítico σ_{cr} , es necesario tomar el esfuerzo último en compresión del PMMA como el esfuerzo crítico de falla que se muestra en (13).

$$\sigma_{cr} = \sigma_{compresión\ PMMA}^* = 150 \frac{N}{mm^2} \quad (13)$$

* tomado de (IdePlas, 2012).

Para esta columna se tienen además los siguientes datos:

$C = 1.2$ (tomado de: Budynas & Keith Nisbett, (2008) factor recomendado para columna articulada-empotrada).

$$E_{PMMA}^* = 2770 \frac{N}{mm^2} \text{ (* tomado del manual técnico: (IdePlas, 2012))}.$$

$$l = 260 \text{ mm}$$

También es necesario conocer el momento de inercia de la sección, tomada como rectangular.

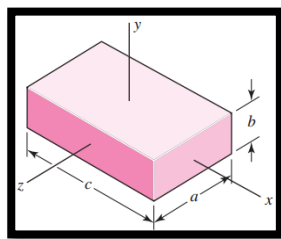


Figura 60. Gráfico de un prisma rectangular con ejes de los centroides.

Fuente: Budynas & Keith Nisbett, (2008).

$$I_z = \frac{m}{12} (b^2 + c^2) \quad (14)$$

$$I_z = \frac{0.35}{12} (0.009^2 + 0.026^2) = 2.207 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m^2}$$

Con estos datos se despeja la relación de esbeltez (por análisis de materiales) de la ecuación (12) y se obtiene la ecuación (15).

$$\frac{l}{k} = \sqrt{\frac{C\pi^2 E}{\sigma_{cr}}} \quad (15)$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_{mat} = \sqrt{\frac{1.2 \times \pi^2 \times (2.77 \times 10^9)}{1.05 \times 10^8}} = 17.676$$

También se realiza la relación de esbeltez por geometría mostrada en la ecuación (16).

$$\left(\frac{l}{k}\right)_{geom} = \frac{l}{\left(\frac{I_z}{A}\right)} \quad (16)$$

$$\left(\frac{l}{k}\right)_{geom} = \frac{0.26}{\left(\frac{2.207 \times 10^{-5}}{0.013 \times 0.009}\right)} = 1.377$$

Es decir:

$$1.377 < 17.676 \quad \therefore \left(\frac{l}{k}\right)_{mat} < \left(\frac{l}{k}\right)_{geom} \quad (17)$$

Con la ecuación (17) se comprueba que es una columna corta. Se encuentra después el esfuerzo de trabajo de esta columna dividiendo el esfuerzo crítico para el factor de seguridad seleccionado, en la ecuación (18); no se aplica la fórmula de Euler para columnas largas.

$$\sigma_w = \frac{\sigma_{cr}}{FS} \quad (18)$$

$$\sigma_w = \frac{105}{6} = 17.5 \frac{N}{mm^2}$$

El factor de seguridad de 6 se aplica debido al diseño de detalles cortados en las placas, ya que al no ser completamente rectangulares y poseer concentradores de esfuerzo, es necesario elevar este factor para evitar fallos.

Se encuentra la carga de trabajo para la columna con la ecuación (19) y despejada en la ecuación (20).

$$\sigma_w = \frac{P_w}{A} \quad (19)$$

$$P_w = (\sigma_w)(A) \quad (20)$$

$$P_w = (17.5)(9 \times 13) = 2047.5 \text{ N}$$

Y, 2047.5 N, transformado a peso da como resultado 208.928 Kg (ecuación (21)).

$$Peso = \frac{P_w}{g} \quad (21)$$

$$Peso = \frac{2047.5}{9.8} = 208.928 \text{ Kg}$$

Como se observa en la Figura 61, aparte de la columna de acrílico interna, también existe una columna externa que previene los efectos cortantes de los momentos y apoya en el soporte de las fuerzas del eje transversal y vertical, apoyados sobre esta. Por ello se describe a continuación un análisis de la deflexión y el esfuerzo para el ensamble.

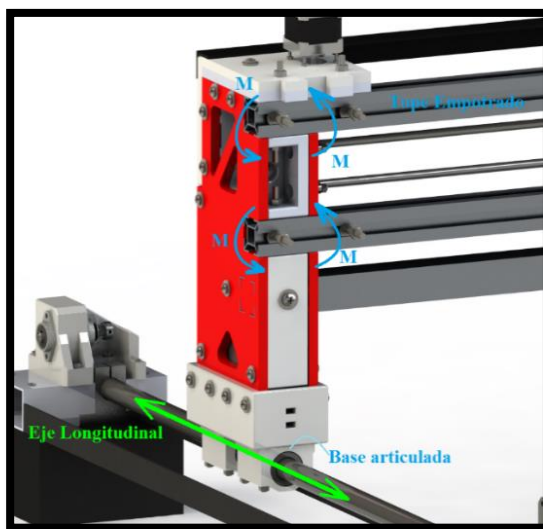


Figura 61. Momentos que se generan debido a la base articulada y el tope empotrado.

Fuente: Propia.

Para determinar las fuerzas y momentos que intervienen en la columna es necesario saber el efecto que los elementos del eje transversal efectúan sobre ésta. Los componentes de la Figura 62 se especifican en la Tabla 26.

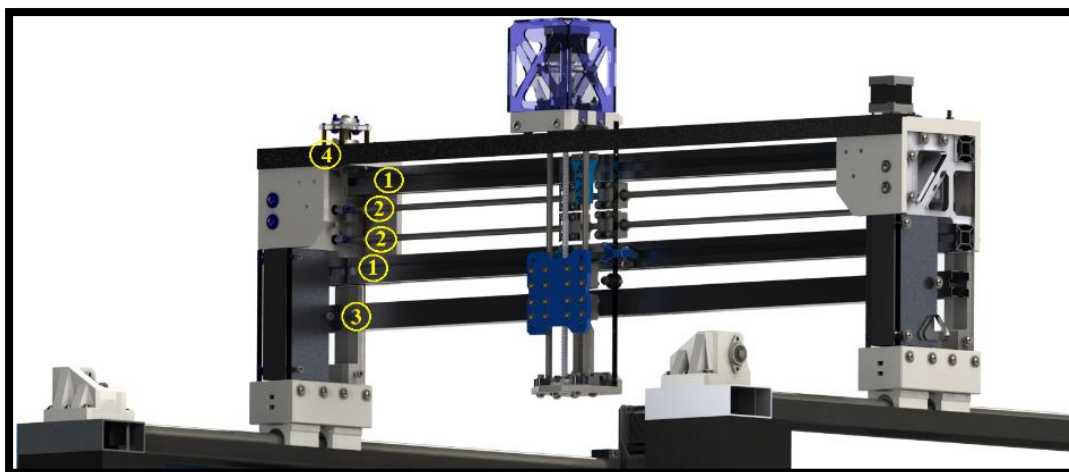


Figura 62. Componentes del eje transversal.

Fuente: Propia.

Tabla 26.

Componentes del eje transversal y su reacción sobre las columnas.

No.	Componente*	Reacción en la columna (N)	Momento generado por el empotramiento (N.m)
1	Perfiles en X de aluminio T6	3,907	0,6972
2	Guías acero inoxidable AISI 304	12,8208	3,128
3	Tubo cuadrado de aluminio T6	1,8794	0,3354
4	Ángulo en L, hierro dúctil	14,028	3,35

* El efecto de la fuerza del mecanismo de eje vertical se encuentra ya tabulado en esta tabla de acuerdo al soporte que este ejerce sobre los elementos del eje transversal.

Con los datos de la Tabla 26 se usa un software CAE para determinar la deflexión y el esfuerzo, mostrados en la Figura 63 y Figura 64.

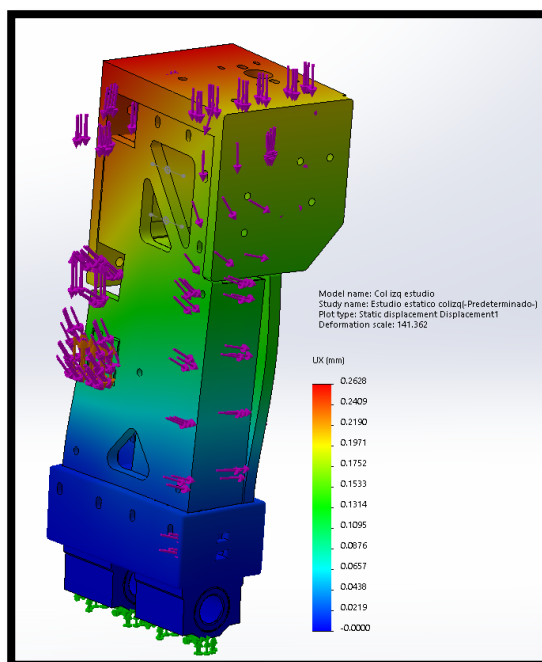


Figura 63. Deflexión resultante.
Deformación exagerada en escala de 142 a 1.

Fuente: Propia

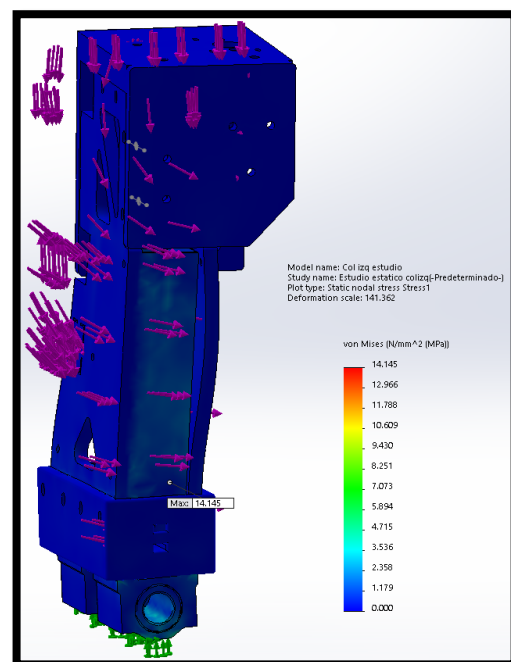


Figura 64. Esfuerzo de Von Mises resultante.
Deformación exagerada en escala de 142 a 1.

Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 63 y Figura 64, la deflexión máxima que ocurre en la columna es de **0.26 mm** en la parte posterior y el esfuerzo de Von Mises resultante máximo

es de **14.145 MPa**, respectivamente. Por ende se justifica el factor de seguridad de 6 estimado para la columna, expuesto en la ecuación (22).

$$14.145 \text{ MPa} < 17.5 \text{ MPa} \quad (22)$$

Conclusiones sobre las columnas:

- El peso a soportar por las columnas con el peso de los elementos del eje transversal, así como los sensores, cables y actuadores no sobrepasan los **20 Kg**, y como el peso que puede soportar esta columna es de **208.928 Kg** se puede aceptar su uso.
- El diseño cuenta con una segunda placa de PMMA como columna, mostrada en el literal b) de la Figura 58 por la necesidad de eliminar las vibraciones que produce el movimiento de todo el marco Gantry al desplazarse. Dicho elemento aporta con solidez estructural y un soporte de carga mayor.
- Las estructuras internas del acople como el tubo cuadrado de aluminio y el acople impreso en 3D, generan un soporte estructural conectando las placas de PMMA evitando el pandeo excesivo de la columna.

Análisis estructural de los soportes para las correas en el eje longitudinal

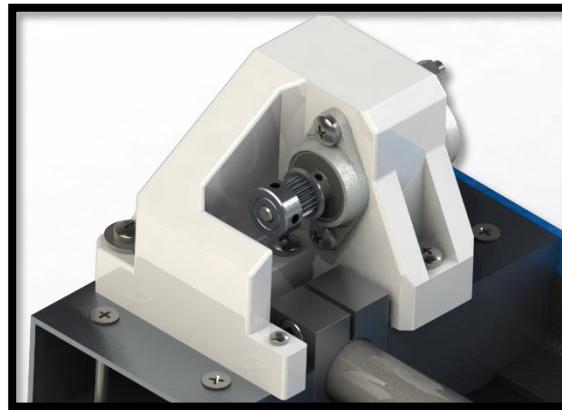


Figura 65. Soporte de eje y piñón GT2, y chumaceras KFL08 para el eje longitudinal.

Fuente: Propia.

Otra análisis crítico corresponde al soporte de los ejes con los piñones (Figura 65), que alojan la correa dentada GT2 (tensada en el otro extremo) con el motor, creando una banda de transmisión de movimiento circular/lineal para el eje longitudinal.

Para el estudio se utilizan los resultados de las fuerzas en las chumaceras obtenidas en las ecuaciones (109) y (110). Y mediante el método de elementos finitos en el software CAD, se calcula su deflexión y esfuerzos críticos.

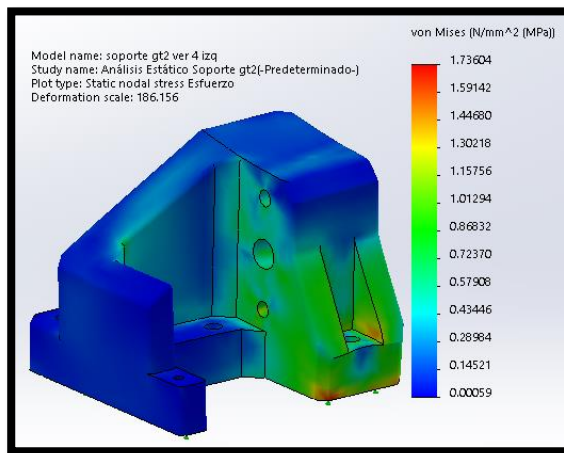


Figura 66. Esfuerzo de Von Mises resultante. Deformación exagerada en escala de 4000 a 1. Fuente: Propia.

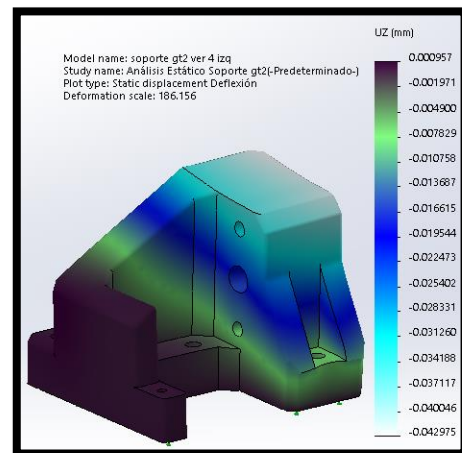


Figura 67. Deflexión en el eje perpendicular al eje. Deformación exagerada en 4000 a 1. Fuente: Propia.

Se tiene el esfuerzo igual a **1.736 MPa** de acuerdo a la Figura 66, y la deflexión máxima de **0.000957 mm** de acuerdo a la Figura 67. En la tabla del plástico ABS de SUPERTRONIC, (n.d.) se establece una resistencia a la tracción de **65 MPa**. Por lo tanto se tiene el factor de seguridad usando la ecuación (7):

$$FS = \frac{65}{1.73604} = 37.441$$

El factor de seguridad es **37.441**, el mismo que es superior al requerido. Por lo tanto es aplicable para el uso.

Análisis estructural de los soportes para las correas en el eje transversal

Tal como en el eje longitudinal, en el eje transversal también existen fuerzas provocadas por el movimiento de la correa al cargar el peso del carro del eje vertical. En la Figura 68 se muestra el sistema que soporta la correa transversal en el lado del piñón conducido.



Figura 68. Conjunto de soporte para la correa del eje transversal (Partes no mostradas para mejor visualización).

Fuente: Propia.

Para analizar este conjunto se usa el software CAD/CAE y se analiza mediante el método de elementos finitos usando los resultados de las ecuaciones (111) y (112).

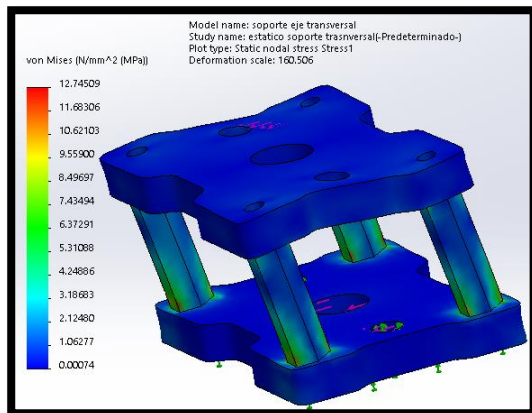


Figura 69. Esfuerzo de Von Mises resultante en la estructura. Deformación gráfica exagerada en 160 a 1.

Fuente: Propia.

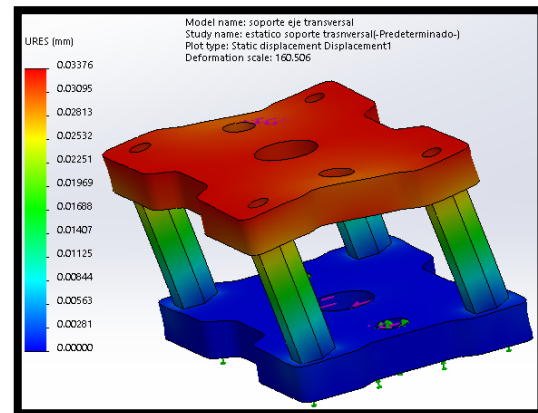


Figura 70. Deflexión resultante en la estructura, Deformación gráfica exagerada en 160 a 1.

Fuente: Propia.

De la Figura 69 y Figura 70 se obtienen el esfuerzo máximo **12.74509 MPa** y la deflexión máxima **0.003376 mm**, respectivamente. De aquí se obtiene el factor de seguridad de la pieza más frágil, que en este caso es el acrílico PMMA, y que a su vez se conoce el esfuerzo de fluencia gracias a las tablas de IdePlas, (2012) valorada en **61 MPa**. Se lo divide para los **12.745 MPa** vistos en el estudio con la ecuación (7).

$$FS = \frac{61}{12.745} = 4.7861$$

Que como se observa, **4.7861** es un factor de seguridad aceptable para el uso como soporte del piñón conducido en el eje transversal.

Análisis en las guías deslizantes de los 3 ejes.

En este análisis se comprende el cálculo y la selección de los cojinetes lineales para determinar su vida de servicio.

Cuando el eje y los elementos rodantes de una guía lineal están constantemente sujetos a esfuerzos repetitivos, el elemento empieza a sufrir fatiga y puede descamarse. La vida de la guía lineal se mide como la distancia total recorrida hasta cuando aparece la fatiga por descamación en el material.

Es necesario estimar la vida nominal, calculando la distancia que el 90% de un grupo de guías lineales, idénticas y sometidas a las mismas condiciones, pueden viajar sin sufrir descamación. Este análisis considera también factores del entorno, propiedades de los materiales y de vibraciones, fuerzas, y cargas dinámicas.

Así, se tiene la ecuación (23) que calcula la vida útil o de servicio de las guías usadas en este proyecto.

$$L = \left(\frac{f_d f_t C}{f_w P_c} \right)^3 \cdot D \quad (23)$$

En donde:

- L : Vida nominal [Km]
- f_d : Factor de dureza
- f_t : Factor de temperatura
- C : Capacidad de carga dinámica básica
- f_w : Factor de carga
- D : Distancia a recorrer [Km] (para este caso se considera 50 Km en los 3 ejes).

Para este caso se tienen los siguientes valores:

Factor de dureza:

De acuerdo a (Mohtar, 2013), el eje guía y el contacto rodante debe tener preferiblemente una dureza de *HRC* 58 – 62 lo que da un factor aproximadamente de 1 como se observa en la Figura 71.

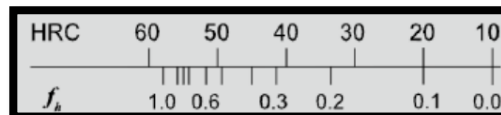


Figura 71. Dureza y su respectivo factor.
Fuente: (Mohtar, 2013).

Factor de temperatura:

La temperatura influye al alcanzar valores mayores a los 100 °C afectando el desempeño útil de la guía deslizante. En este caso, se tiene un factor de 1 (Figura 72) pues el mecanismo no alcanza temperaturas mayores a los 40 °C.

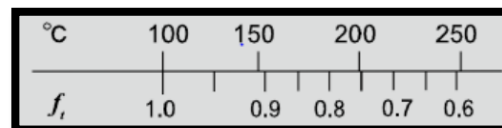


Figura 72. Temperaturas y sus respectivos factores.
Fuente: (Mohtar, 2013).

Factor de carga:

Entre ellos, se comprenden el peso de la estructura, el peso de las guías deslizantes, las vibraciones e impactos, las partes colgantes y componentes en voladizo. Este factor suele ser difícil de estimar por todos los movimientos que producen vibración e impactos. Es por ello que se escoge este valor como empírico de acuerdo a la velocidad de operación. Mohtar, (2013) afirma que para una velocidad de entre $15 \frac{m}{min} < V_e < 60 \frac{m}{min}$ se estime un valor de 1.2 a 1.5.

- **Cálculo de la vida de servicio de las guías deslizantes**

La vida nominal se transforma en vida de servicio (en horas, en la ecuación (24)) al operarlo con la velocidad (el valor de 60 corresponde a los segundos necesarios en un minuto para transformar la unidad de $\frac{m}{min}$ en $\frac{m}{hr}$, y el valor de 10^3 para transformar los Km a m).

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{V_e \times 60} \quad (24)$$

- **Cargas en las guías deslizantes.**

Para aplicar los anteriores criterios de diseño se deben determinar las cargas que afectan el sistema en los apoyos deslizantes.

En esta etapa se consideran 5 aspectos para determinar las fuerzas que intervienen en el sistema y visualizados en la Figura 73.

- Fuerza: Proveniente del peso que viene acompañado de la inercia y de las fuerzas externas aplicadas que no presentan inercia.
- Dirección de la carga: Las direcciones de las cargas divididas en los 3 ejes espaciales definidos por: F_x, F_y, F_z .
- Posición de la carga: La distancia de cada carga aplicada en el centro del sistema denotadas por, P_{fx}, P_{fy}, P_{fz} .
- Distancia entre los dos carros: Que distribuyen el peso entre todos los cojinetes lineales del carro y denotados por: L_0, L_1 .
- Fuerzas en los carros: Las reacciones en cada cojinete lineal resultante. R_1, R_2, R_3, R_4 para las fuerzas verticales, y S_1, S_2, S_3, S_4 para las fuerzas horizontales.

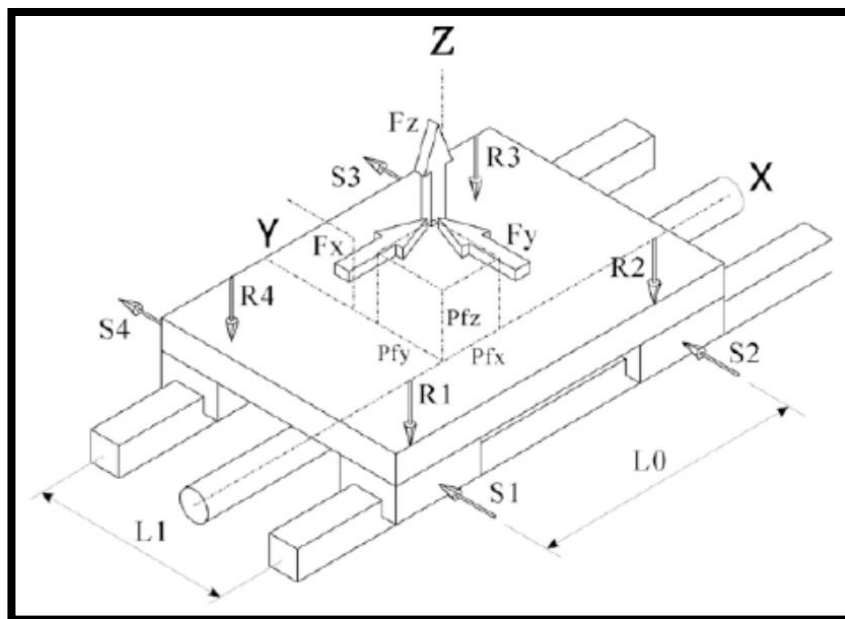


Figura 73. Distribución de fuerzas y reacciones en el carro hecho con guías deslizantes.

Fuente: (Mohtar, 2013).

Realizando la sumatoria de momentos y fuerzas en los 3 ejes, se tiene el siguiente grupo de ecuaciones que servirán para calcular las reacciones verticales (25), (26), (27), (28) y horizontales (29), (30), (31), (32).

Para las reacciones verticales:

$$R_1 = \frac{-F_z}{4} + \frac{F_z \times P_{fy} - F_y \times P_{fz}}{2L_1} - \frac{F_x \times P_{fz} - F_z \times P_{fx}}{2L_0} \quad (25)$$

$$R_2 = \frac{-F_z}{4} + \frac{F_z \times P_{fy} - F_y \times P_{fz}}{2L_1} + \frac{F_x \times P_{fz} - F_z \times P_{fx}}{2L_0} \quad (26)$$

$$R_3 = \frac{-F_z}{4} - \frac{F_z \times P_{fy} - F_y \times P_{fz}}{2L_1} + \frac{F_x \times P_{fz} - F_z \times P_{fx}}{2L_0} \quad (27)$$

$$R_4 = \frac{-F_z}{4} - \frac{F_z \times P_{fy} - F_y \times P_{fz}}{2L_1} - \frac{F_x \times P_{fz} - F_z \times P_{fx}}{2L_0} \quad (28)$$

Para las reacciones horizontales:

$$S_1 = \frac{F_y}{4} + \frac{F_y \times P_{fx} - F_x \times P_{fy}}{2L_0} \quad (29)$$

$$S_2 = \frac{F_y}{4} - \frac{F_y \times P_{fx} - F_x \times P_{fy}}{2L_0} \quad (30)$$

$$S_3 = \frac{F_y}{4} - \frac{F_y \times P_{fx} - F_x \times P_{fy}}{2L_0} \quad (31)$$

$$S_4 = \frac{F_y}{4} + \frac{F_y \times P_{fx} - F_x \times P_{fy}}{2L_0} \quad (32)$$

Para consolidar las fuerzas horizontales y verticales en una sola y poder usarlas en la ecuación de la vida de servicio, es necesario desarrollar una ecuación que relacione las fuerzas verticales y horizontales en una sola fuerza equivalente como se muestra en la ecuación (33).

$$F_{equiv} = R_{max} + S_{max} \quad (33)$$

Ahora, con este modelo, se pueden analizar los 3 sistemas de ejes, basados en las fuerzas que intervienen en el DCL visto en la Figura 73.

- **Guías Deslizantes: Eje Longitudinal.**

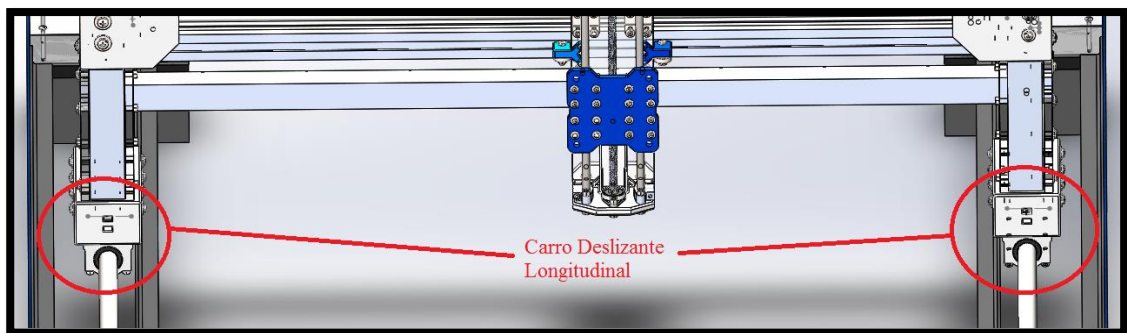


Figura 74. Guías deslizantes en el carro longitudinal.

Fuente: Propia.

En esta subsección se establecen los valores de las fuerzas que interceden en el eje longitudinal (incluyendo el peso de toda la estructura) mostradas en la Figura 74 y expuesto en la ecuación (34).

$$F_Z = (P_{Sist Eje Transversal} + P_{Sist Eje Vertical} + P_{Columnas sin Cojinetes}) \times G \quad (34)$$

$$F_z = (3.903 + 2.674 + 5.536) \times 9.8 = 118.7074 \text{ N}$$

También se considera individualmente la carga del efector final y el peso de la estructura estructura del efector final como se muestra en la ecuación (35).

$$F_{Z \text{ parcial}} = (P_{\text{Efector final y carga}}) \times G \quad (35)$$

Y reemplazando:

$$F_{Z \text{ parcial}} = (0.962) \times 9.8 = 9.4276 \text{ N}$$

Se tiene para las fuerzas verticales:

$$L_0 = 0.00744 \text{ m}; \quad L_1 = 1.012 \text{ m}$$

$$P_{fx} = 0.011 \text{ m}; \quad P_{fy} = 0 \text{ m} \quad P_{fz} = 0.352 \text{ m};$$

$$F_x = 0 \text{ N}; \quad F_y = 0 \text{ N}; \quad F_z = -118.707 \text{ N};$$

Reemplazando en (25), (26), (27), (28):

$$R_1 = \frac{118.707}{4} + \frac{-118.707 \times 0 - 0 \times 0.352}{2 \times 1.012} - \frac{0 \times 0.352 - (-9.427) \times 0.011}{2 \times 0.00744} = 22.7079 \text{ N} \quad (36)$$

$$R_2 = \frac{118.707}{4} + \frac{-118.707 \times 0 - 0 \times 0.352}{2 \times 1.012} + \frac{0 \times 0.352 - (-9.427) \times 0.011}{2 \times 0.00744} = 33.645 \text{ N} \quad (37)$$

$$R_3 = \frac{118.707}{4} - \frac{-118.707 \times 0 - 0 \times 0.352}{2 \times 1.012} + \frac{0 \times 0.352 - (-9.427) \times 0.011}{2 \times 0.00744} = 33.645 \text{ N} \quad (38)$$

$$R_4 = \frac{118.707}{4} - \frac{-118.707 \times 0 - 0 \times 0.352}{2 \times 1.012} - \frac{0 \times 0.352 - (-9.427) \times 0.011}{2 \times 0.00744} = 22.7079 \text{ N} \quad (39)$$

En este caso no se consideran fuerzas horizontales pues no existe ninguna que se oponga al movimiento en los ejes X e Y .

$$F_{equiv} = 39 + 0 = 39 \text{ N}$$

Asumiendo una vida de servicio de 50000 hr y una velocidad máxima de $7 \frac{m}{min}$, se tiene la ecuación (24):

$$50000 = \frac{L \times 10^3}{7 \times 60} \quad (40)$$

$$L = \frac{50000 \times 7 \times 60}{10^3} = 21000 \text{ Km}$$

De acuerdo a (23), y reemplazando el resultado de la ecuación (40), se tiene:

$$L = \left(\frac{f_d f_t C}{f_w P_c} \right)^3 \times D$$

$$f_d = 1; \quad f_t = 1; \quad f_w = 1.2; \quad D = 50 \text{ Km}; \quad P_c = 39 \text{ N}$$

$$C = \left(\frac{f_w P_c}{f_d f_t} \right) \times \sqrt[3]{\frac{L}{D}} \quad (41)$$

$$C = \left(\frac{1.2 \times 39}{1 \times 1} \right) \times \sqrt[3]{\frac{21000}{50}} = 350.5 \text{ N}$$

El valor de C representa la carga dinámica que soporta cada cojinete SC20UU del eje longitudinal. De acuerdo a la tabla técnica de Ningbo Meiyate Precision Transfer Components Co., (2015) la carga dinámica máxima del cojinete es $C_0 = 882 \text{ N}$, con lo cual se tiene el factor de seguridad:

$$FS = \frac{882}{350.2} = 2.518$$

- **Guías Deslizantes: Eje Transversal**

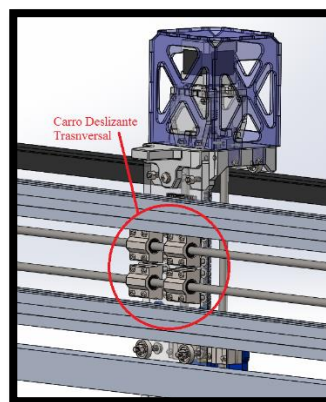


Figura 75. Guías deslizantes en el carro transversal.

Fuente: Propia.

En esta subsección se establecen las reacciones en el carro del eje transversal de la Figura 75. Es posible usar las mismas ecuaciones de las reacciones de la Figura 73. Adicionalmente, es necesario encontrar el peso que soporta la estructura del eje transversal. Nótese la división para 2 la cual indica la distribución de peso entre los 4 cojinetes lineales SC8UU (de dos en dos), y los rodamientos de bolas 635ZZ de 25 x 10 mm en el perfil de hierro mostrado en la ecuación (42).

$$W_T = \frac{(P_{Sist Eje Vertical} + P_{Efecto\ final\ y\ carga})}{2} \times G \quad (42)$$

$$W_T = \frac{(2.674 + 0.962)}{2} \times 9.8 = 17.8164 \text{ N}$$

Para las fuerzas verticales:

$$L_0 = 0.058 \text{ m}; \quad L_1 = 0.036 \text{ m}$$

$$P_{fx} = 0 \text{ m}; \quad P_{fy} = 0.042 \text{ m} \quad P_{fz} = 0.06547 \text{ m};$$

$$F_x = 0 \text{ N}; \quad F_y = -17.8164 \text{ N}; \quad F_z = 0 \text{ N};$$

Reemplazando en (25), (26), (27), (28):

$$R_1 = \frac{0}{4} + \frac{0 \times 0.03042 - (-17.8164) \times 0.06547}{2 \times 0.036} - \frac{0 \times 0.06037 - 0 \times 0}{2 \times 0.0744} = 16.2 \text{ N} \quad (43)$$

$$R_2 = \frac{0}{4} + \frac{0 \times 0.03042 - (-17.8164) \times 0.06547}{2 \times 0.036} + \frac{0 \times 0.06037 - 0 \times 0}{2 \times 0.0744} = 16.2 \text{ N} \quad (44)$$

$$R_3 = \frac{0}{4} - \frac{0 \times 0.03042 - (-17.8164) \times 0.06547}{2 \times 0.036} + \frac{0 \times 0.06037 - 0 \times 0}{2 \times 0.0744} = -16.2 \text{ N} \quad (45)$$

$$R_4 = \frac{0}{4} - \frac{0 \times 0.03042 - (-17.8164) \times 0.06547}{2 \times 0.036} - \frac{0 \times 0.06037 - 0 \times 0}{2 \times 0.0744} = -16.2 \text{ N} \quad (46)$$

Reemplazando en (29), (30), (31), (32):

$$S_1 = \frac{-17.8164}{4} + \frac{-17.8164 \times 0 - 0 \times 0.042}{2 \times 0.036} = -4.4541 \text{ N} \quad (47)$$

$$S_2 = \frac{-17.8164}{4} - \frac{-17.8164 \times 0 - 0 \times 0.042}{2 \times 0.036} = -4.4541 \text{ N} \quad (48)$$

$$S_3 = \frac{-17.8164}{4} - \frac{-17.8164 \times 0 - 0 \times 0.042}{2 \times 0.036} = -4.4541 \text{ N} \quad (49)$$

$$S_4 = \frac{-17.8164}{4} + \frac{-17.8164 \times 0 - 0 \times 0.042}{2 \times 0.036} = -4.4541 \text{ N} \quad (50)$$

Se tiene la fuerza equivalente:

$$F_{equiv} = 16.2 + 4.4541 = 20.6541 \text{ N}$$

Asumiendo una vida de servicio de 50000 *hr* y una velocidad máxima de $7 \frac{m}{min}$ se tiene para la ecuación (24):

$$50000 = \frac{L \times 10^3}{7 \times 60}$$

$$L = \frac{50000 \times 7 \times 60}{10^3} = 21000 \text{ Km} \quad (51)$$

De acuerdo a (23), se tiene entonces:

$$L = \left(\frac{f_d f_t C}{f_w P_c} \right)^3 \cdot D$$

$$f_d = 1; \quad f_t = 1; \quad f_w = 1.2; \quad D = 50 \text{ Km}; \quad P_c = 20.6241 \text{ N}$$

$$C = \left(\frac{f_w P_c}{f_d f_t} \right)^3 \sqrt[3]{\frac{L}{D}}$$

$$C = \left(\frac{1.2 \times 20.6241}{1 \times 1} \right)^3 \sqrt[3]{\frac{21000}{50}} = 185.341 \text{ N} \quad (52)$$

El valor de *C* representa la carga dinámica que soportará cada cojinete SC8UU del eje transversal. De acuerdo a la tabla técnica de Ningbo Meiyate Precision Transfers

Component Co., (2015) la carga dinámica que el cojinete puede soportar es $C_0 = 274 \text{ N}$, con lo cual se tiene el factor de seguridad:

$$FS = \frac{274}{185.341} = 1.5$$

Entonces, se demuestra la factibilidad para utilizar los cojinetes lineales SC8UU. Cabe destacar que, para mayor seguridad, se utilizan rodamientos en el tubo cuadrado de aluminio y rodamientos en los perfiles en X que ayudan a aumentar el factor de seguridad y previenen la vibración excesiva.

- **Guías Deslizantes: Eje Vertical**

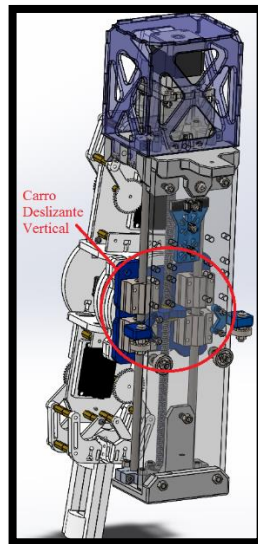


Figura 76. Guías deslizantes en el carro vertical.

Fuente: Propia.

Para esta subsección se establecen los pesos y reacciones que intervienen en el carro vertical. En la Figura 76 se observa que las guías deslizantes no contribuyen con soporte vertical al peso de la estructura. Los cojinetes deslizantes previenen el movimiento relativo producido por la rotación del tornillo sin fin, y generan un soporte para el momento relativo generado por el peso del efector final.

$$W_T = P_{\text{Efector final y carga}} \times G \quad (53)$$

$$W_T = 0.962 \times 9.8 = 9.42 \text{ N}$$

Para las fuerzas verticales:

$$L_0 = 0.038 \text{ m}; \quad L_1 = 0.06 \text{ m}$$

$$P_{fx} = 0 \text{ m}; \quad P_{fy} = 0 \text{ m} \quad P_{fz} = 0.07 \text{ m};$$

$$F_x = 9.42 \text{ N}; \quad F_y = 0 \text{ N}; \quad F_z = 0 \text{ N};$$

Reemplazando en (25), (26), (27), (28):

$$R_1 = \frac{0}{4} + \frac{0 \times 0 - 0 \times 0.07}{2 \times 0.06} - \frac{9.42 \times 0.07 - 0 \times 0}{2 \times 0.038} = -8.676 \text{ N} \quad (54)$$

$$R_2 = \frac{0}{4} + \frac{0 \times 0 - 0 \times 0.07}{2 \times 0.06} + \frac{9.42 \times 0.07 - 0 \times 0}{2 \times 0.038} = 8.676 \text{ N} \quad (55)$$

$$R_3 = \frac{0}{4} - \frac{0 \times 0 - 0 \times 0.07}{2 \times 0.06} + \frac{9.42 \times 0.07 - 0 \times 0}{2 \times 0.038} = 8.676 \text{ N} \quad (56)$$

$$R_4 = \frac{0}{4} - \frac{0 \times 0 - 0 \times 0.07}{2 \times 0.06} - \frac{9.42 \times 0.07 - 0 \times 0}{2 \times 0.038} = -8.676 \text{ N} \quad (57)$$

Se tiene la fuerza equivalente:

$$F_{equiv} = 8.676 + 0 = 8.676 \text{ N}$$

Asumiendo una vida de servicio de 50000 *hr* y una velocidad máxima de $7 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ se tiene para la ecuación (24):

$$50000 = \frac{L \times 10^3}{7 \times 60}$$

$$L = \frac{50000 \times 7 \times 60}{10^3} = 21000 \text{ Km} \quad (58)$$

De acuerdo a (23), se tiene entonces:

$$L = \left(\frac{f_a f_t C}{f_w P_c} \right)^3 \cdot D$$

$$f_d = 1; \quad f_t = 1; \quad f_w = 1.2; \quad D = 50 \text{ Km}; \quad P_c = 8.676 \text{ N}$$

$$C = \left(\frac{f_w P_c}{f_d f_t} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{L}{D}} \quad (59)$$

$$C = \left(\frac{1.2 \times 8.676}{1 \times 1} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{21000}{50}} = 77.968 \text{ N}$$

El valor de C representa la carga dinámica que soportará cada cojinete SC8UU del eje vertical. De acuerdo a la tabla técnica de Ningbo Meiyate Precision Transfers Component Co, (2015) la carga dinámica que el cojinete puede soportar es $C_0 = 274 \text{ N}$, con lo cual se tiene el factor de seguridad:

$$FS = \frac{274}{77.968} = 3.514$$

Por ende, es factible usar los cojinetes lineales SC8UU en el carro deslizante vertical.

Análisis estático de la placa del eje vertical

En esta subsección se utiliza el método de elementos finitos para analizar la resistencia mecánica en la placa mostrada en la Figura 77, la cual sostiene gran parte del sistema del eje vertical. Sea usa el método de elementos finitos debido a la complejidad con el que las fuerzas se encuentran distribuidas en todo el ensamble.



Figura 77. Placa base del sistema de movimiento en el eje vertical.

Fuente: Propia.

Para el siguiente análisis se consideraron los componentes de sujeción superior e inferior pues provocan momentos en la placa base. También se consideraron los pesos del actuador, del carro deslizante, cojinetes, efector final, tornillo sin fin con tuerca, chumaceras, acople flexible para el motor, guías de acero inoxidable y soportes SHF8.

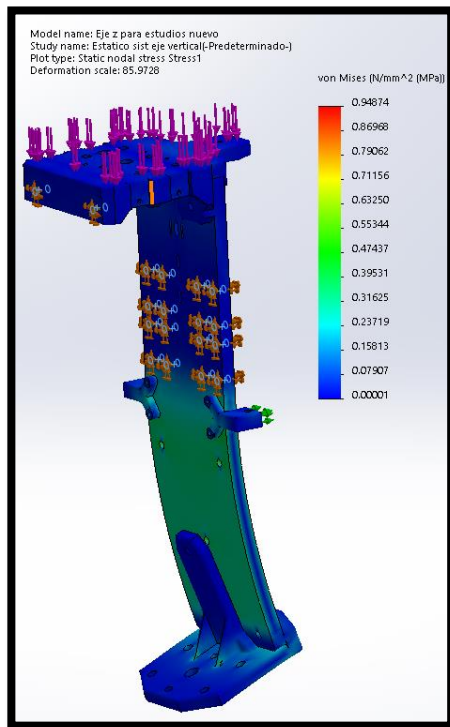


Figura 78. Esfuerzos provocados en el sistema de eje vertical. Imagen deformada en escala de 85 a 1.

Fuente: Propia.

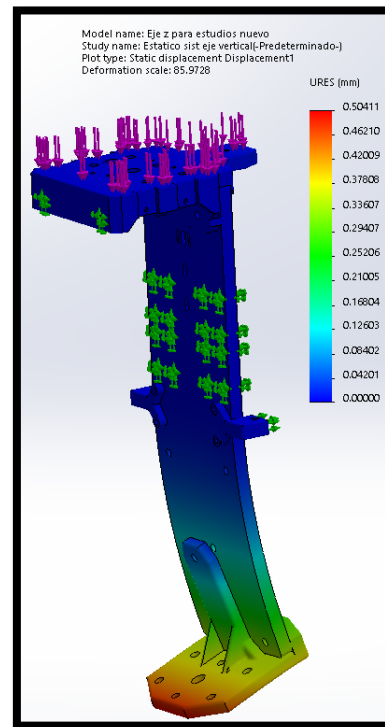


Figura 79. Deflexión en el sistema de eje vertical. Imagen deformada en escala de 85 a 1.

Fuente: Propia.

Como se observa en la Figura 78, el área verde en el análisis de esfuerzos demuestra que el acrílico PMMA de la base soporta un esfuerzo de **0.5534 MPa**, es decir, que no compromete al acrílico cuyo esfuerzo de fluencia es **61 MPa** para esfuerzos a tensión (tomado de IdePlas, (2012)). Su deflexión tampoco se acerca a un valor crítico si se observa la Figura 79 en el que la deflexión es igual a **0.33 mm**. Para conocer el factor de seguridad se realiza el análisis con la ecuación (7).

$$FS = \frac{61}{0.5534} = 110.227$$

Análisis estático de los ejes verticales

Las reacciones que se producen en los ejes donde corren los cojinetes lineales SC8UU deben ser analizados para conocer la deflexión que resulta del peso del efector final y la carga en sus pinzas (Figura 80).

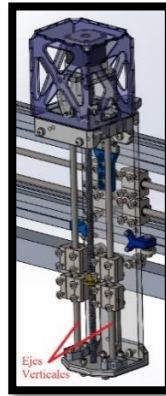


Figura 80. Ejes verticales de acero inoxidable 304 en el sistema.
Fuente: Propia.

Para el presente caso, es necesario tomar el resultado de las ecuaciones (54), (55), (56) y (57), que proporcionan las fuerzas en a los ejes. Se toman a las vigas como empotradas e indeterminadas, con fuerzas en 2 puntos (Figura 81), y se los analiza con el método de elementos finitos.

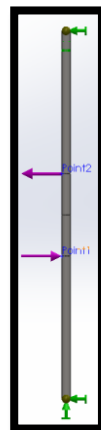


Figura 81. Fuerzas aplicadas al eje del sistema de ejes vertical.
Fuente: Propia.

En tal virtud se tiene, la Figura 82 y Figura 83 que muestran el diagrama de cortantes y momentos flectores de las vigas, además muestran los valores del cortante positivo máximo, cortante negativo máximo, y el momento flector máximo.

$$F_+ = 2.8578 \text{ N}$$

$$F_- = -5.818 \text{ N}$$

$$M = 0.2210 \text{ N.m}$$

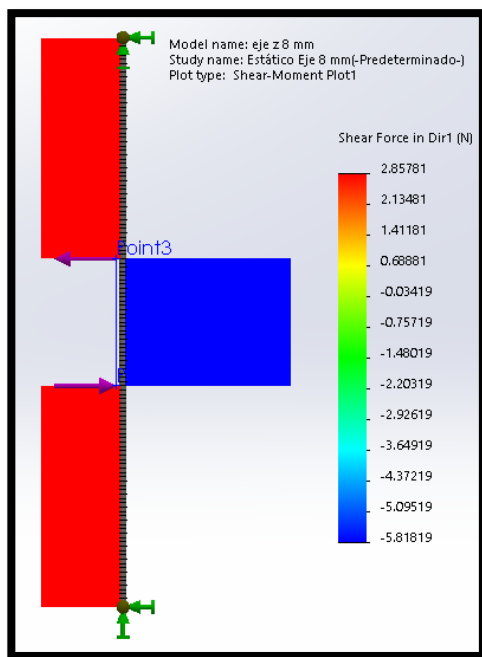


Figura 82. Diagrama del cortante en la viga de 8 mm del eje vertical.
Fuente: Propia.

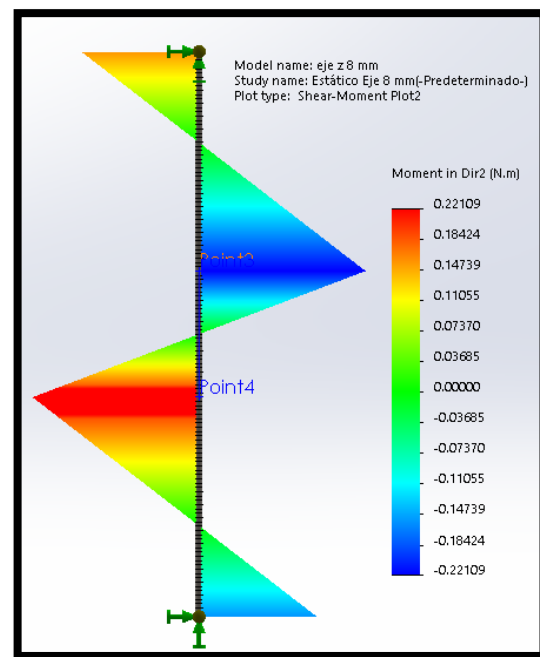


Figura 83. Diagrama de momentos flectores en el eje de 8 mm del eje vertical.
Fuente: Propia.

Se verifican también los valores del esfuerzo y la deflexión obtenidos de la Figura 84 y de la Figura 85 respectivamente.

$$\sigma = 4.398 \text{ MPa}$$

$$\delta = 0.00827 \text{ mm}$$

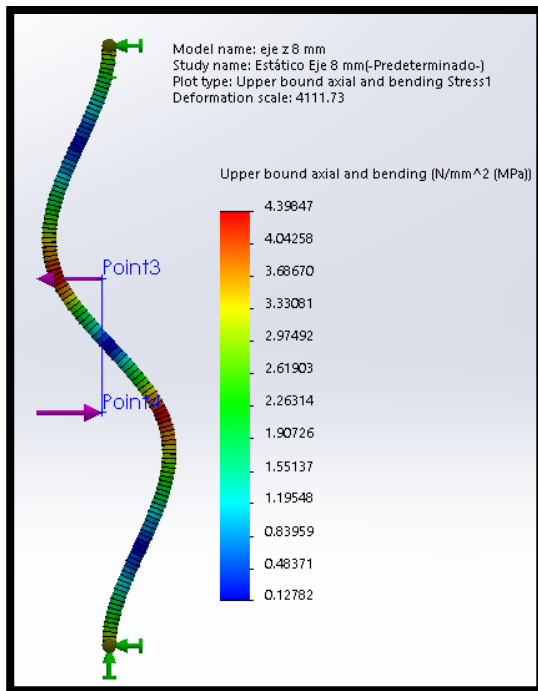


Figura 84. Esfuerzos en la viga de 8 mm del eje vertical.
Fuente: Propia.

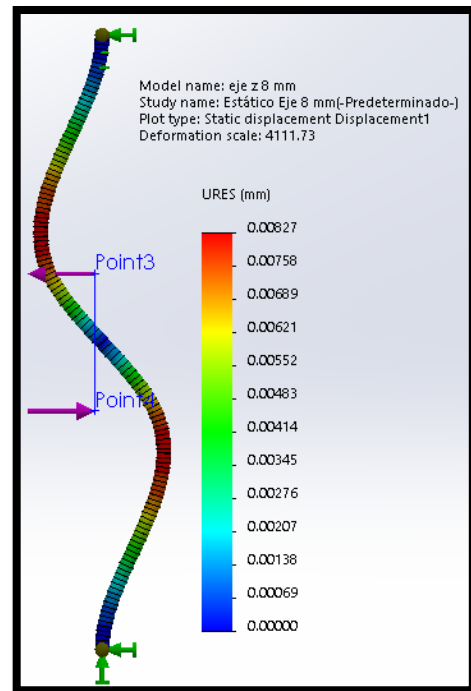


Figura 85. Deflexión en la viga de 8 mm del eje vertical.
Fuente: Propia.

Ahora con estos datos, es necesario encontrar el factor de seguridad obtenido al usar la ecuación (7). Para ello se usará, de la tabla de aceros inoxidables de SUMITEC (2010), el esfuerzo último aproximado de **620 MPa**.

$$FS = \frac{620}{4.3984} = 140.9603$$

Con lo que se comprueba la factibilidad de usar estos ejes como soportes del carro deslizante (efector final y carga).

Análisis de los empotramientos SHF8

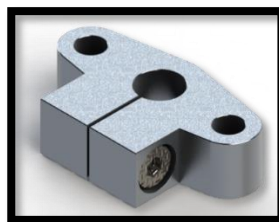


Figura 86. Empotramiento SHF8 para ejes de 8 mm.
Fuente: Propia.

Luego de haber analizado la factibilidad mecánica de las guías de acero inoxidable de 8 mm para el eje transversal y el eje vertical, es necesario conocer la factibilidad estructural de los empotramientos (Figura 86) que sostienen estos ejes.

- **SHF8 en el eje transversal**

Del análisis de los ejes de 8 mm transversales, se tiene un esfuerzo máximo en el SHF8 valorado en **22.1649 MPa**. De acuerdo a la tabla técnica de EKT, (2015) se conoce que el material del empotramiento es de aleación de aluminio 7075. Así, el esfuerzo último del aluminio 7075 es **480 MPa** de acuerdo al manual de VALENCIANA DE ALUMINIOS, (n.d.). Se puede encontrar entonces el factor de seguridad mediante la ecuación (7).

$$FS = \frac{480}{22.1649} = 21.655$$

Como se observa el factor de seguridad para el empotramiento es alto, lo que garantiza un buen soporte sin fallas estructurales.

- **SHF8 en el eje vertical**

Se tiene el esfuerzo máximo del SHF8 del análisis de los ejes de soporte verticales, valorado en **1.6118 MPa**. Se sabe que el SHF8 es de aleación de aluminio 7075. El esfuerzo último del aluminio 7075 es **480 MPa** del manual de VALENCIANA DE ALUMINIOS, (n.d.). Se puede encontrar entonces el factor de seguridad mediante la ecuación (7).

$$FS = \frac{480}{1.6118} = 297.803$$

EL factor de seguridad de 297.803 demuestra la factibilidad de usar los soportes de los ejes SHF8 para los ejes verticales.

3.3.1.2.1. Análisis Dinámico del Manipulador Cartesiano

Esta etapa comprende el análisis dinámico del manipulador. Es importante realizar este estudio, porque permitirá dimensionar los actuadores y transmisiones de movimiento con el mejor rendimiento evitando fallas.

Se especifica en la Figura 87 el diagrama con las variables y parámetros a considerar en el estudio. De aquí, se asume que las masas de los eslabones se encuentran concentradas al final de cada eslabón respectivamente.

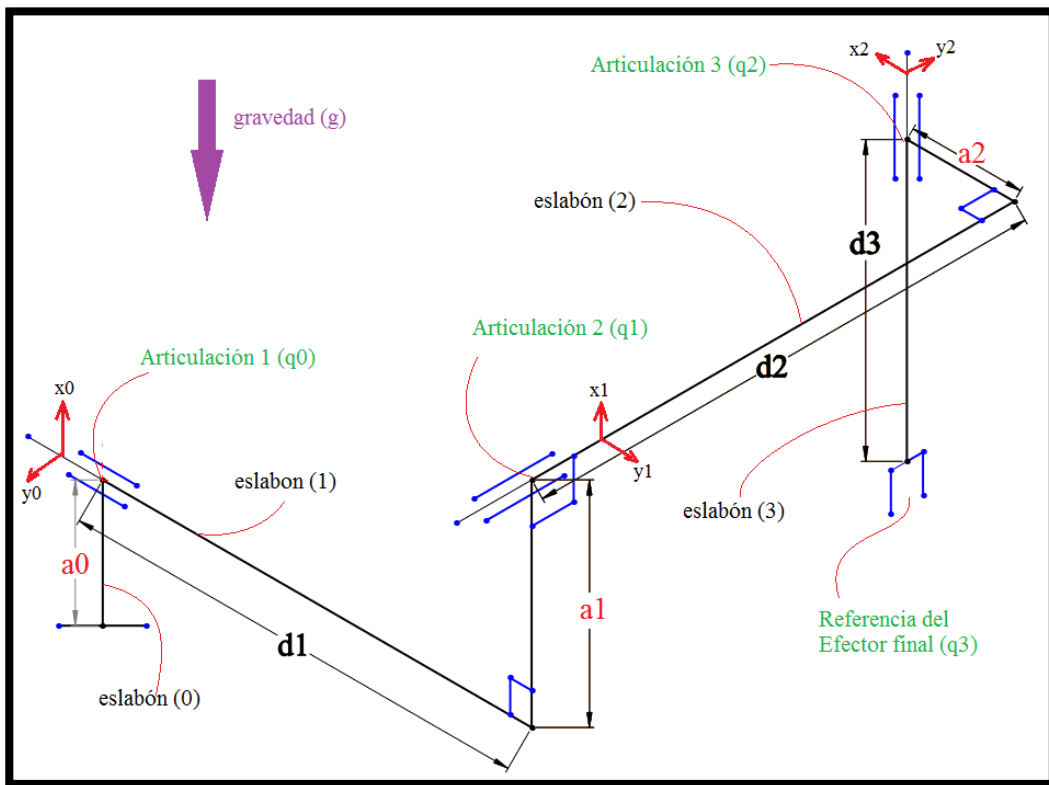


Figura 87. Representación de los elementos del robot Gantry.

Fuente: Propia.

De la Figura 87 se tiene la ecuación de las articulaciones general dependiente de la posición de cada eslabón (nótese que en este manipulador no existen articulaciones rotativas θ_i , y solo existen articulaciones prismáticas d_i):

$$q = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (60)$$

Y la ecuación generalizada del vector torque:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (61)$$

En (61), τ_1 , τ_2 y τ_3 son las fuerzas provistas por los actuadores para lograr el movimiento de la articulación a la posición indicada dentro de su volumen de trabajo.

Se desarrollan las ecuaciones que relacionen las fuerzas de los actuadores (ecuación con el movimiento del sistema (ecuación (60))). Para ello, se usa la ecuación de Lagrange-Euler del movimiento para un sistema conservativo, como se muestra en (62).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (62)$$

Donde:

- q es el n-vector de cada coordenada q_i
- τ es el n-vector de cada fuerza τ_i
- L es el langragiano descrito en la ecuación (63), resultado de la diferencia entre las energías cinética y potencial del sistema.

$$L = K - U \quad (63)$$

Ahora como la ecuación del movimiento comprende todas las energías del sistema, es necesario encontrar las ecuaciones cinéticas y potenciales para el actuador de cada eslabón del manipulador cartesiano (el eslabón (0) no se toma en cuenta por ser la separación con la primera articulación). En tal virtud:

Eslabón (1):

$$k_1 = \frac{1}{2} m_1 \dot{d}_1^2 \quad (64)$$

Eslabón (2):

$$k_2 = \frac{1}{2} m_2 \dot{d}_2^2 \quad (65)$$

Eslabón (3):

$$k_3 = \frac{1}{2} m_3 \dot{d}_3^2 \quad (66)$$

$$u_3 = m_3 \cdot g \cdot d_3 \quad (67)$$

Como se aprecia en la ecuación (67), solo el eslabón 3 tiene energía potencial. Esto se debe a que los eslabones anteriores no se mueven en dirección a la gravedad ni en contra de ella. Por tanto son u_1 y u_2 son cero.

Las ecuaciones (64), (65), (66) y (67) se reemplazan en la ecuación (63) y se obtiene la ecuación (68).

$$L = \left(\frac{1}{2} m_1 \dot{d}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{d}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{d}_3^2 \right) - (m_3 g d_3) \quad (68)$$

Con la ecuación del langragiano, es posible encontrar las ecuaciones diferenciales parciales para cada vector del torque τ dependiente de cada articulación q .

Tabla 27.

Ecuaciones diferenciales para el langragiano.

Ecuaciones diferenciales parciales de la energía cinética.		Ecuaciones dif. parciales de la energía potencial.
Primer Orden	Segundo Orden	
$\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} = m_1 \dot{d}_1 \quad (69)$	$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} \right) = m_1 \ddot{d}_1 \quad (70)$	$\frac{\partial L}{\partial d_1} = 0 \quad (71)$
$\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} = m_2 \dot{d}_2 \quad (72)$	$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} \right) = m_2 \ddot{d}_2 \quad (73)$	$\frac{\partial L}{\partial d_2} = 0 \quad (74)$
$\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_3} = m_3 \dot{d}_3 \quad (75)$	$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_3} \right) = m_3 \ddot{d}_3 \quad (76)$	$\frac{\partial L}{\partial d_3} = m_3 g \quad (77)$

Ahora se agrupan los términos de q en matrices jacobianas dependiendo de cada eslabón coincidente con cada eje coordenado del espacio, para satisfacer la ecuación (62).

$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{d}_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \dot{d}_1 \\ m_2 \dot{d}_2 \\ m_3 \dot{d}_3 \end{bmatrix} \quad (78)$	$\frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_1} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_2} \right) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{d}_3} \right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \ddot{d}_1 \\ m_2 \ddot{d}_2 \\ m_3 \ddot{d}_3 \end{bmatrix} \quad (79)$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$$\frac{\partial L}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial d_1} \\ \frac{\partial L}{\partial d_2} \\ \frac{\partial L}{\partial d_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 g \end{bmatrix} \quad (80)$$

Reemplazando (61), (79) y (80) en (62):

$$\begin{bmatrix} m_1 \ddot{d}_1 \\ m_2 \ddot{d}_2 \\ m_3 \ddot{d}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

Las aceleraciones centrípetas son igual a cero, y el vector gravedad es un escalar siempre hacia abajo y constante, entonces se puede encontrar las ecuaciones del torque para cada uno de los eslabones.

Se conoce que la aceleración de los ejes: longitudinal y transversal, es igual a la aceleración contraria que se produce por efecto de la fricción en los cojinetes lineales. Para ello, se usa el coeficiente de rozamiento de los cojinetes lineales SC20UU y SC8UU ($\mu = 0.006 \times 4 = 0.024$ para el eje longitudinal, y $\mu = 0.006 \times 8 = 0.048$ para el transversal de acuerdo a las tablas de Ningbo Meiyate Precision Transfers Component Co., (2015)).

$$a = \mu \times g = 0.024 \times 9.8 = 0.2352 \frac{m}{s^2} \quad (81)$$

$$a = \mu \times g = 0.048 \times 9.8 = 0.4704 \frac{m}{s^2} \quad (82)$$

La ecuación (81) y (82) resulta de igualar la fuerza normal $N = m \times a$ y la fuerza de fricción $F_R = \mu \times N$.

Con estos cálculos, ahora es posible reemplazar los valores para encontrar los resultados de las ecuaciones dinámicas.

Tabla 28.
Parámetros para el cálculo dinámico.

Parámetro	Valor
m_1	8.051 Kg
m_2	3.636 Kg
m_3	0.962 Kg
\ddot{d}_1	$0.2352 \frac{m}{s^2}$
\ddot{d}_2	$0.4704 \frac{m}{s^2}$
\ddot{d}_3	$0 \frac{m}{s^2}$
g	$9.8 \frac{m}{s^2}$

- Eje Longitudinal:

$$F_1 = m_1 \ddot{d}_1 = 8.051 \times 0.2352 = 1.8935 \text{ N} \quad (83)$$

- Eje Transversal:

$$F_2 = m_2 \ddot{d}_2 = 3.636 \times 0.4704 = 1.7103 \text{ N} \quad (84)$$

- Eje Vertical:

$$F_3 = m_3 g = 0.962 \times 9.8 = 9.42 \text{ N} \quad (85)$$

Con estos datos ya es posible dimensionar de manera general los actuadores, pero como se verá en la siguiente subsección, habrá que tomar otros factores de diseño dependiendo del método de transmisión.

3.3.1.2.2. Dimensionamiento de los sistemas de transmisión

Esta etapa comprende el dimensionamiento de los actuadores y los sistemas de transmisión. Para ello se hace referencia a la Figura 88, que indica el movimiento en el sentido positivo de cada eje, visibles en la Tabla 29.

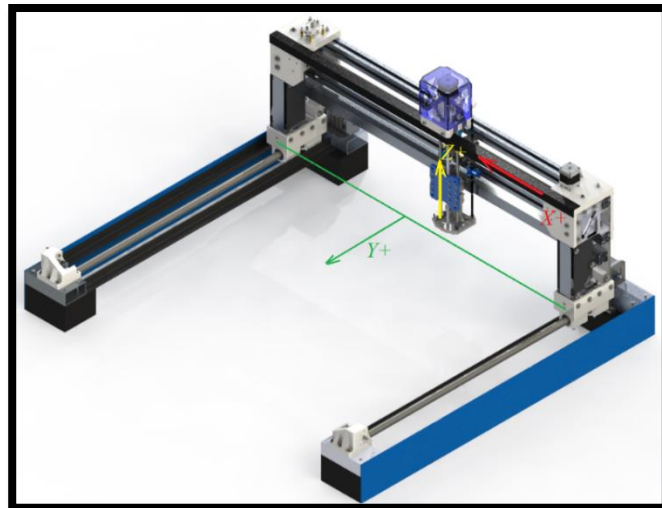


Figura 88. Movimientos positivos de los ejes.

Fuente: Propia.

Tabla 29.

Ejes del manipulador con respecto a sus ejes cartesianos.

Ejes del manipulador	Eje cartesiano*
Eje Longitudinal	Y
Eje Transversal	X
Eje Vertical	Z

* Los ejes cartesianos aquí comprendidos son diferentes a los del diseño cinemático ya que este solo sirve para denotar el sentido positivo visto en la Figura 88.

Dimensionamiento de los actuadores

- Torque en motor del eje longitudinal (Y)

Este primer caso se refiere al dimensionamiento del torque transmitido a lo largo de la correa dentada de neopreno y los piñones GT2 de aluminio con su respectivo eje desde el motor (Figura 89).

Para este caso se toma el motor NEMA 23 de acuerdo al análisis de factibilidad realizado en el diseño eléctrico y electrónico visto en posteriores etapas.

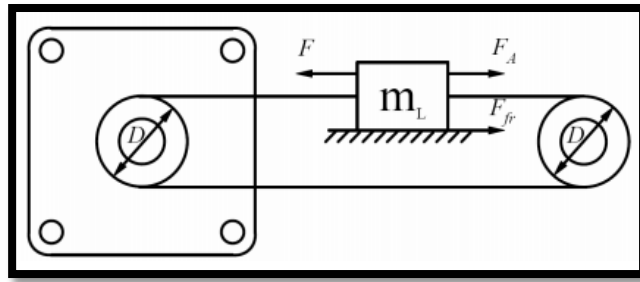


Figura 89. Esquema de las correas y piñones acoplados al motor con sus respectivas variables.

Fuente: (LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., 2014).

De acuerdo al manual para correas de LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., (2014), el torque total del eje longitudinal T_L , es la suma del torque de la carga T_C más el torque de la aceleración T_a (ecuación (86)).

$$T_L = T_C + T_a \quad (86)$$

A su vez, T_C se encuentra mediante la ecuación (87).

$$T_C = \frac{(m_{carga\ tot\ long}) \times g \times D(\text{sen}(\alpha) + \mu \times \text{cos}(\alpha))}{2 \times \eta} \quad (87)$$

Donde:

- $m_{carga\ tot\ long} = m_{carga} + m_{perfil\ gantry} = 2 + 8.051 = 10.051\ Kg$;
- $\alpha = 0^\circ$, es el ángulo de inclinación de la carga total junto con la correa.
- $D = 0.005\ m$, que es el diámetro efectivo del piñón.
- $\mu = 6 \times 0.03 = 0.18$, es el coeficiente de rozamiento de los cojinetes lineales SC20UU tomado de Ningbo Meiyate Precision Transfers Component Co., (2015) y de las chumaceras KFL08 tomados de NATIONAL PRECISION BEARINGS, (2009). La multiplicación por 6 se debe a las 4 chumaceras y los 2 cojinetes lineales.
- $\eta = 0.9$, es la eficiencia mecánica recomendada del mecanismo tomado de LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., (2014).
- $g = 9.8 \frac{m}{s^2}$, la gravedad.

Estos valores se reemplazan en (87) y se tiene la ecuación (88):

$$T_c = \frac{(10.051) \times 9.8 \times 0.005(\text{sen}(0^\circ) + 0.18 \times \text{cos}(0^\circ))}{2 \times 0.9} = \boxed{0.04924 \text{ N.m}} \quad (88)$$

Ahora T_a se encuentra con la ecuación (89).

$$T_a = J_T \times a \quad (89)$$

De donde:

- J_T , es el momento de inercia de todo el sistema a considerar.
- a , es la aceleración que provee el actuador.

J_T , es a su vez la suma de varios momentos de inercia; a saber en las ecuaciones: (90), (91), (92) y $J_{NEMA\ 23}$.

$$J_{carga} = \frac{1}{4} m_{carga} \times D^2 = \frac{1}{4} (2) \times 0.005^2 = 1.25 \times 10^{-5} \text{ Kg.m}^2 \quad (90)$$

$$J_{piñón} = \frac{1}{8} m_{piñón} \times D^2 = \frac{2}{8} \times (5.68 \times 10^{-3}) \times 0.005^2 = 3.55 \times 10^{-8} \text{ Kg.m}^2 \quad (91)$$

$$J_{correa} = \frac{1}{8} m_{correa} \times D^2 = \frac{1}{4} \times (0.019) \times 0.005^2 = 1.1875 \times 10^{-7} \text{ Kg.m}^2 \quad (92)$$

$$J_{NEMA\ 23} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Kg.m}^2$$

La aceleración a , debe ser angular: $a = \ddot{\theta}$. En este caso, se conoce directamente la aceleración angular mostrada en la ecuación (93).

$$\ddot{\theta} = 10 \frac{rpm}{s^2} = \frac{\pi}{3} \frac{rad}{s^2} \quad ; D = 10 \text{ mm (para RPM a } \frac{rad}{s}) \quad (93)$$

Los datos de (90), (91), (92) y $J_{NEMA\ 23}$ de los momentos de inercia y de la aceleración en (93), se reemplazan en (89) y se obtiene (94).

$$T_a = (1.25 \times 10^{-5} + 3.55 \times 10^{-8} + 1.1875 \times 10^{-7} + 1.8 \times 10^{-5}) \times \frac{\pi}{3} \quad (94)$$

$$= \boxed{3.2101 \times 10^{-5} \text{ N.m}}$$

Por último se reemplaza (88) y (94) en (86):

$$T_L = 0.04924 + 3.2101 \times 10^{-5} = 0.04927 \text{ N.m} = \boxed{49.2721 \text{ mN.m}} \quad (95)$$

Al resultado de (95) se recomienda multiplicarle por un factor de seguridad de entre 1.5 y 2 de acuerdo a LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., (2014). En este caso se tomará un factor de 2, mostrado en la ecuación (96).

$$T_{TL} = FS \times T_L = 2 \times 49.2721 = \boxed{98.5442 \text{ mN.m}} \quad (96)$$

Ahora de acuerdo a la gráfica de torques, del manual del motor NEMA 23 de Schneider Electric (2013), al estar girando a 600 RPM se tiene un torque de 350 $mN.m$, con lo que se comprueba que la correa y piñón GT2 al ser acoplados con un motor NEMA 23, se cumplirá el objetivo sin fallas.

- Torque en motor del eje transversal (X)

Para el eje transversal se ha ocupado un motor NEMA 17 del cual se estudia su factibilidad en la subsección de diseño electrónico.

Para ello se usará la ecuación (86), y por ende las ecuaciones (87) y (89) por tratarse del mismo mecanismo de correa dentada y piñón. Con esto, se pueden definir los parámetros de la ecuación (87).

- $m_{carga\ tot\ long} = m_{gripper} + m_{carga} + m_{sist\ eje\ vertical} = 0.962 + 2 + 2.674 = 5.636 \text{ Kg.}$
- $\alpha = 0^\circ$, es el ángulo de inclinación de la carga total junto con la correa.

- $D = 0.01 \text{ m}$, es el diámetro efectivo del piñón.
- $\mu = 10 \times 0.01 = 0.1$, es el coeficiente de rozamiento de los 4 cojinetes lineales SC8UU tomado de la tabla de cojinetes de Ningbo Meiyate Precision Transfers Component Co., (2015). También intervienen los 4 rodamientos 635ZZ y los 2 rodamientos KFL08. Por ello y para mayor seguridad se toma el multiplicador de 10 por el mayor coeficiente de rozamiento.
- $\eta = 0.9$, es la eficiencia mecánica del mecanismo. Este valor es tomado de LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., (2014) como recomendación.
- $g = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, la gravedad.

Estos valores se reemplazan en (87):

$$T_C = \frac{(5.636) \times 9.8 \times 0.005(\text{sen}(0^\circ) + 0.1 \times \cos(0^\circ))}{2 \times 0.9} = \boxed{0.01534 \text{ N.m}} \quad (97)$$

Se toma el momento de inercia del motor de la tabla PBC Linear Co., (2013) y el resto de valores anteriores se reemplazan de nuevo en la ecuación (94).

$$J_{NEMA\ 23} = 8.2 \times 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$$

$$T_a = (1.25 \times 10^{-5} + 3.55 \times 10^{-8} + 1.1875 \times 10^{-7} + 8.2 \times 10^{-6}) \times \frac{\pi}{3} \quad (98)$$

$$= \boxed{2.1838 \times 10^{-5} \text{ N.m}}$$

Ahora se reemplaza (98) y (97) de nuevo en (86) y se obtiene T_T .

$$T_T = 0.01534 + 2.1838 \times 10^{-5} = 0.01536 \text{ N.m} = 15.3642 \text{ mN.m}$$

Es necesario multiplicar este torque inicial por el factor de seguridad valorado en 2 de acuerdo al manual de LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., (2014).

$$T_{TT} = 2 \times 15.3642 = \boxed{30.7285 \text{ mN.m}}$$

Con la tabla de torque versus velocidad de PBC Linear Co., (2013) para el motor NEMA 17 se tiene que a 600 RPM existe un torque de 135 mN.m , el cual da un margen

de uso bastante amplio para su uso. Se podría considerar velocidades más altas siempre y cuando exista un margen apropiado de torque.

- Torque en motor del eje vertical (Z)

Por último se tiene el dimensionamiento del torque para el actuador NEMA 17 en el sistema de eje vertical. Se dimensiona el mecanismo de acuerdo a parámetros para tornillos sin fin de acero con tuerca de bronce. En la Figura 90 se muestra la configuración del mecanismo tornillo sin fin/tuerca.

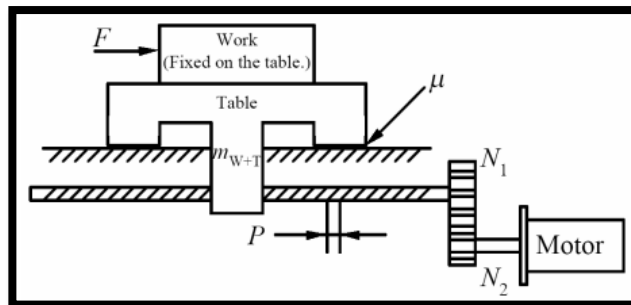


Figura 90. Mecanismo de tornillo sin fin y tuerca con sus parámetros de cálculo.

Fuente: (LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., 2014).

Se encuentran los datos para calcular los torques que intervendrán en el sistema de ejes vertical.

- $m_{carga\ tot\ vert} = m_{gripper} + m_{carga} + m_{carro} = 0.760 + 2 + 0.3 = 3.06\ Kg.$
- $\alpha = 0^\circ$, es el ángulo de inclinación de la carga total junto con la correa.
- $P = 5\ mm$, es el diámetro efectivo del piñón.
- $\mu = 4 \times 0.01 = 0.04$, es el coeficiente de rozamiento de los 4 cojinetes lineales SC8UU tomados de Ningbo Meiyate Precision Transfers Component Co., (2015).
- $\eta = 0.9$, es la eficiencia mecánica del mecanismo. Este valor es tomado de LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD., (2014) como recomendación.
- $g = 9.8\ \frac{m}{s^2}$, la gravedad.

Ahora se debe encontrar la fuerza cuando esta es vertical y posee una aceleración positiva. Esto se expresa en (99).

$$F_Z = m_{carga\ tot\ vert} \times g + m_{carga\ tot\ vert} \times a_z \quad (99)$$

$$F_Z = 3.06 \times 9.8 + 3.06 \times 0 = 29.98\ N$$

Para dimensionar el actuador de este mecanismo, es necesario usar la fórmula descrita en (86) pero con el torque de carga visto en la ecuación (100).

$$T_C = \frac{F_Z \times P(\text{sen}(\alpha) + \mu \cos(\alpha))}{2\pi\eta} \quad (100)$$

Reemplazando las variables en la ecuación (100).

$$\begin{aligned} T_C &= \frac{29.98 \times 0.005(\text{sen}(0) + 0.04 \times \cos(0))}{2\pi \times 0.9} = 1.0603 \times 10^{-4}\ N.m \\ &= \boxed{1.0603\ mN.m} \end{aligned}$$

Puesto que la aceleración es cero, también lo es el torque T_a , entonces, $T_C = T_V$. Es necesario también multiplicar el resultado por un factor de seguridad.

$$T_{VT} = FS \times T_V = 2 \times 1.0603 = \boxed{2.1206\ mN.m}$$

Al considerar las especificaciones de PBC Linear Co., (2013) para el motor NEMA 17 se tiene que a 600 RPM existe un torque de 135 $mN.m$, entonces está sobredimensionado y por tanto cumple con el objetivo del torque para el sistema vertical.

Dimensionamiento de la correa y piñón GT2

- Selección de la correa de transmisión

En esta subsección se analiza y dimensiona la correa dentada para la aplicación en este proyecto.

Puntualmente se toman 2 tipos de correas dentadas de neopreno, la trapezoidal y la curvilínea. Ahora se describen las ventajas por las cuales la correa dentada curvilínea es superior en propiedades mecánicas:

- Prevención de atascamiento de dientes.
- Menor presión en el diente de la correa curvilínea.
- Menor carga en los rodamientos gracias a las tensiones más pequeñas en la correa.
- Muy poco efecto o casi nulo del efecto *backslash* o de traslape entre dientes debido a la envoltura casi total con el piñón
- Mayor precisión en los movimientos debido al grosor del diente y al traslape mínimo que existe.

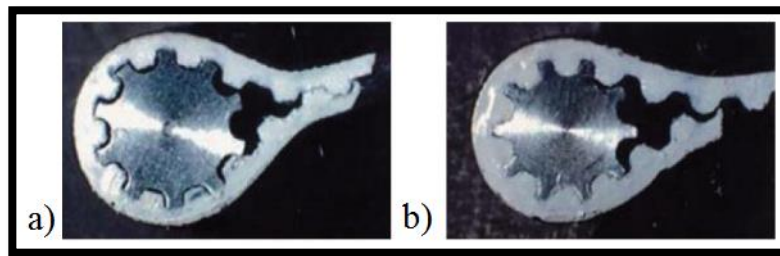


Figura 91. a) Correa trapezoidal, b) Correa curvilínea.

Fuente:(Cenev, 2014).

De acuerdo a las tablas de (SDP/SI, 2007) (ver anexos), para la resistencia de la correa es necesario proporcionar 2 valores dentro del rango de fuerza aplicable para esta correa:

- $T_{TL} = 98.5442 \text{ mN.m} = 0.87218 \text{ lbf.in}$
- $V_L = 600 \text{ RPM}$

Con estos valores se comprueba la factibilidad para usar las correas GT2 de 2 mm de paso y 6 mm de ancho para el eje longitudinal.

Puesto que el torque de diseño para el eje transversal $T_{TL} = 30.7285 \text{ mN.m} = 0.27197 \text{ lbf.in}$ es menor que el torque de diseño longitudinal, y la velocidad es igual o menor, entonces se acepta el uso de la correa GT2 de 2 mm de paso y 6 mm de ancho acuerdo a las tablas como correa para el eje transversal.

- **Elongación en la Correa longitudinal**

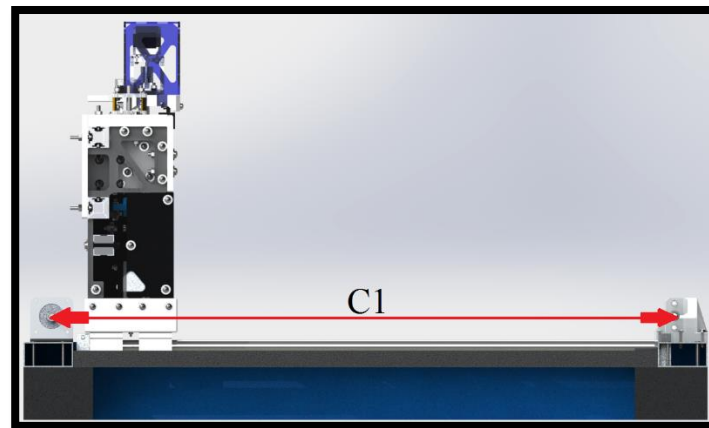


Figura 92. Distancia entre centros de la correa en el eje longitudinal.

Fuente: Propia.

De la Figura 92 se considera la siguiente fórmula tomada de Gates Co., (2007) para el cálculo de la elongación de la correa.

$$\text{Elong. Correa} = \frac{C_1 \times F_u}{\text{Modulo de Tensión GT2}} \quad (101)$$

- La distancia entre centros se mide desde el eje del motor que alberga el piñón GT2 conductor y el soporte del eje con piñón GT2 conducido denotado en la Figura 92 como $C_1 = 949.2 \text{ mm}$.
- Del análisis dinámico se tiene que la fuerza tensora es $F_u = 80.51 \text{ N}$.
- El módulo de tensión para la correa GT2 es 79200 N de Gates Co., (2007).

Se reemplazan los valores en la ecuación (101):

$$\text{Elong. Correa} = \frac{949.2 \times 80.51}{79200} = 0.964 \text{ mm}$$

El resultado de la elongación de la correa es considerable. Por ello se distribuye todo el peso entre las 2 correas GT2 con sus respectivos motores NEMA 23. Esto agiliza el movimiento con mayor precisión y permite una menor elongación de la correa. Por ello $C_1 = 949.2 \text{ mm}$, si es un valor aceptable para la distancia entre centros en el eje longitudinal.

- **Elongación de la correa transversal**

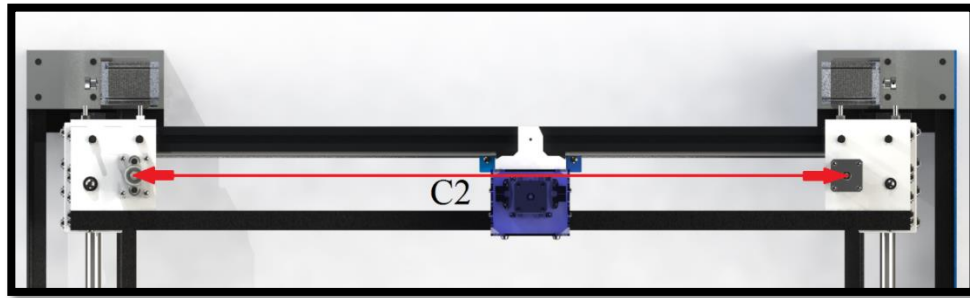


Figura 93. Distancia entre centros en el eje transversal.

Fuente: Propia.

Al igual que el caso anterior se usa la ecuación (101) para calcular la elongación de la correa.

- La distancia entre centros se mide desde el eje del motor que alberga el piñón GT2 conductor y el soporte del eje con piñón GT2 conducido, denotado en la Figura 93 como $C_2 = 907.8 \text{ mm}$.
- Del análisis dinámico se tiene que la fuerza tensora es $F_u = 36.36 \text{ N}$.
- El módulo de tensión para la correa GT2 es 79200 N . Valor tomado de Gates Co., (2007).

$$\text{Elong. Correa} = \frac{907.8 \times 36.36}{79200} = 0.1467 \text{ mm} \quad (102)$$

Por el resultado de (102) se acepta el uso de $C_2 = 907.8 \text{ mm}$ como la distancia entre centros para el eje transversal.

- **Pre-Tensado en la correa**

Gates Co., (2007) especifica en su manual que la tensión en las correas de movimientos síncrono (dentadas) no necesitan de una pre-tensión estática muy grande. El manual proporciona valores estándares de pretensado de acuerdo al ancho y paso de las correas.

Así, en este proyecto se utiliza una correa GT2 de 6 mm de ancho y 2 mm de paso:

$$\text{Tension mínima en la correa} = 2.0 \text{ lbf} = 8.896 \text{ N}$$

Este valor es el mínimo proporcionado a la correa para que su transmisión sea efectiva y óptima.

- **Tensión de la correa al moverse, y efecto en el piñón**

Es necesario calcular el valor teórico de la fuerza que la correa ejerce cuando mueve la carga. Para ello es necesario referirse a la ecuación (103), (104), y a la Figura 94.

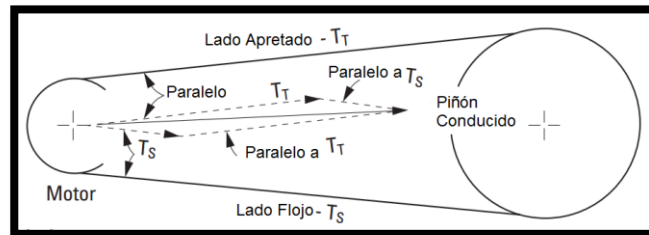


Figura 94. Tensiones en la correa GT2.

Fuente: (SDP/SI, 2007).

Nótese que hay dos tensiones en la Figura 94, las cuales indican las tensiones provocadas por el lado apretado y flojo respectivamente, que se suman vectorialmente para encontrar la tensión total en el piñón GT2. En este caso los dos piñones tienen el mismo diámetro, y la suma vectorial se vuelve escalar.

$$T_T = \frac{2.5 \times Q}{P_d} \quad (103)$$

$$T_S = \frac{0.5 \times Q}{P_d} \quad (104)$$

De donde:

- $Q_1 = 98.5442 \text{ mN.m} = 0.8722 \text{ lbf.in}$, para el eje longitudinal y $Q_2 = 30.7285 \text{ mN.m} = 0.272 \text{ lbf.in}$ para el eje transversal.
- $P_d = 5 \text{ mm} = 0.19685 \text{ in}$, que es el diámetro del piñón GT2 en ambos ejes.

Entonces, se tiene para el eje longitudinal:

$$T_T = \frac{2.5 \times 0.8722}{0.19685} = 11.0769 \text{ lbf} = 49.2725 \text{ N}$$

$$T = \frac{0.5 \times 0.8722}{0.19685} = 2.2153 \text{ lbf} = 9.8541 \text{ N}$$

$$T_T + T_S = 49.2725 + 9.8541 = \boxed{59.1266 \text{ N}} \quad (105)$$

Y para el eje transversal:

$$T_T = \frac{2.5 \times 0.272}{0.19685} = 3.4544 \text{ lbf} = 15.3659 \text{ N}$$

$$T_S = \frac{0.5 \times 0.272}{0.19685} = 0.6908 \text{ lbf} = 3.0728 \text{ N}$$

$$T_T + T_S = 15.3659 + 3.0728 = \boxed{18.4387 \text{ N}} \quad (106)$$

- Reacción en las chumaceras

El piñón conducido se sujeta a un eje con rodamientos, provocando efectos de tensión. Gráficamente se observan las reacciones de las fuerzas en la Figura 95. Dichas reacciones son calculadas para los ejes transversal y longitudinal.

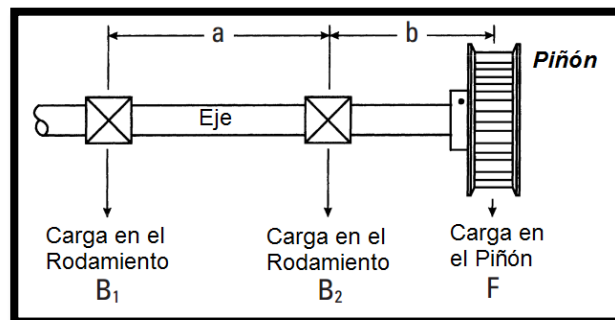


Figura 95. Eje con piñón sobresaliente.

Fuente: (SDP/SI, 2007).

Las ecuaciones (107) y (108) demuestran las reacciones B_1 y B_2 .

$$B_1 = \frac{F}{a} \quad (107)$$

$$B_2 = \frac{F(a + b)}{a} \quad (108)$$

De donde:

- $F = 59.1266 \text{ N} = 13.2922 \text{ lbf}$, para el eje longitudinal, y $F = 18.4387 \text{ N} = 4.1452 \text{ lbf}$, para el eje transversal.
- $a = 48.65 \text{ mm} = 1.9153 \text{ in}$, y $b = 7.93 \text{ mm} = 0.3122 \text{ in}$, para el eje longitudinal. $a = 26 \text{ mm} = 1.0236 \text{ in}$, y $b = 31.81 \text{ mm} = 1.2523 \text{ in}$, para el eje transversal.

Se tiene para el eje longitudinal:

$$B_1 = \frac{13.2922}{1.9153} = 6.94 \text{ lbf} = \boxed{30.87 \text{ N}} \quad (109)$$

$$B_2 = \frac{13.2922(1.9153 + 0.3122)}{1.9153} = 15.4588 \text{ lbf} = \boxed{68.274 \text{ N}} \quad (110)$$

Y para el eje transversal:

$$B_1 = \frac{4.1452}{1.0236} = 4.0496 \text{ lbf} = \boxed{18.0135 \text{ N}} \quad (111)$$

$$B_2 = \frac{4.1452(1.0236 + 1.2523)}{1.0236} = 9.2165 \text{ lbf} = \boxed{40.997 \text{ N}} \quad (112)$$

Estas fuerzas se usan en anteriores apartados para calcular el factor de seguridad en algunas piezas.

- Sujeción de la Correa

El dispositivo para tensar la correa GT2, es el GT2 Clamp de la Figura 96. Y el mecanismo completo para atrapar la correa con la carga se muestra en la Figura 97 para el eje longitudinal y en la Figura 98 para el eje transversal.

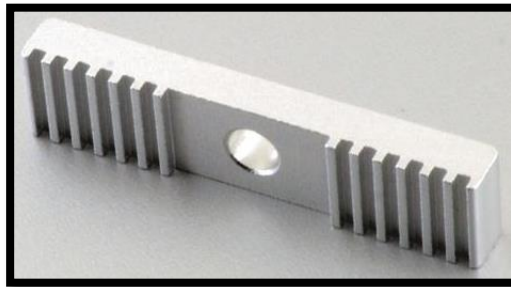


Figura 96. GT2 Clamp.
Fuente: (RPOne, n.d.).

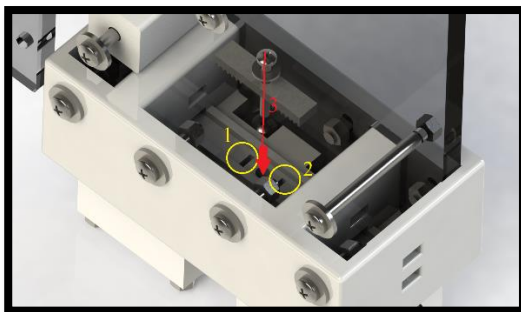


Figura 97. GT2 Clamp en el soporte de la columna, 1) y 2) agujeros para la correa, 3) orificio para el tornillo del GT2 Clamp
Fuente: Propia.

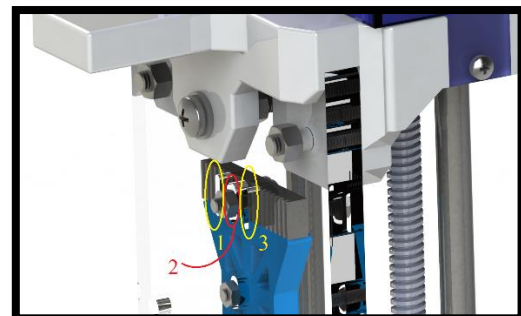


Figura 98. GT2 Clamp en el soporte del sistema de eje vertical. 1) y 2) agujeros para la correa, 3) orificio para el tornillo del GT2 Clamp.
Fuente: Propia.

Dimensionamiento del tornillo sin fin y tuerca

Para los cálculos se ha optado por un tornillo sin fin de acero inoxidable de 5 mm de paso y 8 mm de diámetro (Figura 99), de los cuales se usan 18.8 cm de carrera. Para la tuerca se ha usado una tuerca ACME tipo T de bronce de 8 mm de diámetro con el mismo paso del tornillo.



Figura 99. Tuerca tipo T de 8 mm de bronce (izquierda), junto con el tornillo sin fin de acero inoxidable de 8 mm (derecha).

Fuente: (SDP/SI, 2007).

En los siguientes estudios se determina la factibilidad de este tornillo sin fin con tuerca mediante cálculos estandarizados de velocidad y carga máxima.

- **Velocidad máxima del tuerca/tornillo sin fin**

Se tiene para la velocidad la ecuación (113), que cabe recalcar es una fórmula diseñada para el estándar inglés de ACME.

$$V_{crítica} = f_s \times (4.76 \times 10^6) \times \frac{d}{L^2} \quad (113)$$

De donde:

- $f_s = 1.47$, es un factor de sujeción tomado de acuerdo al tipo de empotramiento del tornillo a la base, obtenido del manual para tuercas ACME de SDP/SI, (2007), como en la Figura 100.
- $d = 5 \text{ mm} = 0.19685 \text{ in}$, es el diámetro de la raíz del tornillo.
- $L = 320.21 \text{ mm} = 12.606 \text{ in}$, es la distancia entre las chumaceras.

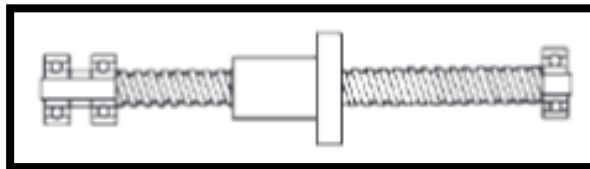


Figura 100. Tornillo sin fin y tuerca con sujeción doble en un lado y simple en otro.

Fuente: (SDP/SI, 2007).

Reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (113) se tiene:

$$V_{\text{rítica}} = 1.47 \times (4.76 \times 10^6) \times \frac{0.19685}{12.606^2} = \boxed{8667.724 \text{ RPM}}$$

Que es la velocidad máxima alcanzable para evitar que ocurran efectos adversos en el tornillo como pandeo excesivo.

Sin embargo, de acuerdo al fabricante, esta velocidad debe solo llegar a 4000 RPM por estar ligada a una tuerca ACME de bronce que soporta la fricción en menor grado que el acero. Por ende se reduce a la mitad el valor calculado.

Aun así, y como se observó del apartado del dimensionamiento del motor, la velocidad a alcanzar no sobrepasa los 1000 RPM, por lo que este sistema de tornillo sin fin y tuerca se ajusta al requerimiento.

- Carga máxima del tuerca/tornillo sin fin

Ahora, se tiene en (114) la carga máxima para este conjunto.

$$P_{\text{max}} = f_s \times (14.03 \times 10^6) \times \frac{d^4}{L^2} \quad (114)$$

El factor de sujeción de la Figura 100, tiene un valor de $f_s = 2$ según el manual de SDP/SI, (2007).

$$P_{\text{max}} = 2 \times (14.03 \times 10^6) \times \frac{0.19685^4}{12.606^2} = 265.1396 \text{ lbs} = \boxed{120.265 \text{ Kg}}$$

El valor de P_{max} indica que la tuerca lograra soportar 120.265 Kg hasta que el mecanismo empiece a flejar, remorderse o doblarse impidiendo el movimiento relativo entre la tuerca y el tornillo.

De acuerdo al fabricante, se recomienda no llegar a esta cifra sino a la mitad aproximadamente, es decir 61 Kg. Sin embargo, la carga en este proyecto no sobrepasará los 2 kilogramos, con lo cual se justifica el uso de este mecanismo en específico.

3.3.1.2.3. Cálculos de transmisión

Cálculos de desplazamiento lineal en los ejes cartesianos.

Para la programación del posicionamiento es necesario conocer cuántos milímetros se mueven por paso los ejes tanto en las correas como en el tornillo sin fin.

$$n_s = \frac{360^\circ}{\sigma} \quad (115)$$

Dónde:

- n_s : Pasos por revolución
- σ : Ángulo de paso, $\sigma = 1.8^\circ$ (Para Nema 17 y 23)

Reemplazando los valores, se obtiene.

$$n_s = \frac{360^\circ}{1.8^\circ}$$

Por lo tanto los pasos por revolución obtenidos:

$$n_s = 200 \frac{\text{pasos}}{\text{rev}}$$

Cálculo del paso por milímetro en las correas dentadas

$$\text{asos_por_mm} = \frac{n_s \times \text{Micropasos_driver}}{p \times n_{\text{polea}}} \quad (116)$$

Dónde:

- Micropasos_driver : Los micropasos utilizados en el driver = 1
- p : Paso de la correa dentada, $p = 2\text{mm}$
- n_{polea} : Número de dientes utilizado en la polea, $n_{\text{polea}} = 20$

Reemplazando los valores se tiene:

$$\text{Pasos_x_mm} = \frac{200 \times 1}{2 \times 20}$$

$$Paos_x_mm = 5$$

Cálculo del paso por milímetro en el tornillo sin fin

$$Pasos_x_mm = \frac{n_s \times Micropasos_driver}{p_{tornillo}} \quad (117)$$

Dónde:

- $p_{tornillo}$: Paso del tornillo, $p_{tornillo} = 5mm$

Reemplazando los valores se tiene:

$$Pasos_x_mm = \frac{200 \times 1}{5}$$

$$Pasos_x_mm = 40$$

3.3.1.2.4. Cinemática del robot

Modelamiento de la cinemática directa del robot cartesiano

Para realizar el modelamiento de la cinemática directa se utilizará el método de Denavith Hartenberg, el cual encuentra la posición y orientación del efector final en relación a un sistema de referencia si se conocen ciertos parámetros geométricos.

Posterior al algoritmo de Denavith se determina la matriz de transformación que enlaza los sistemas de coordenadas pertenecientes a los eslabones con respecto a al sistema de coordenadas de referencia.

El robot utilizado en la presente investigación es de tipo cartesiano, por lo cual presenta tres grados de libertad con articulaciones prismáticas (P-P-P). A continuación, se detallarán los pasos para encontrar la matriz homogénea con Denavith Hartenberg.

Algoritmo de Denavith Hartenberg

1. Determinar los eslabones y numerarlos comenzando desde el número 0 (Figura 101).

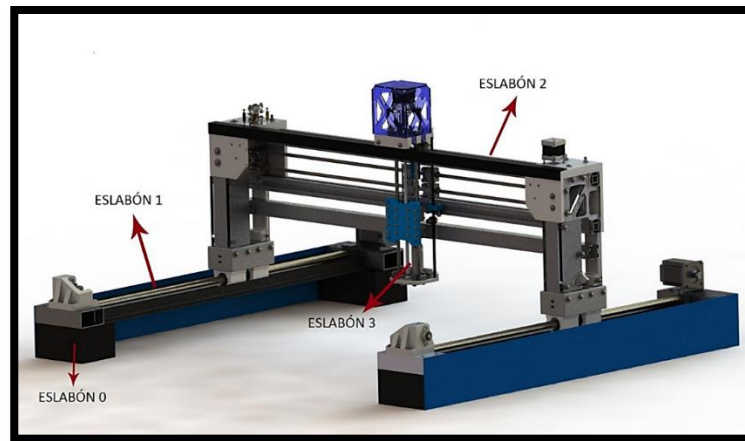


Figura 101. Eslabones del robot cartesiano

2. Determinar las articulaciones y numerarlas empezando desde el número uno (Figura 102).

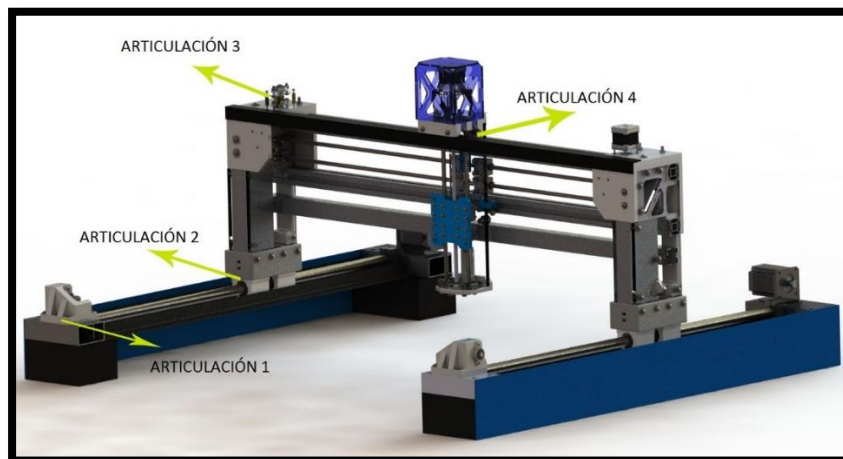


Figura 102. Articulaciones del robot cartesiano

3. Determinar el tipo de articulación y los ejes respectivos (Figura 103).

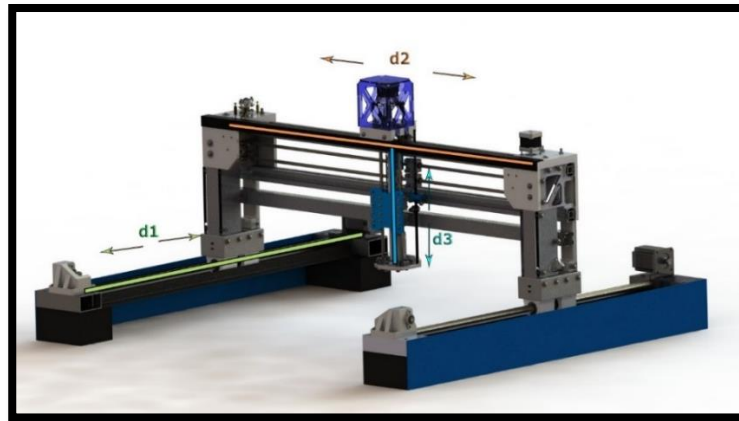


Figura 103. Ejes de traslación.

4. Localizar el origen del sistema de referencia $\omega_0(x_0, y_0, z_0)$. Se debe especificar el eje z_0 de tal manera que el origen y el eje x_0 se pueda elegir de forma arbitraria siguiendo la regla de la mano derecha.
5. Determinar la dirección de los ejes z_0, z_1, \dots, z_{n-1} .
6. Luego de fijar el sistema de referencia ω_0 se inicia el algoritmo de manera repetitiva en el cual se define el sistema de referencia $\omega_i(x_i, y_i, z_i)$, usando el sistema de referencia $\omega_i(x_i, y_i, z_i)\omega_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$. Si el eje z_{i-1} intercepta el eje z_i , colocar el origen del sobre la articulación i-ésima (Figura 104).

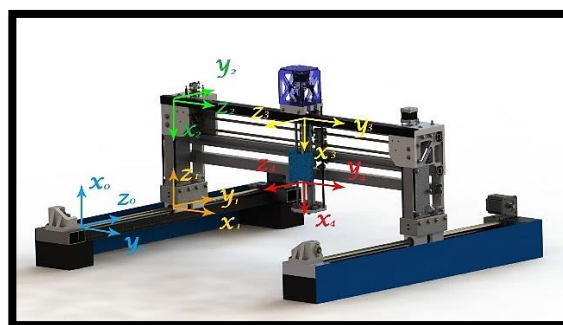


Figura 104. Sistemas de referencia pertenecientes a cada eslabón

7. Se establece la tabla para la construcción de la matriz de homogénea utilizando los parámetros geométricos que se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30.
Características geométricas Denavith Hartenberg.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE ESLABONES	
l_i	Longitud del eslabón i-esímo
d_i	Articulaciones lineales o prismáticos
α_i	Ángulo entre z_{i-1} y z_i medido con respecto al eje x_i
θ_i	Articulaciones rotacionales; representa el ángulo entre los ejes x_{i-1} y x_i , medido alrededor del eje z_{i-1}

Fuente: (Reyes, 2011)

Tabla 31.
Parámetros de Denavith Hartenberg

PARÁMETROS DE DENAVITH HARTENBERG				
Eslabón	θ_i	d_i	l_i	α_i
1	-90°	$d1^*$	0	-90°
2	-90°	$d2$	0	90°
3	0°	$d3^*$	0	-90°
4	0°	$d4^* + \text{offset}$	0	0°

Se debe resaltar que las distancias $d1^*$, $d3^*$ y $d4^*$ son variables del movimiento propio del robot que se rigen a los límites basados en la distancia efectiva:

- $0 < d1 < 722.5 \text{ mm}$.
- $0 < d3 < 712 \text{ mm}$.
- $0 < d4 < 185 \text{ mm}$.

En el eslabón 4 se establece el offset, el cual representa la altura del efector final y es de 13 *cm*.

La simulación del modelo se realizó en el software libre llamado *Robotic Arm Kinematic GUI*, donde se colocaron los parámetros de la Tabla 31. Obteniendo el modelo cinemático real del robot que se muestra en la Figura 105.

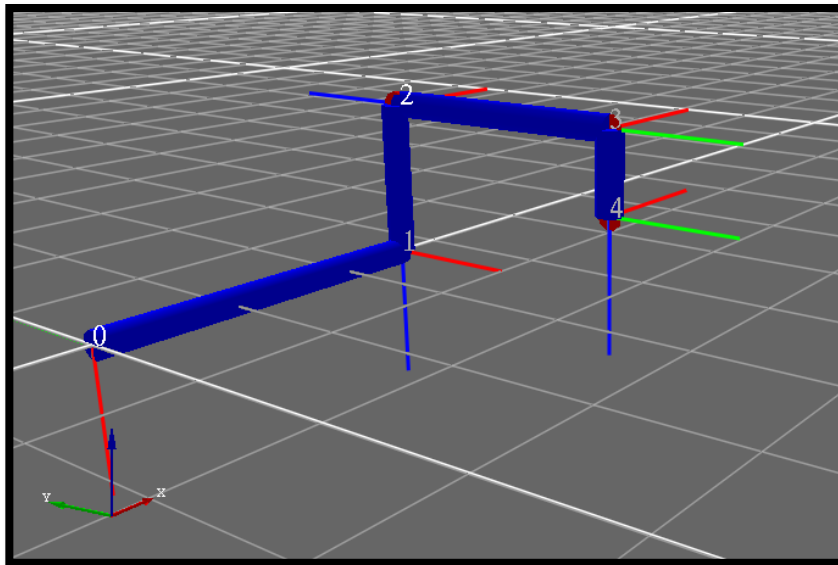


Figura 105. Modelo cinemático del robot

Matrices de transformación homogénea

En el algoritmo de Denavith Hatenberg se representa la matriz de transformación homogénea M_i como el producto de cuatro transformaciones: (Reyes, 2011).

$$M_i = R_{z,\theta_i} T_{z,d_i} T_{x,l_i} R_{x,\alpha_i} \quad (118)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\text{sen}(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & l_i\cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) & l_i\text{sen}(\theta_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (119)$$

Reemplazando la matriz de la ecuación (119) en cada articulación con los parámetros detallados en la Tabla 31, se tienen las siguientes matrices:

$$M_0^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4^* + offset \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Multiplicando las matrices homogéneas se tiene finalmente que:

$$M_0^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & d_2 + d_4^* + offset \\ 0 & -1 & 0 & d_3^* \\ 1 & 0 & 0 & d_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (120)$$

El modelo de cinemática directa del robot está dado como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_2 + d_4^* + offset \\ d_3^* \\ d_1^* \end{bmatrix} \quad (121)$$

En la matriz de la ecuación (121) se muestran los valores de los tres ejes (x, y, z) con el sistema de referencia inicial que se seleccionó; al ser un robot cartesiano, las ecuaciones no son complejas y se asigna una distancia variable para cada eje. Se puede considerar asignar otro sistema de referencia siempre y cuando se cumpla con la regla de la mano derecha, esto se hace para acoplarse al modelo cinemático simulado y se justifica debido al tipo de robot utilizado, el cual debido a su naturaleza, permite este cambio:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d1 * \\ d3 * \\ d2 + d4 * + offset \end{bmatrix} \quad (122)$$

Reemplazando los valores constantes se tiene:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d1 * \\ d3 * \\ d4 * + 13 + 34 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d1 * \\ d3 * \\ d4 * + 47 \text{ cm.} \end{bmatrix} \quad (123)$$

3.3.1.2.5. Parámetros de funcionalidad del robot

Grados de libertad

El robot presenta tres grados de libertad en los ejes ortogonales cartesianos (X,Y y Z) utiliza tres articulaciones prismáticas (P,P,P).

Espacio de trabajo

Al ser un robot de tipo cartesiano se tiene un volumen de trabajo regular rectangular (Figura 106), las dimensiones establecidas determinaron el alcance del efector final. Para la aplicación de la presente investigación cumple perfectamente con el criterio de diseño en cuanto a mayor movilidad y alcance en el tablero de ajedrez se refiere.

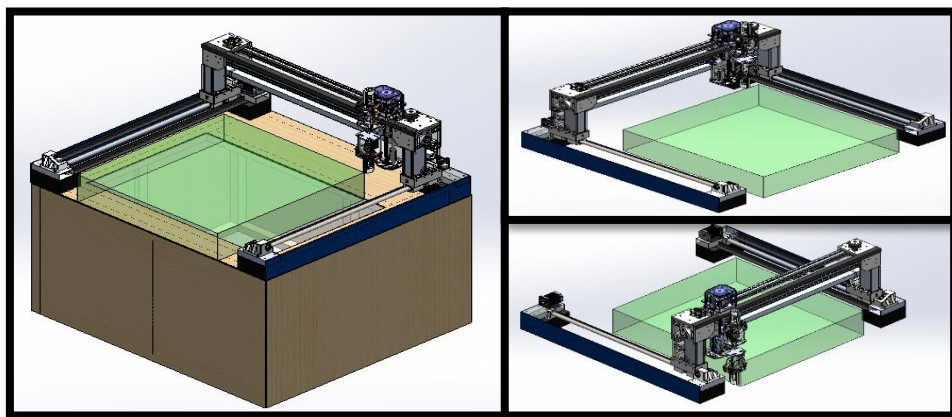


Figura 106. Espacio de trabajo del robot

La Figura 107 muestra las dimensiones del volumen de trabajo del robot. El eje x, correspondiente al eje longitudinal, está limitado a 738.47 mm; el eje y, correspondiente al

eje transversal, está limitado a 710.81 mm ; y el eje z, correspondiente al eje vertical, está limitado a 164.86 mm . El efector final puede girar 180° .

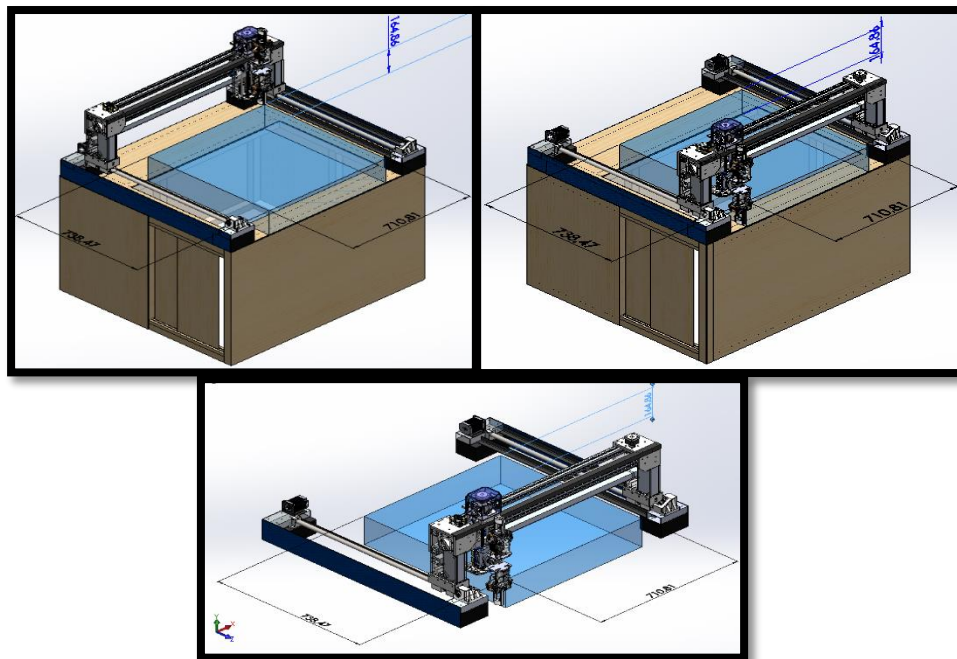


Figura 107. Dimensiones del espacio de trabajo

Capacidad de carga

La capacidad de carga representa el peso (en kilogramos) que el robot puede levantar (Reyes, 2011). En el presente diseño se tiene una capacidad de carga de **2 Kg**.

Velocidad

En la Tabla 32 se muestra la velocidad máxima que tiene el robot en cada eje.

Tabla 32.
Velocidad máxima del robot.

VELOCIDAD MÁXIMA DEL ROBOT			
Eje	[pasos/s]	[rev/s]	[mm/s]
X	2000	10	400
Y	1500	7.5	300
Z	3200	16	80

Programabilidad

Con la instalación del controlador tipo Atmega2560, se permite una programación manual por medio del módulo de control.

Resolución espacial

La resolución espacial es el incremento más pequeño de movimiento en que el robot puede dividir su volumen de trabajo (Reyes, 2011). El robot presenta 1.1 *mm* de resolución espacial.

Subsistema 2. Efecto Final

3.3.1.3. Reconocimiento de los requerimientos técnicos para el efecto final

Para el diseño del subsistema se tomó en cuenta factores que solucionen las necesidades de agarre y posicionamiento, las cuales se muestran a continuación:

- Tipo de pinza
- Material
- Accionamiento
- Tamaño
- Costo

3.3.1.4. Reconocimiento de los requerimientos físicos para el efecto final

Según las investigaciones y estudios citados en el capítulo 2 sobre robots que juegan ajedrez, se obtienen los siguientes requerimientos:

- No debe generara colisiones con las demás piezas
- Debe ser rápido
- Debe ser pequeño
- Debe ser estético
- Debe tener buen agarre

Se desarrolló el diseño mecánico del efector final con un grado de libertad, el cual se ajusta a las necesidades del módulo y es el encargado de manipular y posicionar las piezas de ajedrez en el tablero proyectado.

3.3.1.5. Alternativas para diseño

Tipo de pinza

En el diseño del subsistema se tomó en cuenta tres soluciones que satisfacen las necesidades de agarre, las cuales se muestran a continuación: a) Pinza de presión con desplazamiento lineal, b) Pinza de presión con movimiento pivotante y c) Pinza magnética.

Pinza de presión con desplazamiento lineal

La pinza de presión con desplazamiento lineal ejecuta su movimiento por medio de un mecanismo de barras paralelas y se utiliza para el transporte de piezas, en las cuales la presión no sea de mucha importancia. En la Tabla 33 se muestran las ventajas y desventajas de la alternativa A.

Tabla 33.

Ventajas y desventajas de la pinza de presión con desplazamiento lineal

Ventajas	Desventajas
El mecanismo de barras paralelas evita colisiones con las demás piezas en el momento de agarre y transporte.	Capacidad de carga muy baja.
Puede sujetar cuerpos con superficie porosa.	Fuerza de aprehensión media.
Puede adaptarse a la geometría y dimensiones de los objetos a manipular.	Estructura geométrica, a mayor dimensión menor fuerza.

Pinza de presión con movimiento pivotante

La pinza de presión con movimiento pivotante ejecuta su movimiento girando los dedos en relación a puntos fijos del pivote. Al ser una pinza de presión se utiliza en piezas donde la presión no sea un factor de diseño importante. En la Tabla 34 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa B.

Tabla 34.***Ventajas y desventajas de la pinza de presión con movimiento pivotante***

Ventajas	Desventajas
Puede sujetar cuerpos con superficie porosa.	Fuerza de aprehensión muy baja.
Puede adaptarse a la geometría y dimensiones de los objetos a manipular.	Capacidad de carga baja.
-	Estructura geométrica, a mayor dimensión menor fuerza.
-	Puede producir colisiones con objetos que estén separados con muy poca distancia en el momento del agarre.

Pinza magnética

La pinza magnética es construida con electroimanes, los cuales producen atracción entre la pinza y la pieza ferromagnética. En la Tabla 35 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa C.

Tabla 35.***Ventajas y desventajas de la pinza magnética***

Ventajas	Desventajas
Agarre estable de piezas.	Para la sujeción se necesita de piezas ferromagnéticas.
La capacidad de carga media.	Accionamiento eléctrico.
-	Fuerza de aprehensión media.

Material del efector final

Para el material del efector final se tomó en cuenta tres alternativas, las cuales se muestran a continuación: a) Efector final de acrílico, b) Efector final de plástico PLA y c) Efector final de acero.

Efector final de acrílico

En la Tabla 36 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa A.

Tabla 36.**Ventajas y desventajas del material acrílico para el efector final**

Ventajas	Desventajas
Construcción precisa con tolerancias de +/- 0.01mm. Utilizando la técnica de cortadura por láser.	Alta fragilidad.
Baja fricción entre eslabones	No se puede obtener objetos tridimensionales.
Estético	Desgaste medio en mecanismos sometidos a esfuerzos mecánicos.
Costo medio	-

Efector final de plástico PLA

En la Tabla 37 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa B.

Tabla 37.**Ventajas y desventajas del material PLA para el efector final**

Ventajas	Desventajas
Construcción precisa con tolerancias de +/- 0.1mm.	Alta fragilidad en piezas pequeñas dependiendo el mallado.
Piezas tridimensionales.	Alto costo.
Fricción media entre eslabones.	Alto desgaste medio en mecanismos sometidos a esfuerzos mecánico
Estético.	-

Efector final de acero

En la Tabla 38 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa C.

Tabla 38.**Ventajas y desventajas del material acero para el efector final**

Ventajas	Desventajas
Maleable.	Bastante pesado
Fragilidad: muy baja	Costo elevado de construcción

Accionamiento del efector final

Para el subsistema de accionamiento se decidió utilizar el sistema eléctrico debido a su facilidad de control, factibilidad y costo. Tomando en cuenta esta premisa se formularon dos alternativas que se muestran a continuación: a) Servomotores, b) Motores a paso.

Servomotores

Los servomotores son motores de corriente continua, tienen un conjunto de engranes, un circuito de control y un sensor de posición que les permite situarse en grados predefinidos. Su ángulo de rotación se limita a 180 grados. En la Tabla 39 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa A.

Tabla 39.
Ventajas y desventajas de servomotores

Ventajas	Desventajas
Fácil configuración y control	Gira 180°
Precisión media alta	Torque medio
Movimiento rápido	Costo medio
Estructura pequeña	Necesita de un controlador para operar

Motores a paso

Los motores a paso requieren un circuito de control externo para funcionar, utilizan múltiples electroimanes dentados dispuestos alrededor de un engrane central para definir su posición. En la Tabla 40 se muestra las ventajas y desventajas de la alternativa B.

Tabla 40.
Ventajas y desventajas de motores a pasos

Ventajas	Desventajas
Gira 360°	Necesitan de un circuito externo para funcionar
Fácil configuración y control	Movimiento lento
Alta precisión	Costo alto
Alto torque	-

Tamaño

El tamaño no tiene alternativas debido a que la pinza debe ser la mitad del tamaño del rey para que sujete a la pieza desde el centro de gravedad según las recomendaciones de los estudios ya expuestos. Mientras mayor sea el tamaño del efector final, menos fuerza de aprehensión se tendrá en los dedos.

Costo

El costo dependerá del material con que se va a construir y del tamaño de las pinzas. Debe ser mínimo para que cumpla con los requerimientos presentados.

3.3.1.6. Selección de alternativas por el método ordinal corregido de criterios ponderados

Selección del tipo de pinza

En la Tabla 41 se muestran las conclusiones para el tipo de pinzas frente a los criterios planteados.

Tabla 41.
Tabla de conclusiones para tipo de pinza

Conclusión	Agarre (sin colisión)	Capacidad de sujeción ABS	Fuerza de aprehensión	Suma	Prioridad
Alternativa A	0,17361	0,1389	0,104167	0,4167	1
Alternativa B	0,0694	0,1389	0,04167	0,25	3
Alternativa C	0,17361	0,0556	0,104167	0,333	2

Selección del material del efector final

En la Tabla 42 se muestran las conclusiones para el material del efector final frente a los criterios planteados.

Tabla 42.
Tabla de conclusiones para material del efector final

Conclusión	Construcción (precisión)	Costo	Estética	Suma	Prioridad
Alternativa A	0,25	0,1667	0,0694	0,4861	1
Alternativa B	0,125	0,0833	0,06944	0,2778	2
Alternativa C	0,125	0,0833	0,02778	0,2361	3

Selección del accionamiento del efector final

En la Tabla 43 se muestran las conclusiones para el accionamiento del efector final frente a los criterios planteados.

Tabla 43.

Tabla de conclusiones para accionamiento del efector final

Conclusión	Rapidez	Precisión	Costo	Suma	Prioridad
Alternativa A	0,27778	0,08333	0,2778	0,6389	1
Alternativa B	0,13889	0,08333	0,1389	0,3611	2

Evaluación y selección de alternativas

Analizando minuciosamente las distintas alternativas expuestas se concluye que la mejor opción de acuerdo a los factores decisivos es:

- Pinza de presión con desplazamiento lineal, la cual se justifica debido a su mecanismo de barras paralelas que evita colisiones con las demás piezas en el momento de agarre; en especial cuando se tiene poca separación entre ellas como es el caso de las piezas de ajedrez. Se puede implementar acoples que se adapten a la geometría del objeto manipulado, esto a la vez brinda mayor movimiento y la posibilidad de colocar un grado de libertad adicional en el diseño. La capacidad de carga es aceptable para la presente aplicación debido al bajo peso que representa una pieza de ajedrez.
- El efector final se construirá con acrílico dejando como segunda opción el plástico ABS.
- El accionamiento del efector final que se utilizara es el servomotor, debido a su rapidez y precisión quedando en segundo lugar el accionamiento por electroimán.

3.3.1.7. Diseño mecánico del efector final

Para realizar el diseño del efector final con las soluciones obtenidas, se desarrolló un mecanismo de barras paralelas para que el efector final pueda manipular y posicionar las piezas sin colisionar con las demás. Después del diseño del mecanismo, se analizó estáticamente los esfuerzos para obtener un buen dimensionamiento del efector final.

Diseño del mecanismo del efector final

Al necesitar un movimiento paralelo en los dedos del efector, es necesario desarrollar un mecanismo de paralelogramo articulado, el mismo que debe cumplir las siguientes condiciones para que tenga un movimiento continuo (Figura 108).

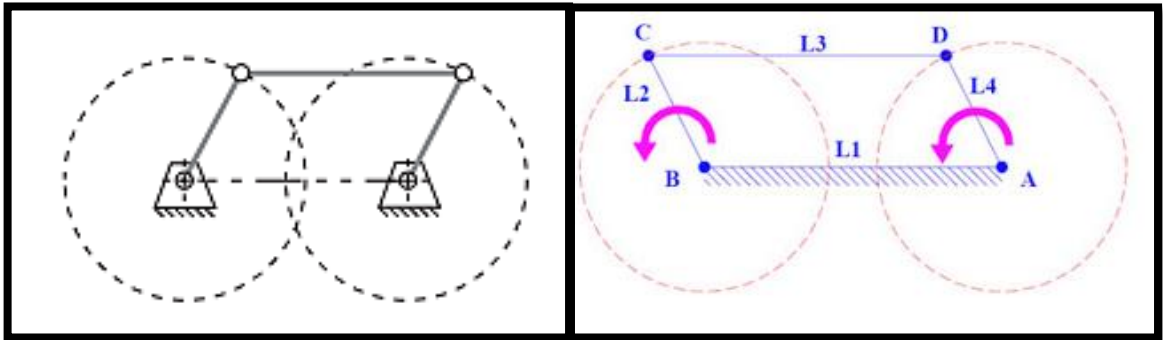


Figura 108. Mecanismo de paralelogramo articulado.

Fuente: (Robert L. Norton, 2004).

$$L1 + L2 = L3 + L4, \quad \text{siendo } (L1 = L3) \text{ y } (L2 = L4) \quad (124)$$

BC y AD deben tener el mismo sentido

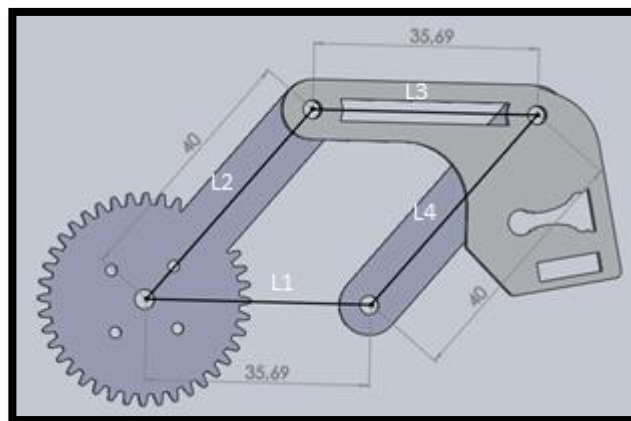


Figura 109. Pinza diseñada con mecanismo del paralelogramo.

Para que el efector final se acople al eje z, es necesario dimensionar los eslabones hasta de cinco centímetros de longitud. Por lo cual después de varios diseños, se optó por las dimensiones que se encuentra en la Figura 109.

Realizando un estudio del movimiento (Figura 110) se observa que es continuo y cumple con los requerimientos necesarios. Esto se corrobora en la gráfica de desplazamiento angular del eslabón L2 (Figura 111) y del eslabón L4 (Figura 112).

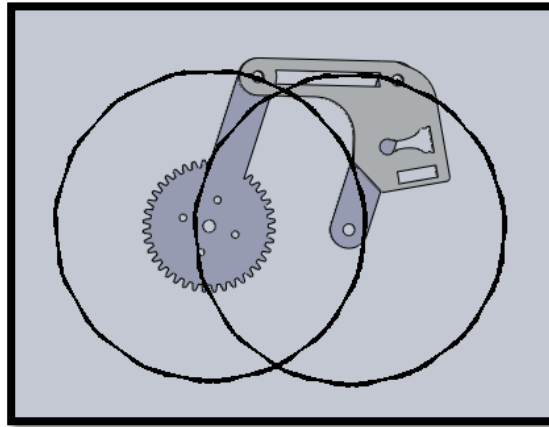


Figura 110. Trazo de movimientos en los eslabones 2 y 4

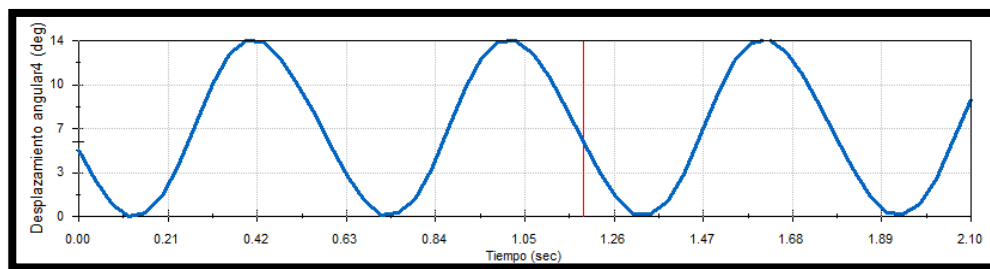


Figura 111. Análisis del desplazamiento angular del eslabón L2

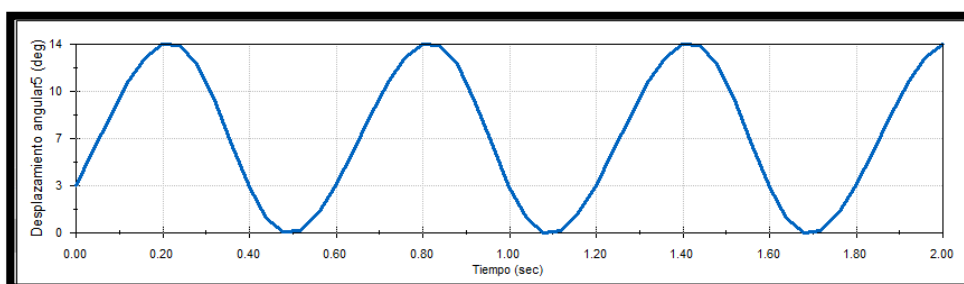


Figura 112. Análisis del desplazamiento angular del eslabón L4

Cálculo de transmisión para el efector final

Es necesario añadir que la velocidad angular con que se moverá el engrane es la que la del servomotor cuyo valor es $w = 6.14 \text{ rad/s}$ (Towerpro, 2010)

Para el cálculo de transmisión se obtienen los valores límites para evitar la según la ecuación (Budynas R., Nisbert K., 2009).

$$Np = \frac{2k}{(1 + 2N)(\sin(\theta))^2} \left(N + \sqrt{N^2 + (1 + 2N)(\sin(\theta))^2} \right) \quad (125)$$

Dónde:

- Np : Valor de dientes mínimo
- k : Dientes de profundidad
- θ : Ángulo de presión para la aplicación $\theta = 14.5$
- N es la relación de transmisión
- Para la aplicación como son engranes iguales se tiene $N = 1$

Reemplazando los valores, se obtiene.

$$Np = \frac{2 \times 1}{(1 + (2 \times 1))(\sin(14.5))^2} \left(1 + \sqrt{1 + (1 + 2 \times 1)(\sin(14.5))^2} \right)$$

El número mínimo de dientes obtenido es:

$$Np = 26.137$$

Para tener mayor precisión en el movimiento y seguir normas se optó por elegir el número de dientes del engranaje recto $z_0 = 30$ que se encuentra norma ISO 6636 para ángulo de presión de 14.5° (ISO, 2009).

Se tiene que la relación de transmisión es 1:

$$N = 1 = \frac{Z_1}{Z_0}$$

Por lo tanto el número de dientes del engranaje recto z_1 es:

$$Z_1 = 40 \times 1 = 40$$

Con estos datos obtenido es necesario analizar el número máximo de dientes para evitar interferencia según la ecuación (Budynas R., Nisbert K., 2009).

$$Ng = \frac{z_0^2(\sin(\theta))^2 - 4 \times k}{4k - 2 \times z_0 \times (\sin(\theta))^2} \quad (126)$$

Reemplazando se obtiene:

$$Ng = \frac{40^2(\sin(14.5))^2 - 4 \times 1}{4 \times 1 - 2 \times 40 \times (\sin(14.5))^2}$$

$$Ng = 94.86$$

Lo cual muestra que los valores están dentro de los parámetros de diseño.

Finalmente se deben calcular los demás parámetros para cumplir el diseño con las siguientes ecuaciones:

Módulo

$$M = \frac{d}{Z} \quad (127)$$

Dónde:

- *M: Módulo en mm*
- *Z: Número de dientes*
- *d: Diámetro primitivo en mm*

Se utilizará el módulo que viene en la norma ISO 6636 para engranajes con ángulo de presión de 14.5°, $M = 0.8$ (ISO, 2009).

Reemplazando los valores se tiene:

$$d = 0.8 \times 40 = 32 \text{ mm}$$

Paso diametral

$$P = \frac{Z}{d} \quad (128)$$

Dónde:

- P : Paso diametral ($\frac{\text{dientes}}{\text{pulg}}$)

Reemplazando valores se tiene:

$$P = \frac{30}{1.25984 \text{ pulg.}}$$

$$P = 23.8133$$

Diámetro Externo

$$de = d + 2M \quad (129)$$

Dónde:

- de : Diámetro externo

Reemplazando valores se tiene:

$$de = 32 + 2 \times 0.8 = 33.6 \text{ mm}$$

Paso diametral

$$P = \frac{z}{d} \quad (130)$$

Dónde:

- P : Paso diametral ($\frac{\text{dientes}}{\text{pulg}}$)

Reemplazando valores se tiene:

$$P = \frac{30}{1.25984 \text{ pulg.}}$$

$$P = 23.8133$$

Diámetro externo

$$de = d + 2M$$

Dónde:

- *de*: Diámetro externo

Reemplazando valores se tiene:

$$de = 32 + 2 \times 0.8 = 33.6 \text{ mm}$$

Altura del diente

$$h = 2.25 \times M \tag{132}$$

Dónde:

- *h*: Altura del diente en mm

Reemplazando valores se tiene:

$$h = 2.25 \times M = 1.8 \text{ mm}$$

Analizando la posición de las piezas de ajedrez en el tablero se estableció que existen dos etapas determinantes para evitar la colisión: etapa de apertura y cierre del efector final; además se tomó en cuenta las dimensiones de la base de las piezas de ajedrez que varían desde 3 a 4 cm. Con la premisa citada se implementó un segundo mecanismo de barras paralelas para el segundo dedo del efector y se realizó el trazado de movimiento que debe tener el efector, analizando el movimiento desde la apertura hasta el cierre (Figura 113).

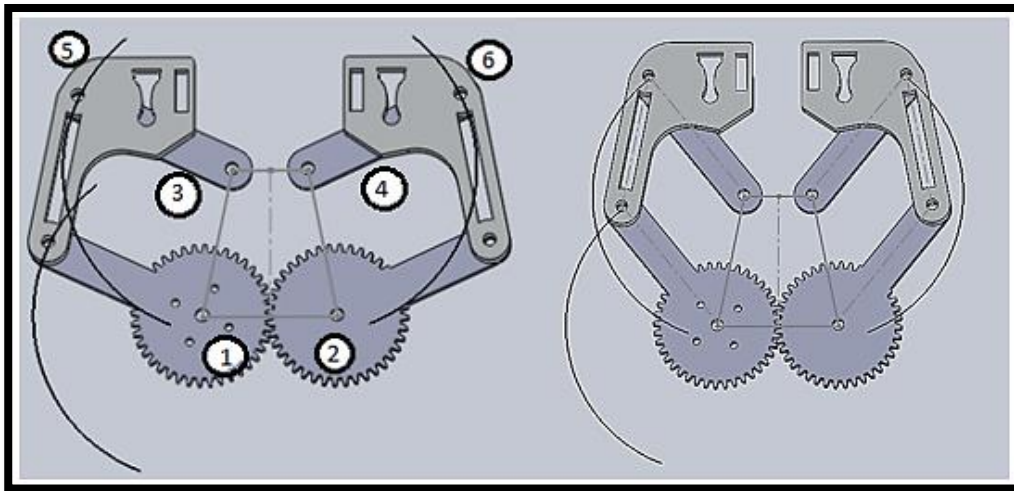


Figura 113. Trazo de movimientos en la apertura y cierre del efector por medio del mecanismo de barras paralelas.

A continuación, se detallarán las articulaciones y eslabones presentes en el diseño del mecanismo:

- 1 es la articulación principal, donde se colocará al servomotor y transmitirá el movimiento al resto de eslabones a través de dos engranes de 40 dientes con diámetro primitivo de 32 *mm*.
- 2 es el engrane secundario que transmite el movimiento al segundo dedo del efector
- 3 y 4 son eslabones paralelos y de igual dimensión que 1 y 2
- 5 y 6 junto a 3, 4, 1 y 2 forman un paralelogramo y de esta manera se logra el movimiento paralelo de los dedos
- El ángulo de desplazamiento en relación al eslabón horizontal formado por las articulaciones 1 y 2 oscila desde los 118° hasta los 165.5°, abriendo y cerrando el efector respectivamente

Con el mecanismo diseñado se desarrolló un estudio cinemático para comprobar su correcto funcionamiento. El resultado que resaltó se obtuvo al usar los valores de 32 *mm* para el eslabón A y 18 *mm* para el eslabón B (Figura 114).

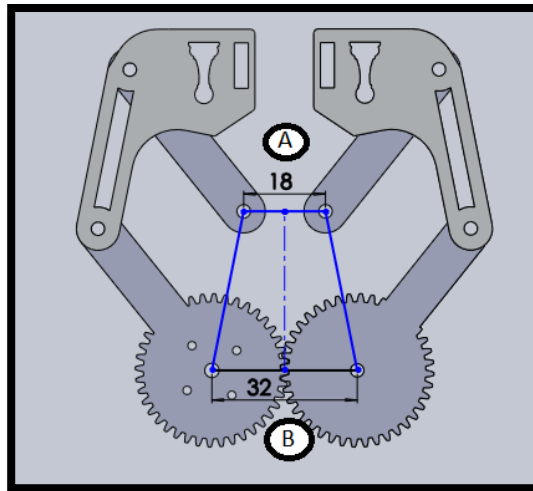


Figura 114. Distancia ideal para el efector final

El funcionamiento del efector diseñado se comprobó con las gráficas de movimiento tanto en los dedos del efector como en las articulaciones del dedo (Figura 115 y Figura 116). Se muestra una simulación desde el cierre hasta la apertura del efector corroborando los criterios de diseño presentados, con un desplazamiento lineal en los dedos y una curva suave e incremental; así como el desplazamiento angular con una curva lineal. De esta manera se comprueba el movimiento continuo y paralelo.

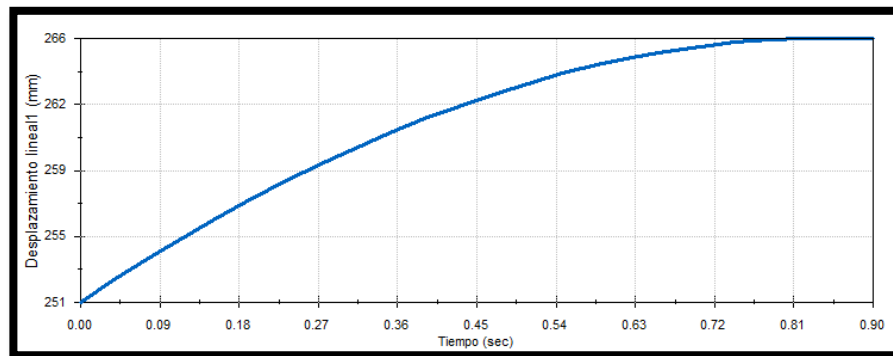


Figura 115. Desplazamiento lineal obtenido en el dedo derecho del efector

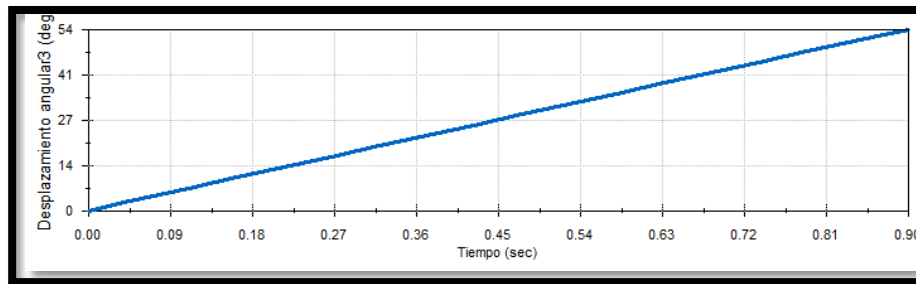


Figura 116. Desplazamiento angular obtenido en la articulación 6.

Diseño CAE

Para el diseño CAE es necesario colocar todos los parámetros del material seleccionado, en este caso se utilizó acrílico de 3mm; y sus propiedades son las siguientes (Tabla 44):

Tabla 44.

Características técnicas del acrílico

Características técnicas del acrílico		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo Elástico	3000000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.35	N/D
Módulo cortante	890000000	N/m ²
Densidad de masa	1200	Kg/m ³
Límite de tracción	73000000	N/m ²
Límite elástico	45000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	5.2e-005	°K
Conductividad térmica	0.21	W/(m*K)
Calor específico	1500	J/(kg*K)

Fuente: (Ideplas, 2009).

Para complementar el diseño del efector final, se realizó un análisis estático en los dedos y en todos los eslabones del efector final para determinar resistencias a la tensión máximas y mínimas.

Análisis estático en el dedo del efector final

El análisis se realizó con un mallado fino de tipo tetraedro para mayor precisión en los resultados. Para el efector final se consideró una carga de 40 gr.

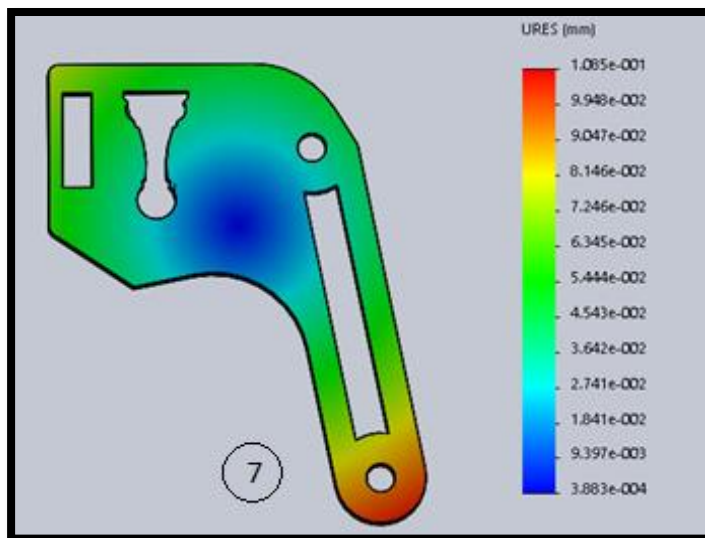


Figura 117. Análisis estático URES (desplazamiento estático) en el dedo del efector final.

Tabla 45.

Valores máximos y mínimos del estudio URES en el dedo del efector final.

Estudio	URES (desplazamiento estático)
Valor mínimo	9.232e+001
Valor máximo	1.803e+005

La Figura 117 y Tabla 45 muestra el desplazamiento estático producido en el dedo, y se observa que la mayor deformación se presentará en la articulación 7 cuyo valor es de 1.085e-001 mm en la máxima carga, lo cual es aceptable para la aplicación.

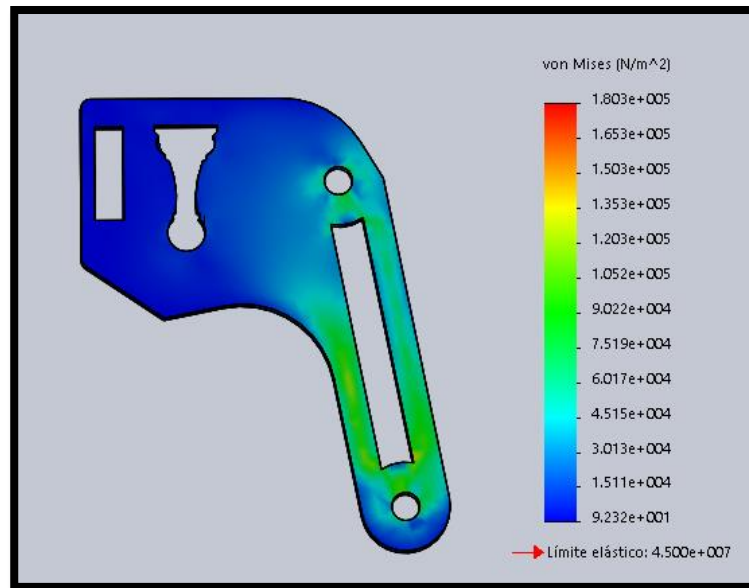


Figura 118. Análisis estático de tensión nodal en el dedo del efector final

Tabla 46.

Análisis estático nodal de tensiones en el dedo del efector final

Estudio	Análisis estático nodal de tensiones Von Mises
Valor mínimo	3.883e-004
Valor máximo	1.085e-001

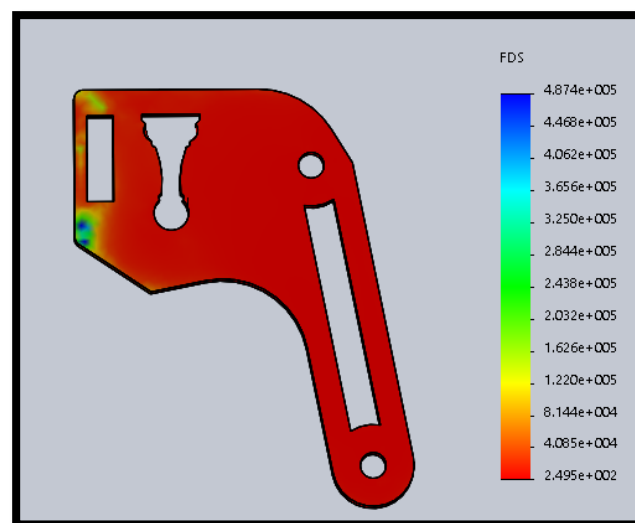


Figura 119. Análisis del factor de seguridad del dedo del efector final

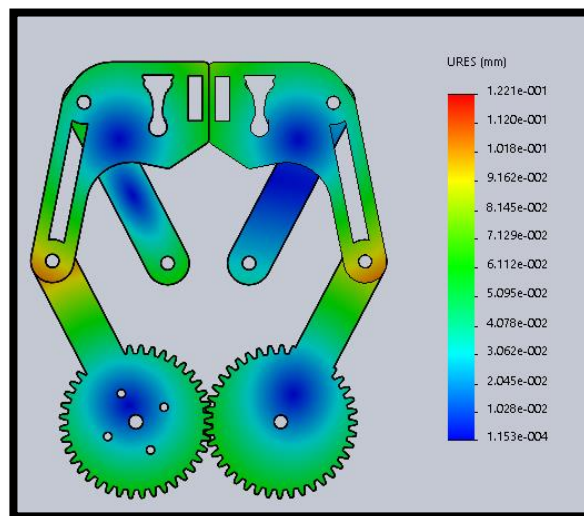
Tabla 47.**Análisis del factor de seguridad en el dedo del efector final**

Estudio	Análisis del factor de seguridad
Valor mínimo	3.883e-004
Valor máximo	1.085e-001

En la Figura 118 y Tabla 46 se muestra el análisis estático de tensión nodal en el dedo del efector final, y en la Figura 119 y Tabla 47 se muestra el análisis del factor de seguridad existiendo un máximo de $4.874e+005$ en los límites del dedo.

Análisis estático en el efector final

En la Figura 120 y Tabla 48 se muestra el análisis estático de desplazamiento y se puede observar que el valor máximo de desplazamiento es de $1.221e-001$ mm, lo cual es despreciable para la aplicación de la actual investigación.

**Figura 120.** Análisis estático URES (desplazamiento estático) en el efector final**Tabla 48.****Valores máximos y mínimos del estudio URES en el efector final**

Estudio	URES (desplazamiento estático)
Valor mínimo	1.153e-004
Valor máximo	1.221e-001

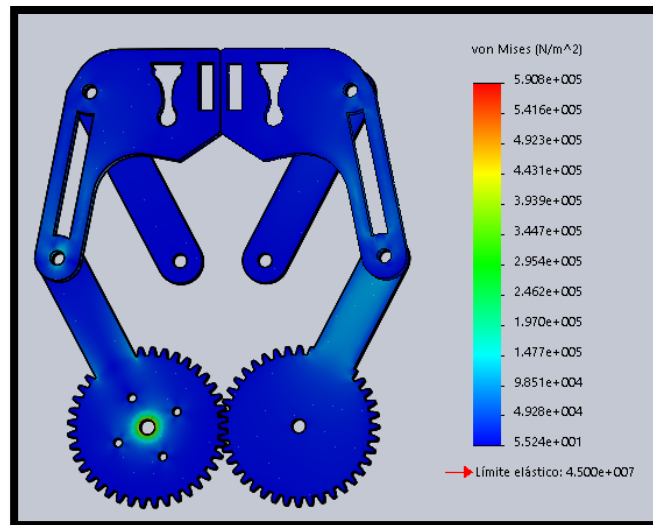


Figura 121. Análisis estático de tensión nodal en el efector final

Tabla 49.

Análisis estático nodal de tensiones en el efector final

Estudio	Análisis estático nodal de tensiones Von Mises
Valor mínimo	5.524e+001
Valor máximo	5.908e+005

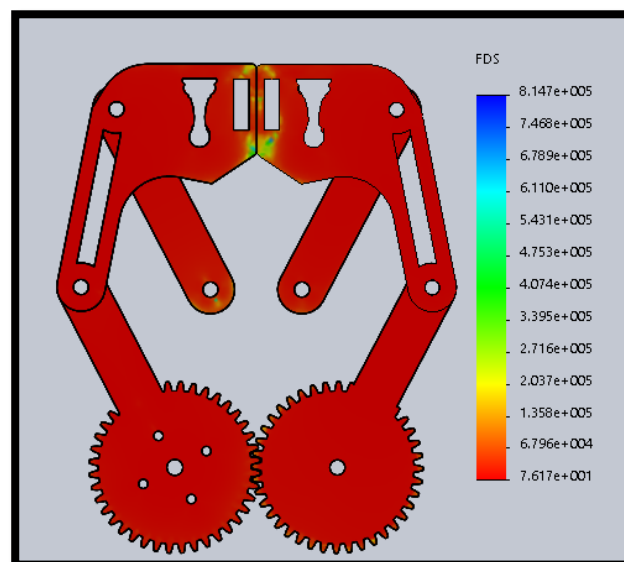


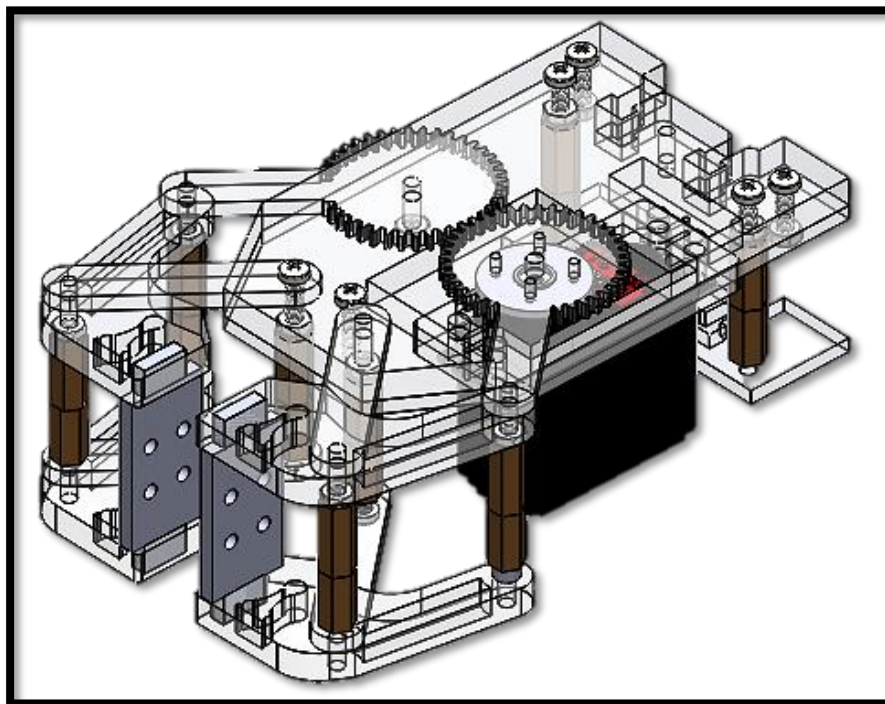
Figura 122. Análisis del factor de seguridad del dedo del efector final

Tabla 50.**Análisis del factor de seguridad en el dedo del efector final**

Estudio	Análisis del factor de seguridad
Valor mínimo	3.883e-004
Valor máximo	1.085e-001

En la Figura 121 y Tabla 49 se muestra el análisis estático de tensión nodal en el efector final y se observa que la mayor tensión está presente en la articulación donde va acoplado el servomotor con un valor de $3.447e+005 \text{ N/m}^2$. En la Figura 122 y Tabla 50 se muestra el análisis del factor de seguridad en el efector final y se observa que el factor máximo se encuentra presente en los límites de los dedos con un valor de $4.874e+005$ siendo mucho mayor a 1. La carga aplicada fue de 40 gramos con gravedad de 9.8 m/s^2 , se utilizó 40 gramos para poner a prueba el diseño, ya que el verdadero valor al que va a ser sometido es de alrededor de 20 gramos en promedio dependiendo la pieza de ajedrez.

En la Figura 123 se muestra el ensamble del efector final antes del diseño de los acoples.

**Figura 123.** Ensamble del efector final

Diseño de acoples para el agarre de las piezas de ajedrez

Para el diseño de la geometría de los acoples se tomó en cuenta el movimiento paralelo del efector final y la geometría de cada pieza. Se diseñó un anillo alrededor de cada pieza, a la misma altura para que exista estabilidad.

Método de los contactos

Antes de empezar con el diseño de los acoples fue necesario investigar el coeficiente de fricción aproximado del plástico ABS (acoples del efector final) con el plástico ABS (piezas de ajedrez), el cual se muestra en la Tabla 51.


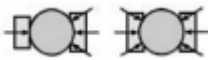
Tabla 51.
Coefficiente de fricción entre plásticos ABS

Superficies en contacto	Coefficiente de fricción
ABS con ABS	0.10 – 0.20

El diseño de los acoples es fundamental para una correcta aprehensión, debido a que son los responsables de la distribución de la fuerza de agarre. El movimiento que tiene un objeto en tres dimensiones se separa en grados de libertad, que corresponden a rotación y traslación alrededor de los tres ejes rectangulares.

Por lo tanto el área de agarre del acople y la superficie de la pieza restringen de manera parcial o total su movimiento y se denomina superficie activa. (Reyes, 2011)

Tabla 52.
Características del diseño del acople del efector final

Características	Esquema
Restricción de grados de libertad (superficie de contacto)	
Multipuntos de contacto con dos acoples	

En la Tabla 52 se muestra las características del diseño e implementación del acople del efector final. En la Figura 124 se puede observar que el acople tiene dos superficies de contacto en el agarre de la pieza, tanto en la parte superior como inferior.

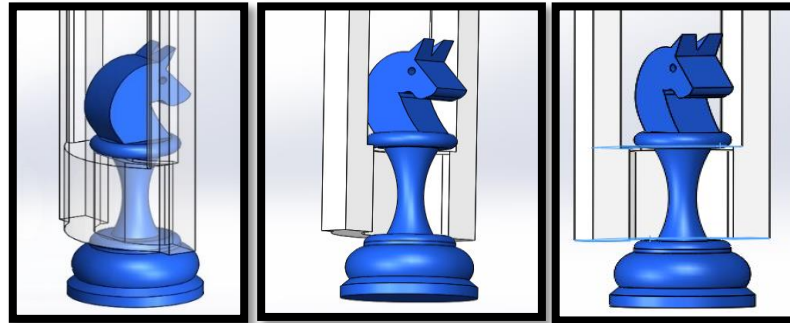


Figura 124. Superficies de contacto existentes en el área efectiva del efector final

Una vez diseñado y verificado el agarre de las piezas en CAD se procedió a implementar los dos acoples en el efector final. En la Figura 125 se puede observar el diseño final con las partes del efector que cuenta con 16 piezas de acrílico de diferente espesor con acoples impresos en 3D.

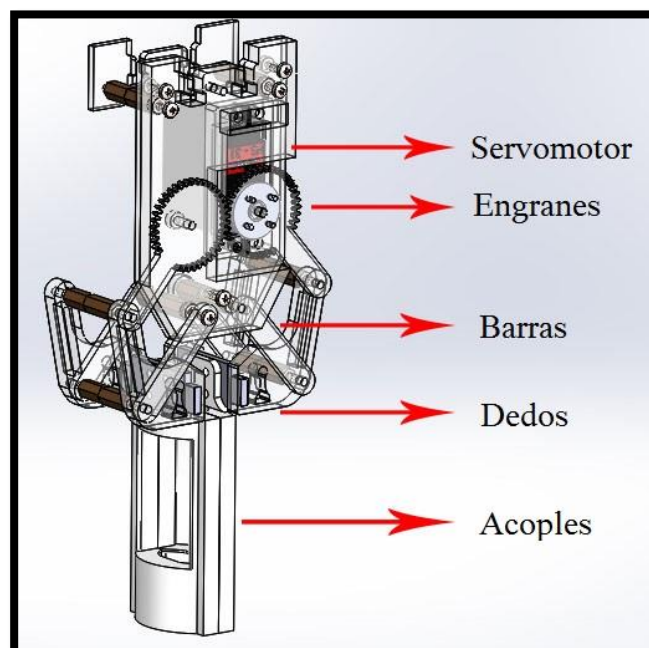


Figura 125. Ensamble del efector final con acoples

Calculo de las fuerzas ejercidas en el efector final

Se realizó el cálculo de las fuerzas ejercidas por el efector final en la situación de mínima apertura como se muestra en la Figura 126.

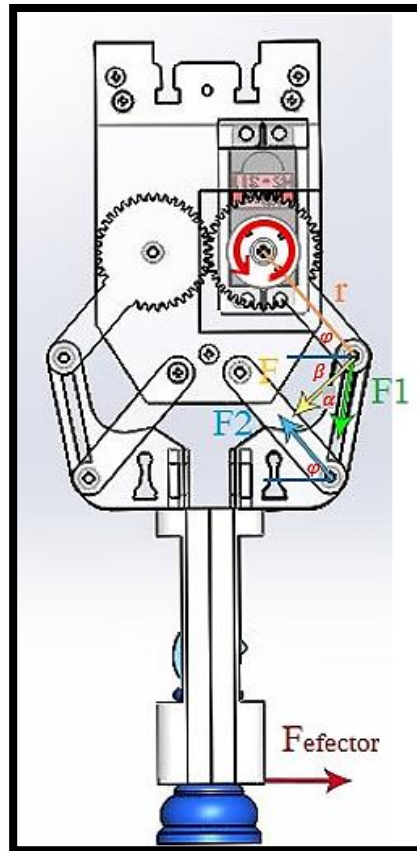


Figura 126. Fuerzas ejercidas en el efector final con mínima apertura.

La fuerza ejercida por el torque (F) debe ser perpendicular al radio de rotación (r), de la siguiente manera:

$$T = F \times r \quad (133)$$

Por lo tanto:

$$F = \frac{T}{r} \quad (134)$$

El torque del servomotor utilizado en las pinzas es de 490 N.mm y el radio de rotación es de 40 mm, reemplazando se tiene:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{490 \text{ N.mm}}{40 \text{ mm}} = 12.25 \text{ N}$$

Se calculó la fuerza F_1 que está en dirección de los dedos del efector y es el componente de la fuerza F con la fórmula:

$$F_1 = F \times \cos(\alpha) \quad (135)$$

El ángulo α presente en la geometría del efector final con la mínima apertura es de 19.3° .

$$F_1 = 12.25 \text{ N} \times \cos(19.3^\circ) = 11.56 \text{ N} \quad (136)$$

Con la fuerza F_1 calculada se procede a resolver la sumatoria de fuerzas en los ejes X y Y como se muestra a continuación:

$$\Sigma_{Fx} = 0$$

$$-F_1 \times \cos(\alpha + \beta) - F_2 \times \cos(\varphi) + F_{efector} = 0$$

Donde:

$$\beta = 50.4^\circ$$

$$\varphi = 39.6^\circ$$

Reemplazando se tiene:

$$F_{efector} = 11.5616 \times \cos(69.7) + F_2 \times \cos(39.6)$$

Para la sumatoria de fuerzas en el eje Y se tiene:

$$\Sigma_{Fy} = 0$$

$$F_1 \times \text{sen}(\beta) - F_2 \times \text{sen}(\varphi) = 0$$

Por lo tanto:

$$F_2 = \frac{F_1 \times \text{sen}(\beta)}{\text{sen}(\varphi)} = \frac{11.5616 \times \text{sen}(50.4)}{\text{sen}(39.6)} = 13.97 \text{ N}$$

Reemplazando las ecuaciones se tiene:

$$F_{efector} = 14.7752 \text{ N}$$

Con las premisas presentadas se demuestra que el diseño planteado cumple con las características que necesita la aplicación.

Subsistema 3. Piezas de ajedrez

Para la elaboración de las piezas de ajedrez se siguió recomendaciones y normas de la Federación Internacional de Ajedrez (Federation Internationale Echees, 2016). Los reglamentos actuales de la FIDE especifican que el tablero debe componerse de 64 casillas del mismo tamaño, integrando una cuadrícula de 8 x 8, alternando casillas claras y oscuras. También se especifica que la esquina del tablero a la derecha de cada jugador sea clara. Se debe tener dieciséis piezas de color claro y dieciséis de color oscuro, las mismas que deben estar constituidas de la siguiente manera:

- Un rey blanco y un rey negro
- Una reina blanca y una reina negra
- Dos torres blancas y dos torres negras
- Dos alfiles blancos y dos alfiles negros
- Dos caballos blancos y dos caballos negros
- Ocho peones blancos y ocho peones negros

La posición inicial de las piezas de ajedrez se debe distribuir de la siguiente manera (Figura 127):



Figura 127. Posición inicial de las piezas en el tablero.

Fuente: (Federation Internationale Echees, 2016).

Teniendo las premisas citadas, es necesario profundizar las recomendaciones en cuanto al criterio de diseño impuesto por la FIDE sobre el tablero y el tamaño de las piezas. No se tiene una norma específica para el ajuste del tamaño de las piezas en el tablero pero sí recomendaciones para los diseñadores.

Diseño de las piezas de ajedrez en base a normas y recomendaciones de la FIDE

En la FIDE se resalta la preferencia personal para el diseño y se recomienda considerar tres parámetros los cuales son: el diámetro de la base del rey, el tamaño de las casillas del tablero y el tamaño total del tablero de ajedrez. Se recomienda que la base de las piezas deben encajar en cada casilla de forma agradable y proporcionada; la base del rey no debe ser superior al 75% del diámetro de la casilla.

Las piezas de ajedrez se elaboraron con la técnica de impresión 3D en material ABS; el diseño se basó en las recomendaciones de la FIDE donde la base del rey es de 30 *mm* siendo el 44.1% del tamaño de la casilla. El diámetro citado permite evitar colisiones con las demás piezas en el momento del posicionamiento.

En cuanto al tamaño, se recomienda diseñar primero el rey y luego las demás piezas; ya que de este dependen las proporciones. Dentro de las reglas del ajedrez las piezas Staunton se usan de manera normativa para las competiciones, además de ser el modelo estándar de diseño para las piezas de ajedrez siguiendo una clasificación comercial. Para la aplicación de la presente investigación se usó la clasificación denominada Staunton 5 en el cual la altura del rey varía entre los rangos de 90 a 110 *mm*. Se debe resaltar que el estilo Staunton se basa solo en la altura del rey sin tomar en cuenta atributos como el color, el diámetro de

la base o el material; además se debe considerar que aplica como norma solo en competencias, pero para diseño es solo un indicativo.

Como otro criterio de diseño se tomó en cuenta las normativas del ajedrez las cuales especifican que para campeonatos, clubes de ajedrez y partidas casuales; la altura del rey debe variar entre 8,5 *cm* hasta 10 *cm* (Figura 128). Con las premisas citadas y diferentes criterios de diseño se optó por construir el rey con una altura de 100 *mm*, adaptándose perfectamente a las necesidades requeridas.

El resto de medidas, detalles y tolerancias de construcción de las piezas de ajedrez se encuentran en el anexo 1.

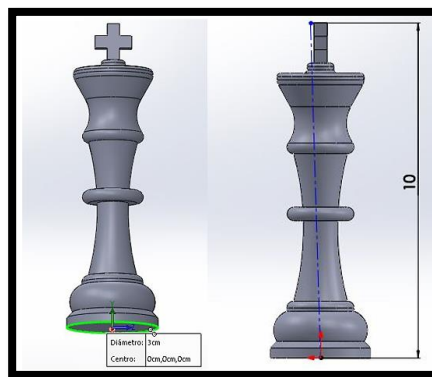


Figura 128. Especificaciones de diseño del rey.
Fuente: Propia.

3.4. Módulo 2: Sistema de control del sistema

Subsistema 1. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema está constituida por los siguientes módulos: software de aplicación con interfaz gráfica proyectada, módulo de visión artificial, módulo de control, controlador de actuadores y sensores, y el robot.

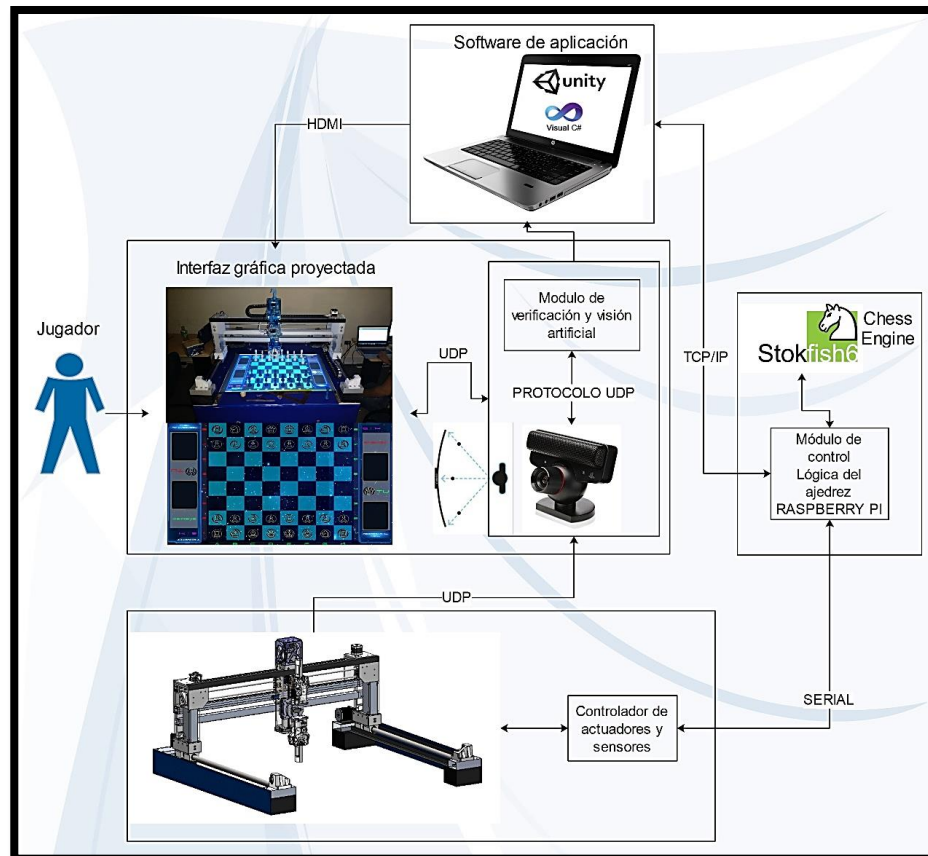


Figura 129. Módulos del sistema con sus respectivos protocolos de comunicación.

Como se puede ver en la Figura 129, el sistema abarca varios módulos, los cuales se encargan de procesos específicos dentro del sistema. Para describir el algoritmo del sistema se utilizará un diagrama de flujo, el cual se muestra en la Figura 130.

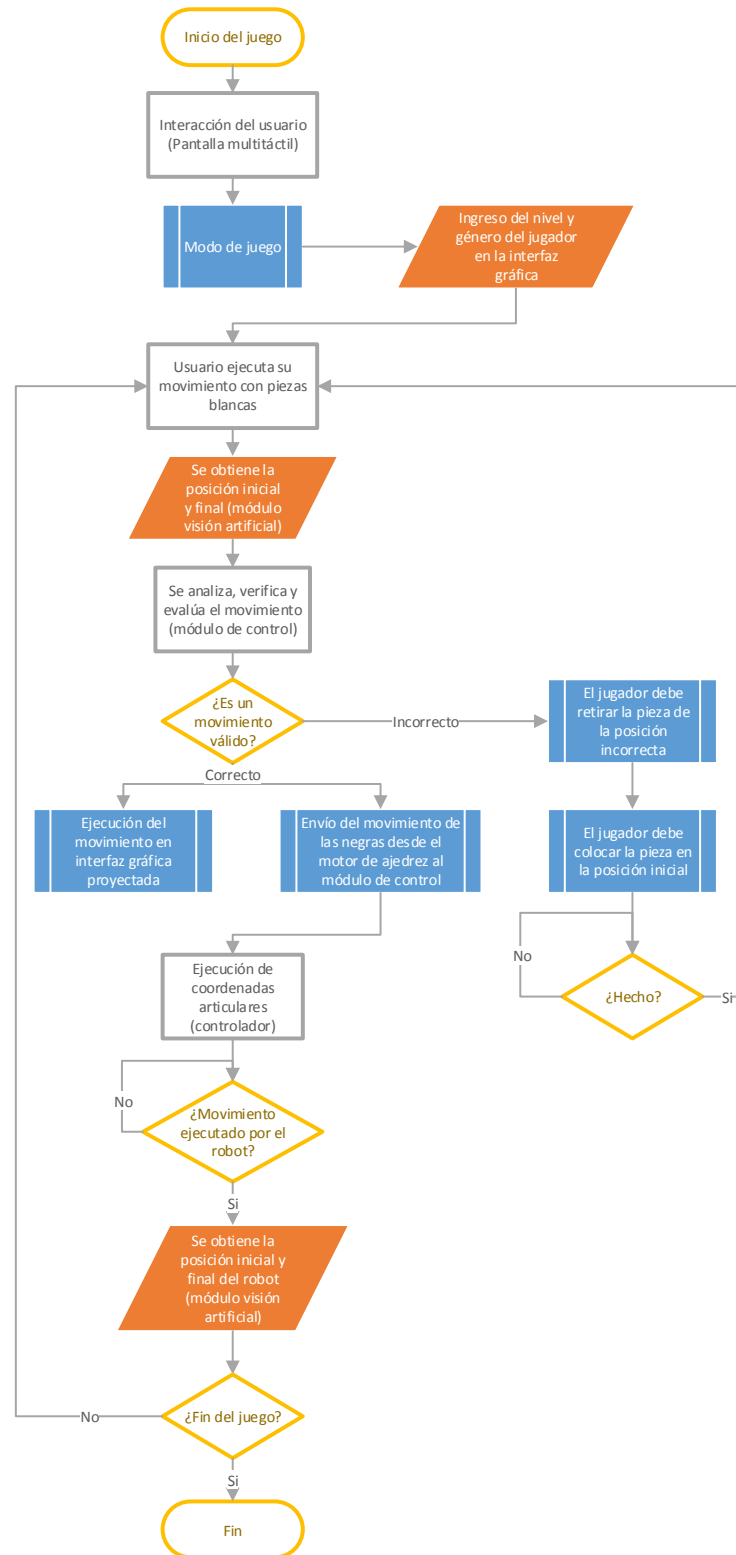


Figura 130. Diagrama de flujo del sistema

A continuación se detallará de manera general cada módulo:

- **Módulo del software de aplicación:** Para implementar el software de aplicación, se utilizó el lenguaje de programación C#. El presente módulo recibe los comandos asociados al movimiento, el cual es capturado por el módulo de visión artificial. Luego de transformar el movimiento hecho por el jugador en notación algebraica, se lo envía al módulo de control para evaluar si el movimiento ejecutado es válido. Dentro de este módulo se tiene la interfaz gráfica, la cual brinda un juego intuitivo e interactivo para el jugador; en base al método de proyección se presenta como un tablero físico con detalles futurísticos. Aquí es donde el jugador levanta y coloca las piezas de ajedrez.
- **Módulo de visión artificial:** En este módulo se captura el movimiento de cada pieza, especificando la posición inicial y la posición final. Se realiza un seguimiento en cada jugada tanto del usuario como del robot. Para la implementación del módulo se utilizó una cámara de PlayStation 3.
- **Módulo de control:** El módulo de control actúa como el cerebro del sistema, contiene el motor de ajedrez; aquí se analiza, valida y evalúa las jugadas del usuario. Además se envían los comandos para la ejecución de las jugadas de las piezas negras por medio del robot cartesiano; es decir el movimiento calculado por el sistema después de haber solicitado el análisis del motor de ajedrez y evaluado las jugadas del usuario. Se debe resaltar que para implementar el módulo, se utilizó la computadora de placa reducida Raspberry Pi B+ y se incorporó el motor de ajedrez llamado Stockfish. En cuanto al software de control se utilizó Python 3.0, el cual es un lenguaje de programación que se instaló en el sistema operativo de software libre Raspbian, el mismo que es una distribución de GNU/Linux basado en Debian 7.0 exclusivo para Raspberry Pi.
- **Controlador de actuadores y sensores:** El presente controlador se encarga de calcular los parámetros del robot para el movimiento, es decir la cinemática directa. Recibe la información de los sensores y ejecuta el movimiento de los actuadores, los

cuales serán presentados a detalle en el módulo de electrónica. Para la implementación se utilizó la tarjeta electrónica Arduino.

- **Robot:** El robot es cartesiano y está constituido con 3 grados de libertad. Está compuesto con tres motores y tres servomotores que se activan de acuerdo a las coordenadas articulares enviadas por el controlador.

Subsistema 2. Topología de redes

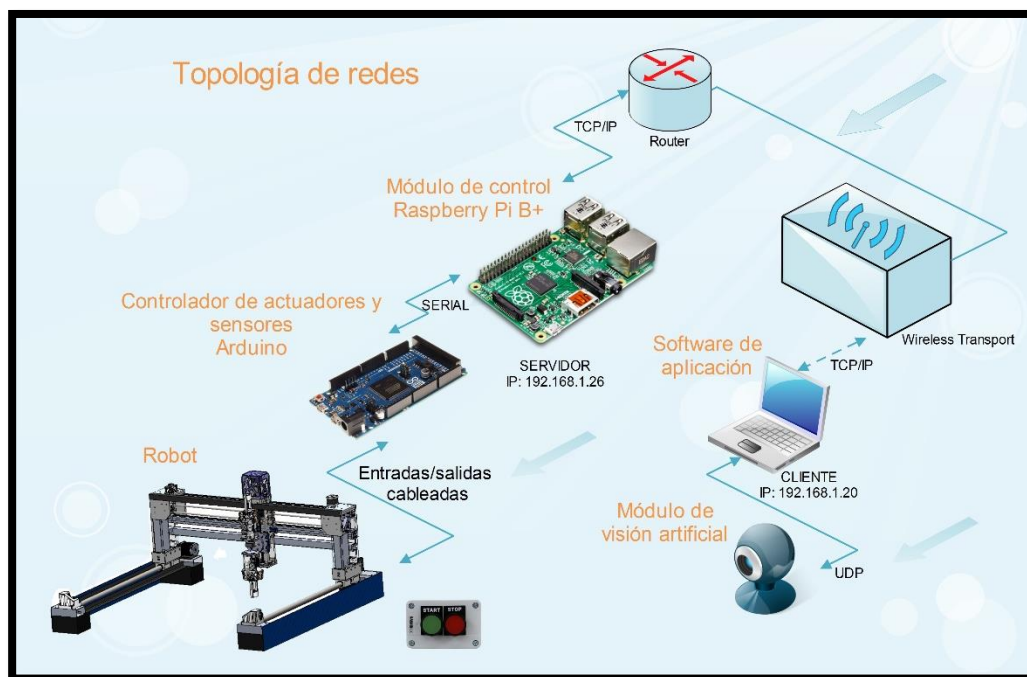


Figura 131. Topología de redes.

La Figura 131 muestra la topología de red utilizado en la presente investigación. A continuación, se detallan los protocolos de comunicación establecidos entre los siguientes módulos:

- **Módulo de visión artificial – Módulo del software de aplicación:** La comunicación de la cámara con el software de aplicación usa el protocolo UDP, el cual se basa en el intercambio de datagramas sin establecer conexión ni otorgar garantías en la entrega de datos; proporciona un nivel de transporte no confiable debido a que no solicita permisos, ni realiza seguimientos de la información. Es altamente usado en aplicaciones de transmisión de audio y video a través de una red.

Se encuentra debidamente documentada en la RFC 768 de la IETF (The Internet Engineering Task Force, 2006).

- **Módulo del software de aplicación – Módulo de control:** Para la comunicación entre el software de aplicación y el módulo de control se optó por utilizar el protocolo TCP/IP, debido a que brinda un transporte confiable de flujo de bits y garantiza el envío de grandes cantidades de información sin pérdida de datos. El protocolo está documentado en la RFC 793 de la IETF (The Internet Engineering Task Force, 2006). La conexión establecida es de cliente – servidor, optando por seleccionar la tarjeta embebida Raspberry Pi como servidor y al software de aplicación como cliente. El servidor en todo momento espera la conexión de uno o más clientes, mientras que el cliente especifica un solo servidor al cual se va a conectar. Además, se implementó una conexión asíncrona en la que los datos se envían en intervalos de tiempo irregulares, utilizando bits de inicio y de finalización; con esto se consigue una conexión rápida, sin necesidad de esperar la confirmación de llegada por parte del servidor. Cabe destacar que la programación utilizada en la Raspberry Pi se implementó en Python, mientras que la programación utilizada para el software de aplicación se la realizó en C#.
- **Módulo de control – Controlador de actuadores y sensores:** Con respecto a la comunicación entre el módulo de control (Raspberry Pi B+) y el controlador de los actuadores y sensores (Arduino) se utilizó el protocolo serial, el cual envía y recibe bytes de información; un bit a la vez. Se utilizó una velocidad de transmisión de 9600 baudios. El tiempo de respuesta de la placa Arduino es de 16 MHz.

Subsistema 3. Arquitectura de software

La arquitectura de software del robot contiene los módulos presentados, añadiendo capas en cada uno de ellos, los cuales están constituidos con software de desarrollo de alto y bajo nivel. La Figura 132 muestra un esquema detallando la arquitectura.



Figura 132. Arquitectura de software

Control del robot

Esta sección está enfocada en los algoritmos que se usaron para controlar el robot cartesiano.

3.4.1.1. Desarrollo de software en el módulo de control

El algoritmo utilizado para el desarrollo del software en el módulo de control, se representó mediante un diagrama de flujo (Figura 133).

Motor de ajedrez

Se implementó un motor de ajedrez (inteligencia artificial) existente, de software libre llamado Stockfish (Yang, 2017), el cual es uno de los más potentes del mundo y puede ser integrado con los algoritmos de alto nivel por medio del protocolo *Universal Chess Interface* (UCI). Cuando se inicia una nueva partida se solicita al jugador que seleccione el nivel de dificultad, esto representa la profundidad de búsqueda y predicción de jugadas; es decir el número de movimientos que el motor busca para encontrar el mejor movimiento.

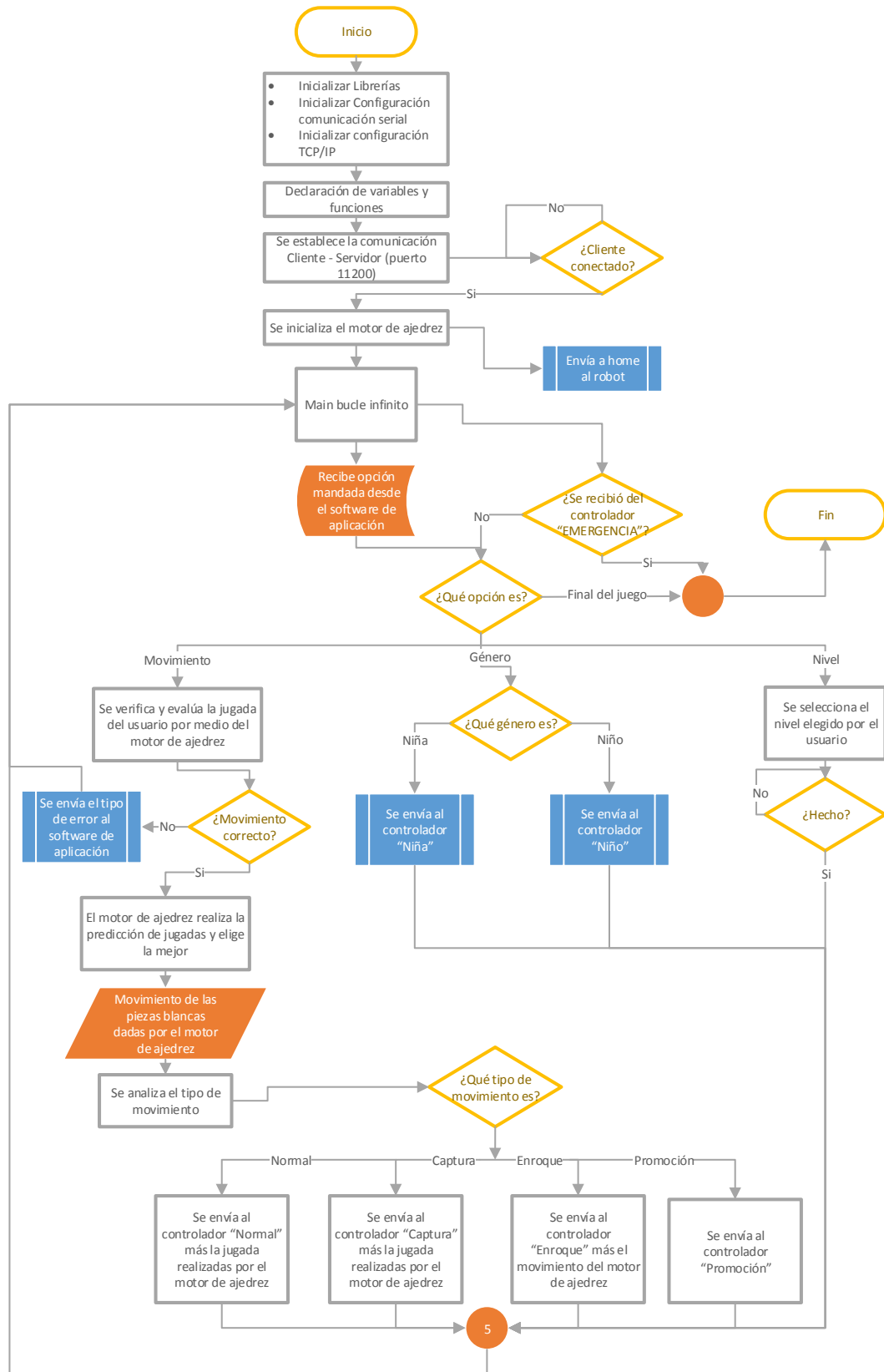


Figura 133. Diagrama de flujo del software desarrollado en el módulo de control

Procesamiento de la jugada

El algoritmo utilizado para el procesamiento de jugadas permite verificar los movimientos individuales, comprobando si son legales; si el jugador realiza un movimiento ilegal, el programa envía un comando al software de aplicación para que lo realice de nuevo, siempre y cuando retire la pieza de la posición errónea y la sitúe nuevamente en la posición inicial. Además, es el responsable de invocar al motor de ajedrez y analizar el tipo de movimiento que realizó (normal, captura, enroque, promoción). Aquí se inicia la comunicación cliente-servidor con la aplicación y mediante serial se envía comandos de alto nivel al controlador del robot. El algoritmo se implementó en el lenguaje de programación Python 2.7.

3.4.1.2.Desarrollo de software en el controlador del robot

Traductor de comandos

La capa de traductor de comandos está situada por encima de la capa de cinemática (Figura 132), es la responsable de transformar secuencias de comandos de alto nivel (“Pieza movida”, “Promoción”, “Emergencia”, “A8B2”) en comandos de bajo nivel, los cuales se utilizan en el posicionamiento del robot mediante el accionamiento de motores y servos.

Cinemática del robot

En esta capa se realizan las operaciones necesarias para el posicionamiento del robot en cada casilla, se realiza la conversión de pasos a milímetros y se aplica las ecuaciones de movimiento.

Accionamiento de jugada

Luego de recibir la jugada por medio del módulo de control y de convertir a comandos de bajo nivel, se realiza la ejecución de los algoritmos establecidos para cada tipo de jugada, manipulando los motores para cada eje y los servos para el efector final.

En la Figura 134 se muestra el diagrama de flujo del software desarrollado en el controlador del robot, el mismo que se implementó en el lenguaje de programación de software libre IDE Arduino 1.8.2.

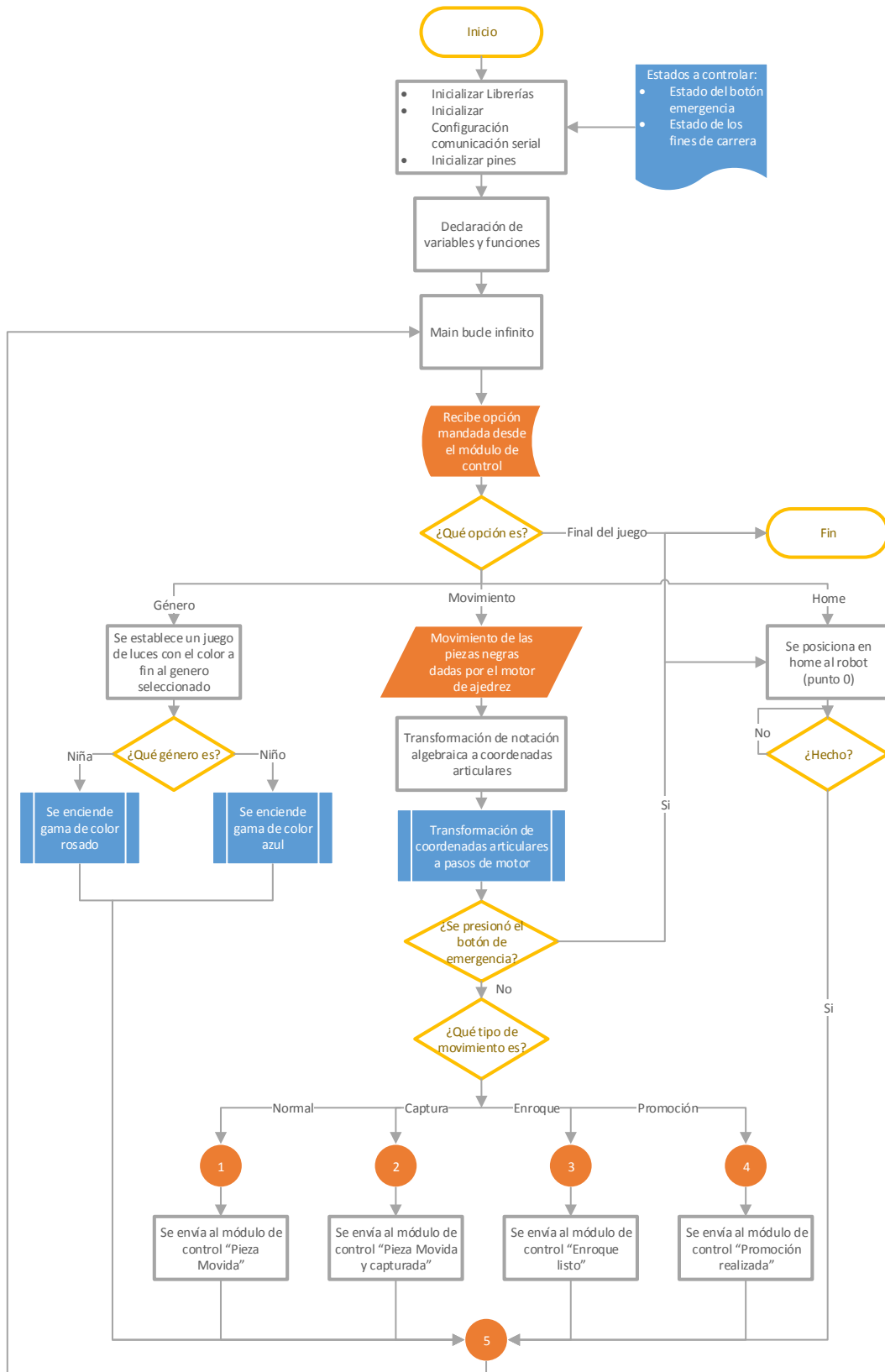


Figura 134. Diagrama de flujo del software desarrollado en el controlador del robot

Como se mencionó en la presente investigación, se establecieron cuatro tipos de movimientos, los cuales se detallan a continuación con la representación de cada algoritmo en diagramas de flujo:

- **Movimiento Normal:** Se estableció como movimiento normal, cuando el robot ejecuta una jugada que no implica la captura de otra pieza; es decir se realiza el traslado de una pieza a una casilla vacía. El algoritmo utilizado se presenta en el diagrama de la Figura 135.
- **Movimiento con captura:** Se estableció como movimiento con captura, cuando el robot ejecuta una jugada que implica la captura de otra pieza; se utiliza la segunda pinza para la captura de la pieza derrotada y se la deposita en una caja con coordenadas específicas presentes en el tablero. El algoritmo utilizado se presenta en el diagrama de la Figura 136.
- **Enroque:** Se verifica el tipo de enroque que se va a ejecutar, puede ser enroque corto (flanco del rey) o enroque largo (flanco de la reina); se utiliza una pinza para la ejecución del movimiento. El algoritmo utilizado se presenta en el diagrama de la Figura 137.
- **Promoción:** Cuando el robot posiciona el peón en la fila 1 u 8 del tablero se ejecuta la promoción. Esto consiste en cambiar el peón por una pieza de mayor rango, en general se utiliza a la reina para el intercambio. La disposición física del espacio previsto para la pieza de promoción se encuentra al lado izquierdo del robot, con coordenadas específicas previamente programadas. El algoritmo utilizado se presenta en el diagrama de la Figura 138.

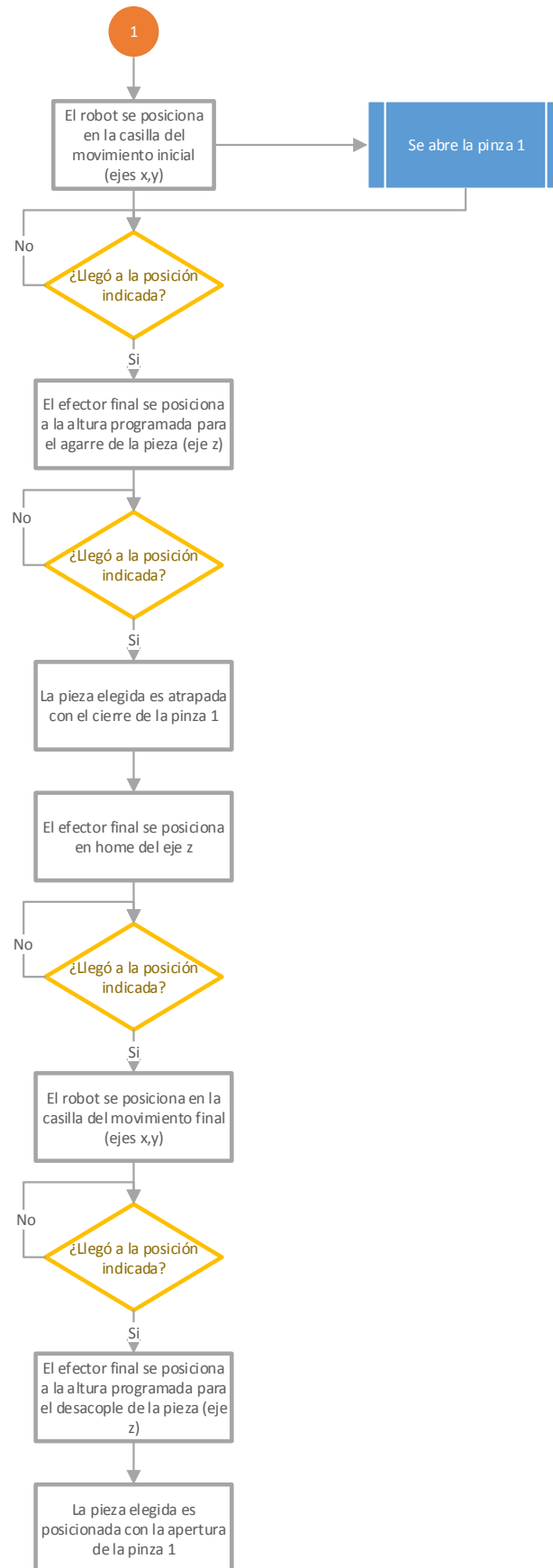


Figura 135. Diagrama de flujo del tipo "movimiento normal"

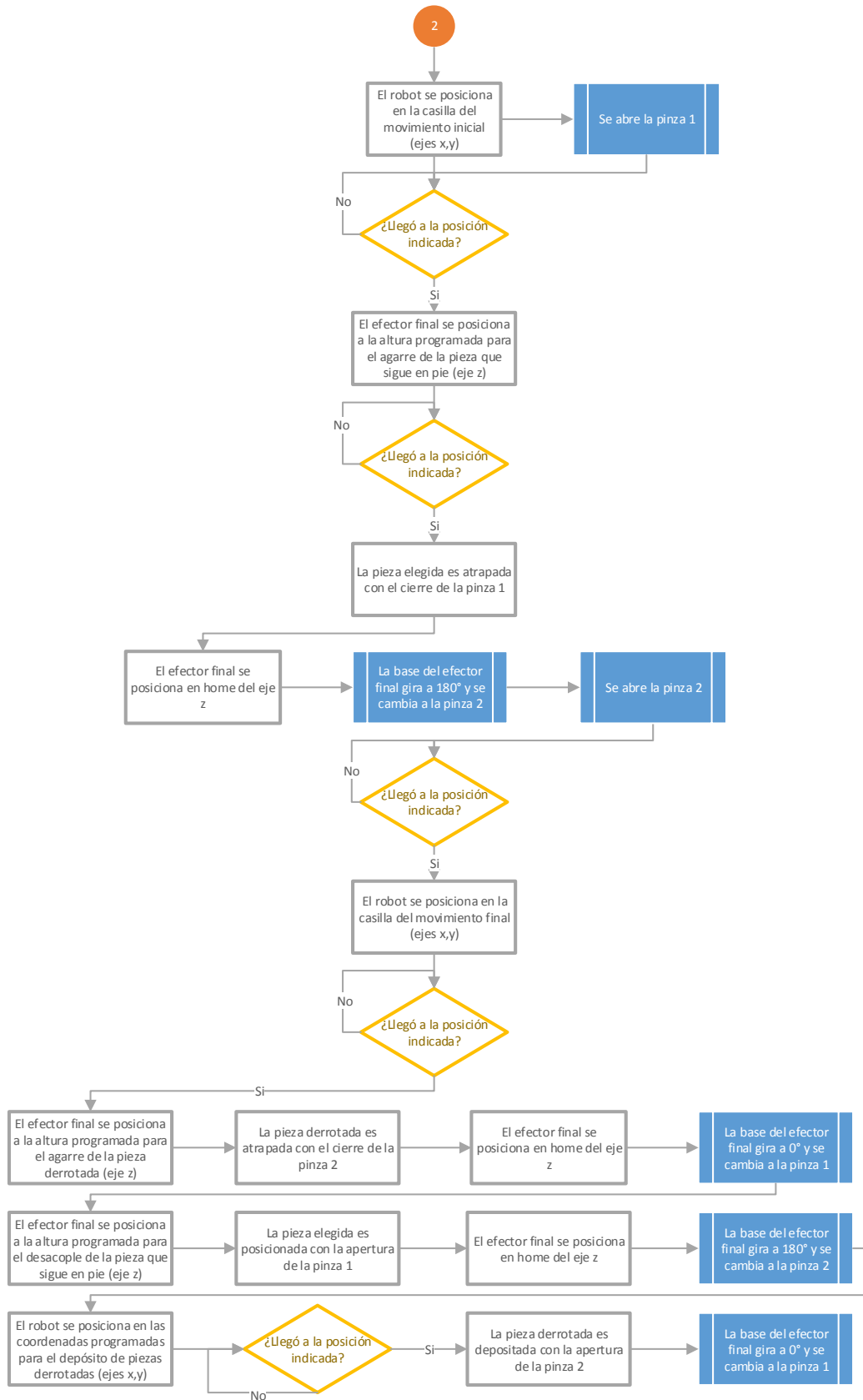


Figura 136. Diagrama de flujo del tipo "movimiento con captura"

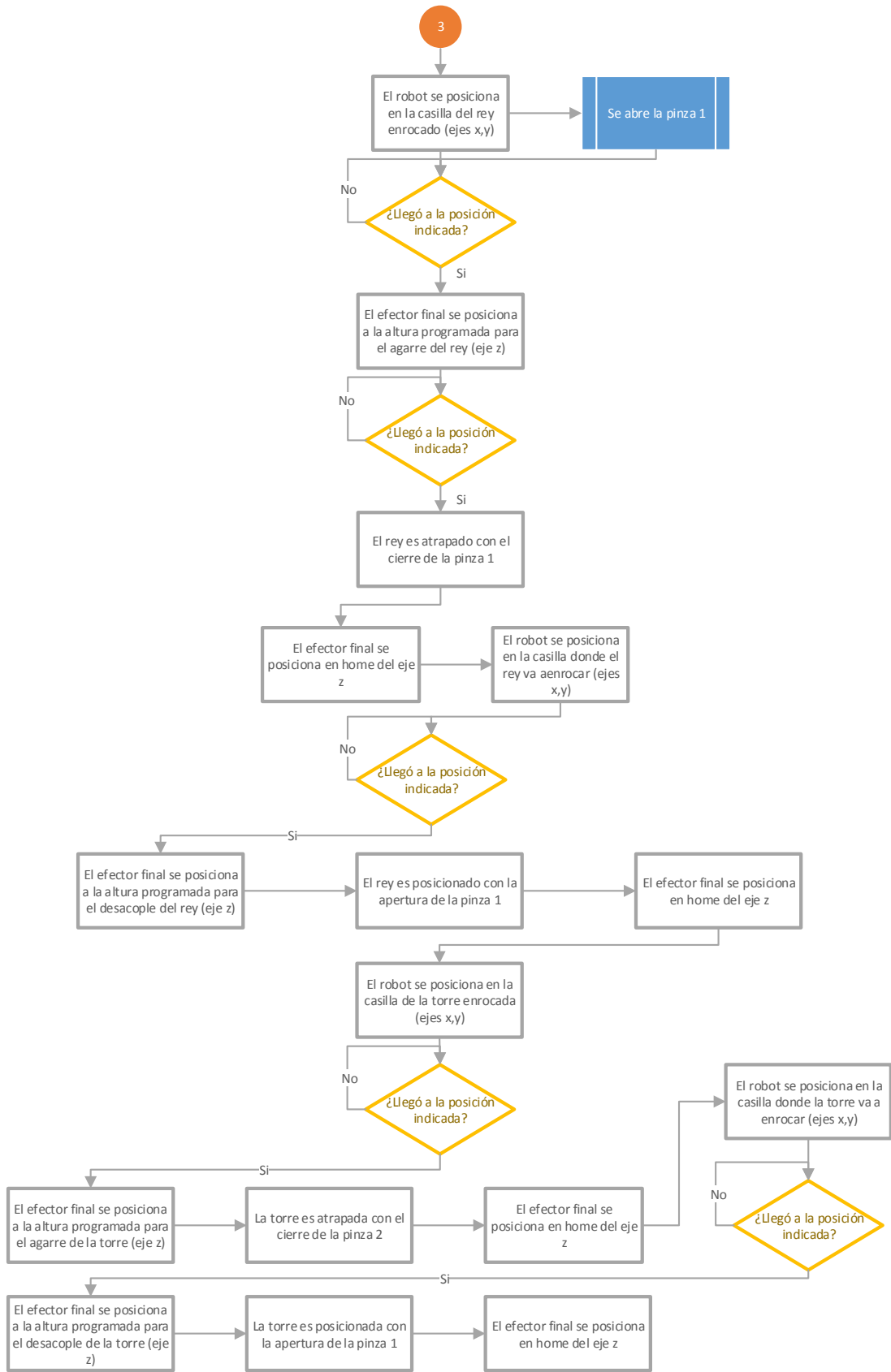


Figura 137. Diagrama de flujo del movimiento "Enroque"

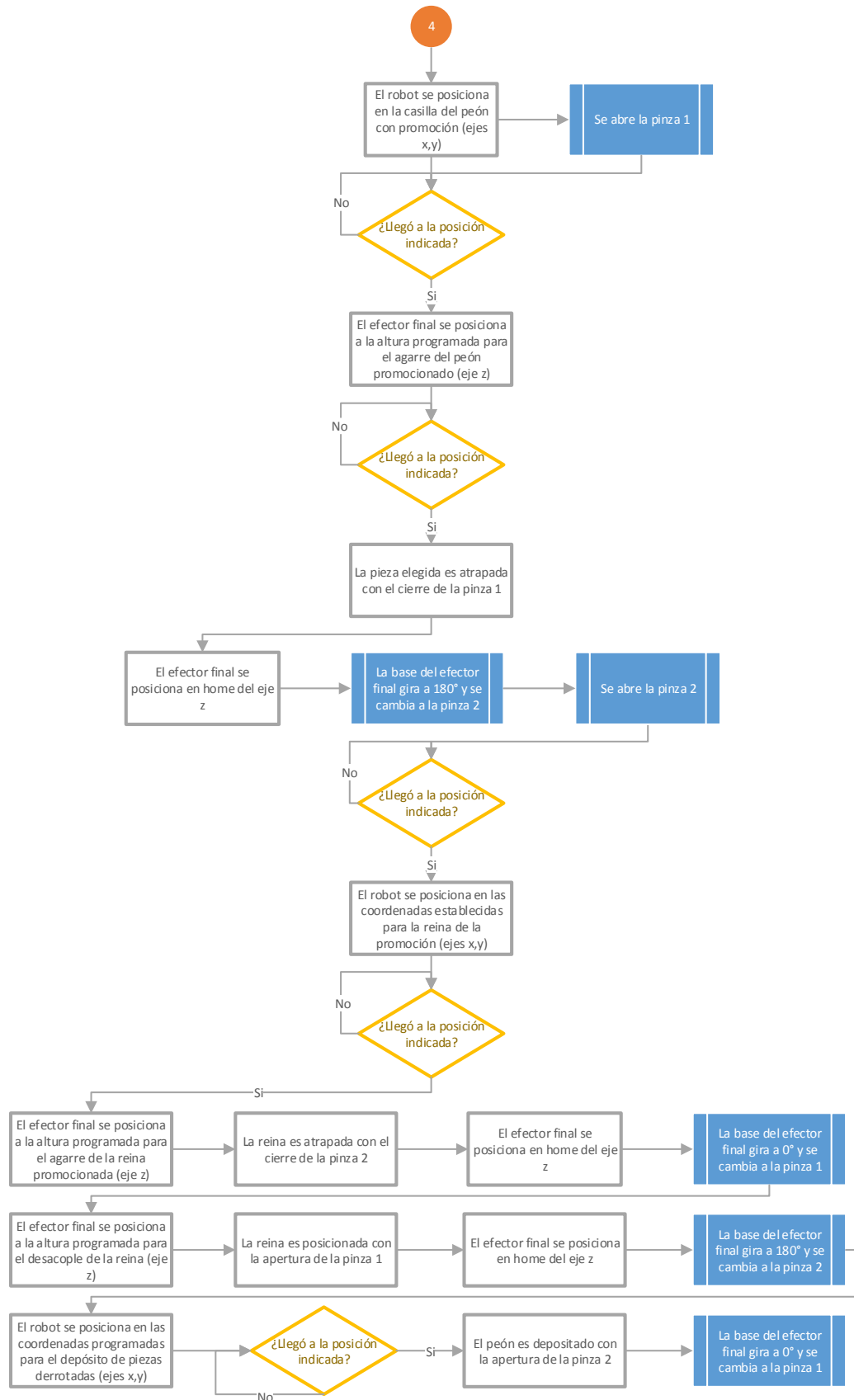


Figura 138. Diagrama de flujo del movimiento "promoción"

3.5. Módulo 3: Sistema de Retroproyección

En este módulo se estudian y analizan los métodos de sensorización mediante gestos táctiles y visión artificial, así como su factibilidad.

Alternativas de diseño

Para saber cuál método de detección de objetos es el más apropiado, se realizó una lista de ventajas y desventajas. Entre los mejores dispositivos estudiados que satisfacen los requerimientos del proyecto están: toque infrarrojo, toque resistivo, pantallas de capacitancia superficial, pantallas de capacitancia proyectada y toque SAW (*Surface Acoustic Wave*, Ondas acústicas de superficie).

En la Figura 139, Figura 140, Figura 141, Figura 142 y Figura 143, se especifica la distribución de cada método de detección, y en la Tabla 53, Tabla 54, Tabla 55, Tabla 56 y Tabla 57 se especifican sus ventajas y desventajas.

Toque Infrarrojo

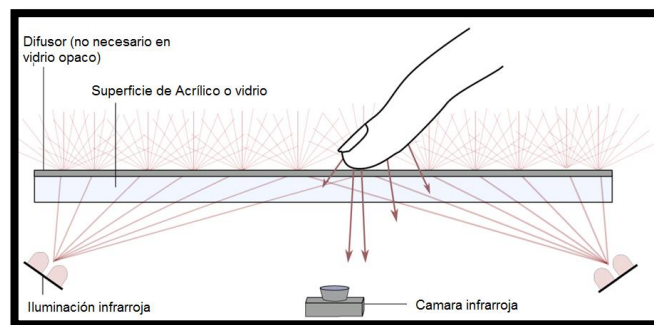


Figura 139. Toque infrarrojo con tecnología DI.

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Tabla 53.
Ventajas y Desventajas del método infrarrojo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La más alta claridad en la imagen y transmisión de luz de todas las tecnologías estudiadas. • Puede alcanzar grandes tamaños • Reconocimiento de gestos suaves. • Gran cantidad de gestos táctiles y objetos 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de calibración • Sensible a la luz ambiente • Sensible a cualquier objeto accidental • Puede ocurrir oclusión dependiendo del método

Toque Resistivo (5-Wire)

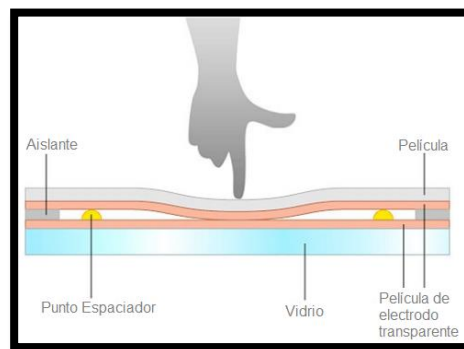


Figura 140. Toque resistivo 5-Wire.
Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Tabla 54.
Ventajas y desventajas del método resistivo 5-Wire.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Se activa con cualquier objeto (stylus, mano, dedos, etc.) • Sensación táctil • Bajo costo en pantallas pequeñas • Bajo consumo de energía • Resistente a contaminantes y líquidos 	<ul style="list-style-type: none"> • La imagen más opaca y poco clara de las tecnologías estudiadas. • La película exterior de poliéster es muy vulnerable a los rayones y roturas. • Poco aplicable a pantallas de áreas grandes.

Pantallas de capacitancia superficial

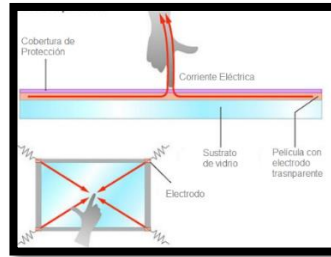


Figura 141. Toque capacitivo superficial.
Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Tabla 55.

Ventajas y desventajas del método capacitivo superficial.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mejor claridad de imagen que la pantalla resistiva • Pantalla durable • Buena resistencia a rayones y cortes • Buena resistencia a líquidos • Hasta 10 gestos táctiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo detecta el dedo desnudo o un stylus con carga para ser detectado por la pantalla • Sensible a interferencias electromagnéticas o de radiofrecuencia. • Pantallas no soportadas en gran dimensión

Pantallas de capacitancia proyectada

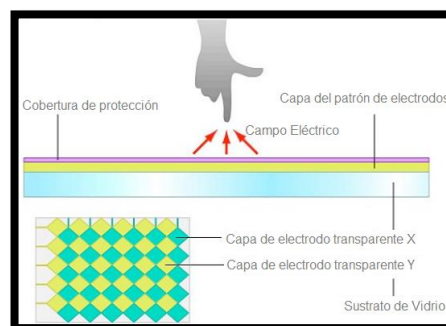
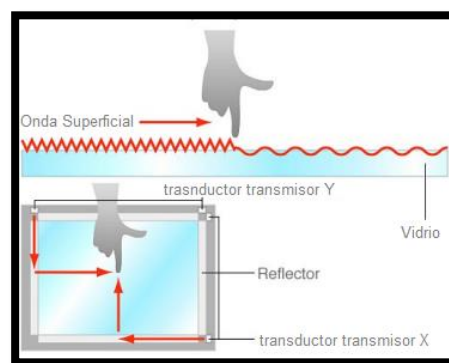


Figura 142. Toque capacitivo proyectado.
Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Tabla 56.***Ventajas y desventajas del método capacitivo proyectado.***

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Excelente claridad de imagen • Más resistencia que la pantalla capacitiva • Detectar con cierta distancia • Resistente a contaminantes o líquidos • Hasta 10 gestos táctiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a interferencias electromagnéticas o de radiofrecuencia. • Solo activado mediante dedos expuestos o guantes quirúrgicos delgados. • Sin aplicación en pantallas grandes.

Toque SAW (Surface Acoustic Wave, Ondas acústicas de superficie)**Figura 143.** Toque SAW de ondas acústicas de superficie.

Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).

Tabla 57.***Ventajas y desventajas del método SAW de ondas acústicas de superficie.***

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Calidad excelente de imagen. • Resistencia a rayones mejor que la capacitiva proyectada o la normal. • Vida del toque alta. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se activa con objetos duros como (esferos, tarjetas de créditos, uñas). • El agua puede provocar falsos disparos. • Calibración difícil

3.5.1.1. Selección y evaluación de alternativas para el tipo de toque

Para esta sección se aplica el método de ponderación de criterios. Nótese que esta matriz (Tabla 58) posee características generales, y es útil para evaluar y justificar el mejor método de visión artificial.

Tabla 58.

Resultados de los criterios para los métodos táctiles estudiados.

	Fac. de Construcción	Precisión Toque	Tamaño Pantalla	Calidad de Imagen	Menor Costo	Suma + 1	Ponder.
Toque Infrarrojo	0,65	0,65	0,92	0,55	0,7	4,47	0,3193
Toque Resistivo	0,32	0,65	0,4	0,17	0,45	2,99	0,2136
Toque Capacitivo	0,32	0,54	0,58	0,51	0,3	3,25	0,2321
Toque SAW	0,55	0,32	0,4	0,47	0,55	3,29	0,2350
					Suma	14	1

Como se observa en la Tabla 58, el toque infrarrojo tiene las siguientes ventajas sobre otros métodos táctiles:

- La facilidad de construcción no requiere demasiada tecnología ni herramienta especial para lograr la implementación del sistema.
- Es fácilmente aplicable para prototipos.
- Si bien la precisión del toque infrarrojo es menos fina que el toque resistivo, se compensa con su excelente claridad de imagen.
- Otra de las razones preponderantes de selección, es el tamaño de pantalla que logra alcanzar la tecnología infrarroja sobre todas las demás.
- El costo y la calidad de imagen superan por amplio margen a las demás.
- Aun cuando no se aprecia en esta tabla, la facilidad de calibración del toque infrarrojo, es un aspecto que se debe resaltar.
- Para las demás tecnologías excepto la infrarroja, se necesitan procesos de fabricación más avanzados.

3.5.1.2. Selección y evaluación del tipo de toque infrarrojo

Una vez seleccionado el mejor sistema de detección para la retroproyección, es seleccionar, de acuerdo a parámetros, el mejor método de detección infrarrojo. Para ello, se describen en el capítulo 2 en la Tabla 7 las ventajas y desventajas de los métodos de mapeo de gestos.

Es necesario, realizar una ponderación de criterios entre las tres tecnologías más importantes. Las cuales son FTIR (*Frustrated Internal Total Reflection*, Reflexión total interna frustrada), RDI (*Rear Diffused Illumination*, Iluminación difusa posterior) y LLP (*Laser Light Plane*, Plano de luz láser) que deben ajustarse a los siguientes parámetros:

- No depender de la presión (del gesto táctil u objeto) sobre la pantalla
- Poca o nula oclusión.
- Ser independiente de la luz visible.
- Menor Costo.
- Poca calibración.
- No necesite de capas táctiles difíciles de fabricar.
- Use difusores de luz fáciles de instalar.
- Que sea seguro para el usuario.
- Que tenga precisión y claridad en el toque.

Y con esto se realizan las respectivas tablas de ponderación de criterios.

Tabla 59.

Resultado de la ponderación entre criterios y métodos multitáctiles infrarrojos.

	Fac de Construcción	Claridad y Sin Oclusión	Pocos Materiales Especiales	Diversos Gestos	Menor Costo	Suma + 1	Ponderación
FTIR	0,54	0,64	0,49	0,55	0,62	3,84	0,2993
RDI	0,93	1	0,78	0,94	0,85	5,5	0,4287
LLP	0,39	0,74	0,42	0,55	0,39	3,49	0,2720
					Suma	12,83	1,0

Como resultado de la Tabla 59 se observa lo siguiente:

- El RDI (Rear DIffuse Illumination) es el método mejor aplicable, principalmente por su claridad de imagen en todos sus puntos.
- El RDI también presenta ausencia de oclusión aun cuando existan varios objetos en la pantalla táctil, y es óptimo para evitar errores en los 32 puntos táctiles.
- El RDI necesita de pocos materiales especiales para su pantalla y dispositivos más baratos pero de igual eficacia que los otros métodos.
- Los métodos de LLP y FTIR necesitan láseres o disposiciones complicadas de leds infrarrojos, en cambio en RDI solo es necesario luminarias comerciales infrarrojas para cámaras de seguridad colocadas estratégicamente.

Diseño final para el sistema de retroproyección

Con el análisis de la visión artificial infrarroja por el método de Iluminación Difusa Posterior, es posible entonces empezar el proceso de diseño en específico de los requerimientos para este proyecto.

3.5.1.3. Requerimientos para el diseño final del sistema de retroproyección

El siguiente cuadro (Tabla 60) muestra las necesidades de diseño para la visión artificial de este proyecto.

Tabla 60.

Requerimientos para el desarrollo del sistema de visión artificial.

No.	Requerimientos
1	Implementar una pantalla de ajedrez con las medidas oficiales de la FIDE
2	Totalmente táctil
3	Por lo menos 64 objetos detectables y 5 para toques adicionales
4	Interpretar fiduciales
5	Interactivo y llamativo
6	Intuitivo para ser manejado
7	Poca latencia
8	Difusores de rayos infrarrojos
9	Ser detectable por una cámara
10	Buena resolución de cámara
11	Manipulación de cada gesto táctil

Para desarrollar el sistema final, se lo dividirá en parte física (hardware) y sus algoritmos de control (software) considerando los requerimientos observados.

3.5.1.4. Subsistema 1: Parte física (Hardware) del sistema de visión artificial

Como se trata de una configuración RDI, se deben listar los componentes básicos que éste debe tener en su estructura. En la Figura 144 se muestran los componentes de esta tecnología aplicada en el actual proyecto.

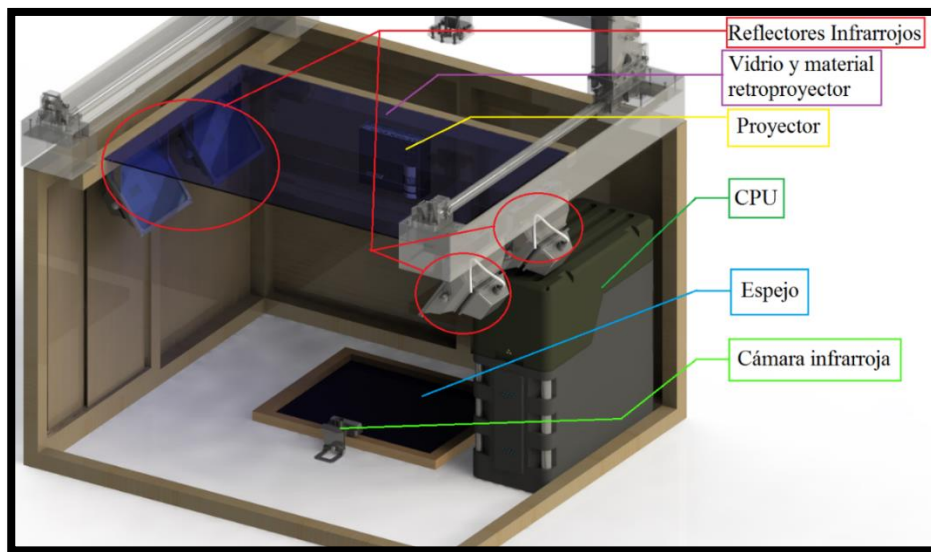


Figura 144. Componentes para la configuración RDI de este proyecto.

Fuente: Propia.

A continuación, se detalla el funcionamiento y configuración de cada componente:

Cámara Infrarroja

Es el elemento neural de la visión artificial, capta la información visual de la pantalla proporcionada por los reflectores infrarrojos.



Figura 145. PlayStation Eye Camera.
Fuente: (Sony Computer Entertainment, 2012).

Se tienen las siguientes características y especificaciones para la cámara PlayStation Eye (Figura 145) en la Tabla 61.

Tabla 61.
Especificaciones de la cámara PlayStation Eye Camera.

Parámetro	Especificación
Nombre	PlayStation Eye
Formato de Video	Descomprimido o JPEG, VGA @ 60 fps
Lente	2.1 F-stop, <1% distorsión, enfoque mejorado (25 cm a infinito a 75° FOV)
Resolución	640 x 480 pixeles
Interface	USB 2.0
Consumo	DC 5V, Max, 500 mA
Dimensión (Aprox)	84 x 67 x 57 mm
Cuadros por segundo	640 x 480 @ 60 frames/seg. 320 x 240 @ 120 frames/seg
Campo de visión	56° a 75° FOV con zoom
Peso	173 g
Tamaño de Pixel	6.0 μm x 6.0 μm
Tamaño del sensor	3.984 mm x 2.952 mm
Tamaño del Lente	1/4"

Fuente: (Sony Computer Entertainment, 2012).

La PlayStation Eye es una cámara que contiene dos sensores, los cuales son: CMOS de formato VGA, OV7720/OV7221 con alta sensibilidad para operar en lugares oscuros. Puede soportar QVGA. También tiene corrección de luz sombreada para mayor nitidez. Se

eligió la cámara citada porque presenta características óptimas para los requerimientos de la actual investigación en el control, el color, y nitidez (mejora de bordes).

La PlayStation Eye tiene la ventaja de ser modificable para convertirse en cámara infrarroja de buenas prestaciones. Cabe destacar en este punto, que la oferta de cámaras infrarrojas en el mercado es amplia, sin embargo, su costo es elevado

La cámara enfoca de manera óptima desde los 25 *cm* en adelante; lo cual supone una buena factibilidad para este proyecto. Además, posee un puerto USB que alimenta a la cámara directamente desde el CPU y permite la transferencia de datos.

Lente y distancia de enfoque

La selección del sitio donde debe posicionarse la cámara depende de la distancia desde el lente hasta la superficie táctil.

La pantalla del actual proyecto mide aproximadamente 38 *pulgadas*, es decir 77 *cm* × 60 *cm*. No se pretende enfocar toda la superficie debido a que el área efectiva de barrido de la cámara se encuentra bloqueada parcialmente por los iluminadores infrarrojos. Se realizó el cálculo para el área delimitada que se muestra en la Figura 146 para conseguir un mejor enfoque, acercamiento, y evitar los puntos ciegos que provocan los iluminadores.

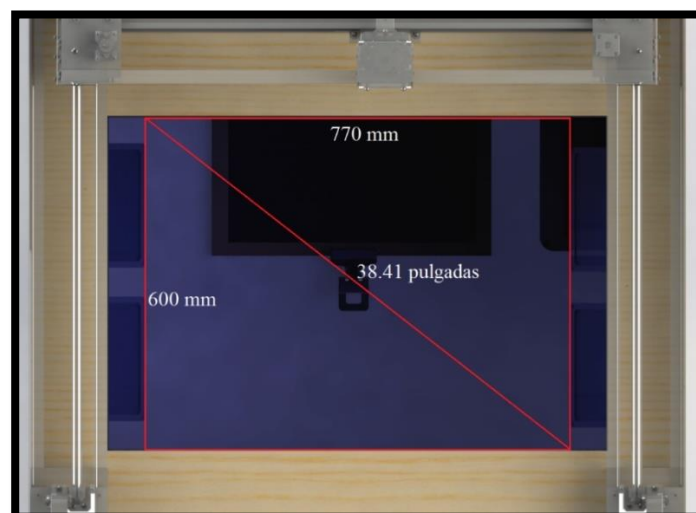


Figura 146. Tamaño de la pantalla efectiva. (Vista superior del proyecto, robot en transparencia).

Fuente: Propia.

Holzammer & Hahne, (2009) proponen una fórmula para el cálculo de la altura, en la cual debe posicionarse la cámara para cubrir efectivamente el tamaño citado de la pantalla; pantalla; ésta se observa en (137):

$$x = f \times \frac{\text{tamaño de la pantalla}}{\text{tamaño del sensor}} \quad (137)$$

De donde:

- $f = 3.4 \text{ mm}$ (aprox.), es la distancia focal entre el sensor y el lente. (No se provee la medida real por ser un dato protegido de la empresa).
- $\text{tamaño de la pantalla} = 770 \text{ mm}$, en la horizontal; y $\text{tamaño de la pantalla} = 600 \text{ mm}$, en la vertical.
- $\text{tamaño del sensor} = 3.984 \text{ mm}$, en la horizontal; y $\text{tamaño del sensor} = 2.952 \text{ mm}$, en la vertical.

Para el cálculo, se toman los datos del tamaño de la pantalla y el tamaño del sensor dependiendo de si es horizontal o vertical y se reemplazan en (137).

$$x = 3.4 \times \frac{600}{2.952} = \boxed{691.056 \text{ mm}}$$

$$y = 3.4 \times \frac{770}{3.984} = \boxed{657.1285 \text{ mm}}$$

Como se observa, la distancia vertical requiere de un mayor alejamiento, por lo que se la eligió para lograr un barrido en toda la pantalla. En este caso, la cámara logrará un enfoque superior en la horizontal mayor a los 770 mm originales, cumpliendo con los 600 mm de la vertical.

Adicionalmente, como no se conoce la distancia focal con exactitud, el manual para el campo de visión de la PlayStation Eye (Sony Computer Entertainment, 2012) provee una relación que depende del ángulo de la cámara.

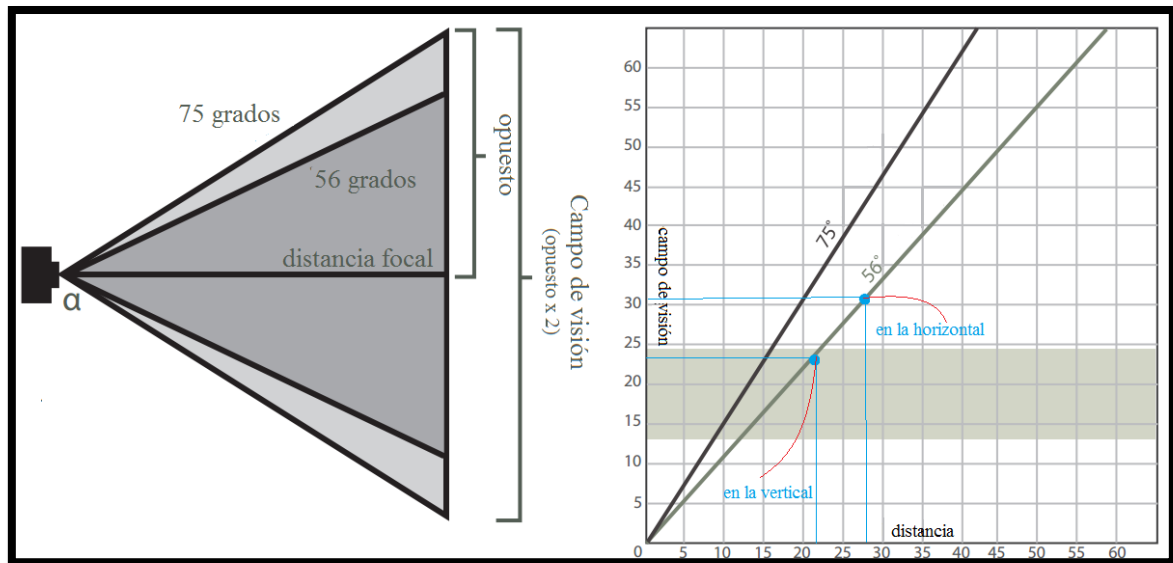


Figura 147. Distancia focal dependiendo del ángulo de enfoque; distancia y campo de visión en pulgadas.

Fuente: (Sony Computer Entertainment, 2012).

Usando la tabla de la Figura 147 para determinar el campo de visión se concluye que para un ángulo focal de 56° el campo de visión vertical de $600 \text{ mm} = 23.622 \text{ in}$, determina una distancia de 24 pulgadas ; y para el campo de visión horizontal $770 \text{ mm} = 30.315 \text{ in}$, determina una distancia de 28 pulgadas . En milímetros se tiene:

$$609.6 \text{ mm} < \text{altura} < 711.2 \text{ mm}$$

La altura de la cámara puede ser modificable en este rango para que el requerimiento de pantalla de la apelación de la presente investigación. También se podría considerar el caso en el que la cámara se refleje contra el espejo para ahorrar distancia, esto ocasionaría problemas como distorsión de la perspectiva que cargarían con procesamiento adicional al algoritmo de visión computarizada.

La altura determinada en la Figura 148 no sobrepasa la altura promedio de un escritorio, por lo cual se considera óptima para un niño o una persona adulta.

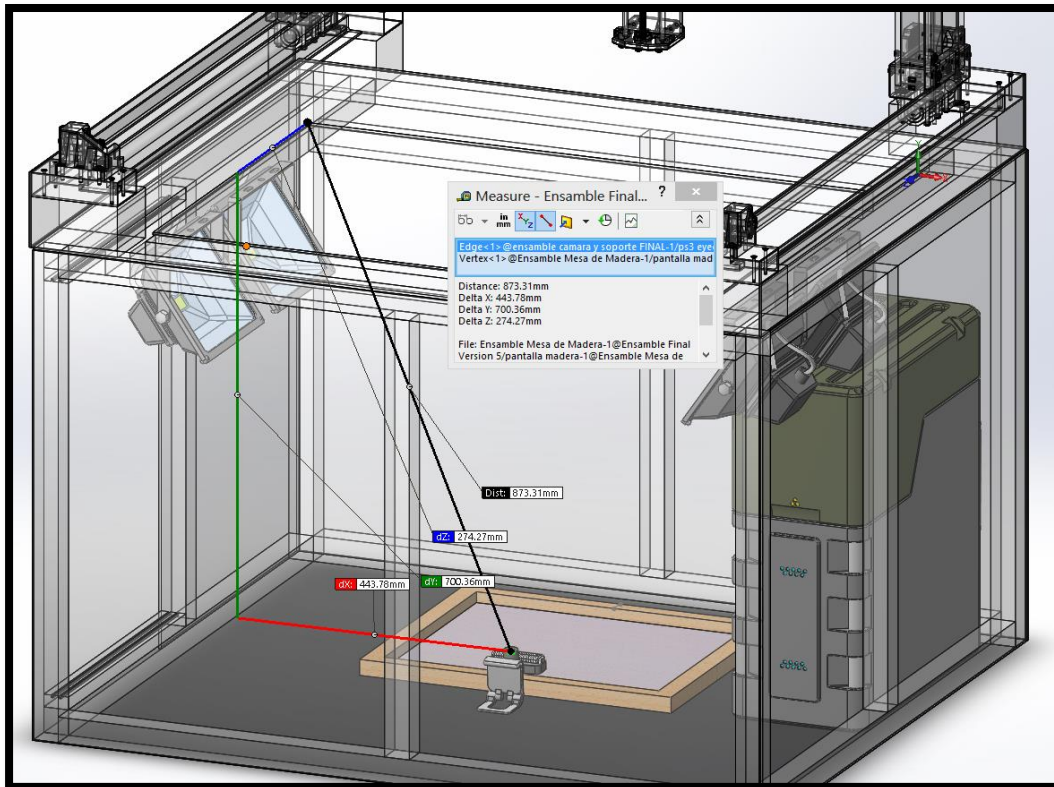


Figura 148. Distancia (delta Y) del lente hasta la pantalla igual a 700.36 mm, medida en el software CAD/CAE.

Fuente: Propia.

Filtro infrarrojo

De fábrica, la cámara PlayStation Eye admite solamente el espectro visible de la luz, y posee un filtro anti rayos infrarrojos.

Los filtros adaptables que se encuentran comercialmente son caros y un poco difíciles de conseguir, no son muy confiables si se aplican a cámaras pequeñas.

Para la visión artificial de este proyecto, y dado que se necesita luz infrarroja para evitar interferencias de la luz visible, se optó por modificar la cámara y remover su filtro infrarrojo adaptando uno casero hecho de diskettes usados de 3½ pulgadas, los cuales permiten un ancho de onda de 800 a 850 *nm* de longitud de onda. Como dato adicional la frecuencia de entrada de esta señal es de 214 a 400 *THz*, lo cual no interfiere con la medida del tiempo de muestreo debido a su rapidez.

En la Figura 149 se detallan los cuantos de luz infrarroja que entran en el filtro. Como se puede observar, la mayor cantidad de luz traspasa a esa longitud de onda, por lo que un factor importante al considerar los reflectores infrarrojos.

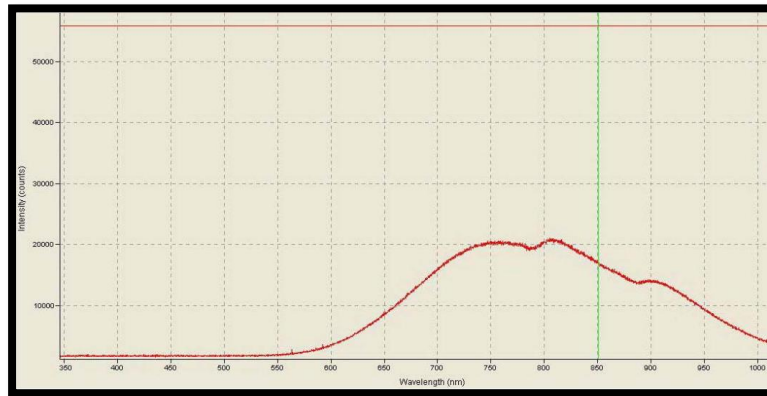


Figura 149. Conteo de partículas de luz frente a la longitud de onda al pasar por el filtro del disco floppy usado.

Fuente: (Madian & NUI Group, 2009).

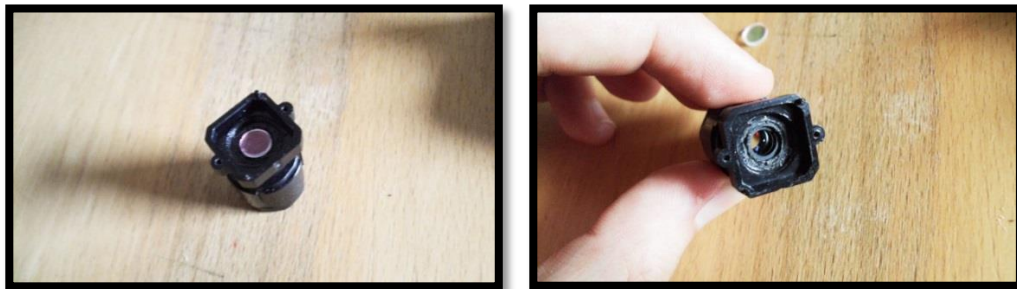


Figura 150. Lente infrarrojo del PlayStation Eye. A la derecha, lente original. A la izquierda, lente-filtro infrarrojo removido.

Fuente: Behance.

El lente pasa por un proceso de modificación y remoción del filtro como se muestra en la Figura 150.

Reflectores infrarrojos

Los reflectores van ligados junto con el material de retroproyección, y deben ser lo suficientemente potentes para crear una luminosidad uniforme. En tal virtud se usan los reflectores T8X15-140 de la compañía ZL-ZT Co (Figura 151), que tienen una longitud de onda de 850 nm y un rango de 90° de campo de trabajo. Por ello se necesitan 4 para cubrir a toda la pantalla. Esta y otras características se especifican en la Tabla 62.



Figura 151. Reflector de LEDs infrarrojos de la compañía T8X15-140.
Fuente: ZL-ZT Co.

Tabla 62.
Especificaciones del reflector de LEDs infrarrojos T8X15-140.

Parámetro	Especificación
Cantidad de LEDs	140
Tipo de LEDs	5 mm
Marca de LEDs	Tyntek
Longitud de Onda de los LEDs	850 nm
Ángulo del Rayo	90°
Rango de trabajo	25 a 80 metros
Voltaje de trabajo	AC 85 hasta 265 V
Consumo de potencia	15 watts
Nivel de Protección	IP65
Temperatura de operación	40°C ~ 50°C
Dimensión	175 mm x 125 mm x 115 mm
Peso	1,2 kg
Material del contenedor	Aluminio colado negro

Fuente: ZL-ZT Co.

Cabe recalcar que estos arreglos de LEDs infrarrojos tienen un ángulo de acción bastante amplio, por lo que se consigue un barrido en toda la pantalla y se los colocan como en la Figura 152.

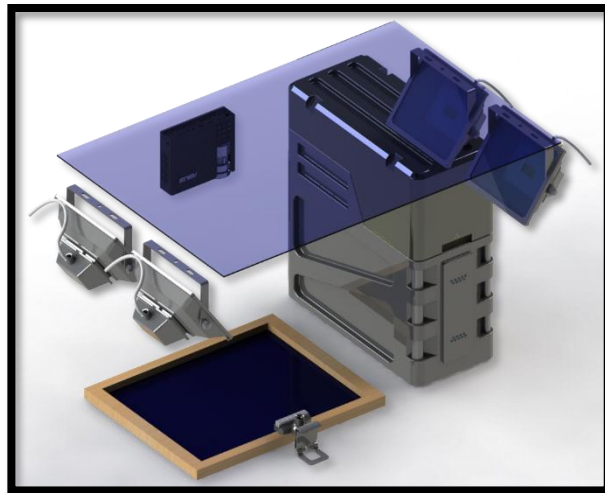


Figura 152. Disposición de los reflectores infrarrojos T8X15-140 dentro de la mesa (mesa y robot invisibles para esta imagen).

Fuente: Propia.

Proyector y Espejo

Partes igual de esenciales en los componentes de hardware de este proyecto son: el proyector y el espejo que refleja su imagen.

Para este caso, se ha utilizado el proyector EPSON PowerLite S17 (Figura 153) cuyas características técnicas se muestran a continuación en la Tabla 63.



Figura 153. Proyector Epson PowerLite S17.

Fuente: Epson Latam.

Tabla 63.
Especificaciones para el proyector Epson PowerLite S17.

Parámetro	Especificación
Resolución Nativa	SVGA
Vida de la lámpara	5000/6000 horas
Proporción de área de disparo	1,45 ancho, 1,95 tele
Conectividad	USB, DB9, HDMI, RJ45
Distancia Focal	16,7 mm
Taza de zoom	1,35 digital
Aspectos	4:3, 16:9, 16:10, HDMI
Consumo	284 W (normal), 208 W (eco)
Tamaño	87 x 297 x 244 mm
Señal de entrada	RCA x 1
Brillo	2700 lúmenes

Fuente: Epson Latam.

Gracias al software de cálculo de la distancia de proyección propio de Epson, se puede determinar la distancia que necesita el rayo para cubrir toda el área de la pantalla.

Projector : PowerLite S17
Lens : Fixed

Select projector Find

Aspect ratio
4:3 16:9 16:10

Installation type
Desktop Ceiling

Measurement unit
cm m Ft/in

Screen size [inch] (30 - 350)
39,5

width height
80 60

Throw distance (L)
[Input field]

Options

Result

Screen size	39.5 "
Screen width	80 [cm]
Screen height	60 [cm]
Throw distance (L)	116 - 157 [cm]
Distance from screen edge (H)	3 - (-5) [cm]

Figura 154.Software calculador de distancias de proyección de Epson.

Fuente: Epson.

El software visto en la Figura 154, se ha configurado para el proyector Epson PowerLite S17 en un aspecto de 4:3. Para el cálculo se ha optado por introducir el alto de la pantalla que es 60 cm, y como se observa el ancho tiende a aumentar hasta los 80 cm con el tamaño de la pantalla general a 39.5 pulgadas.

De la Figura 154, se obtiene que la distancia debe variar de 116 cm a 157 cm para lograr el campo ideal de proyección. Además esto tendrá una consecuencia de separación de la imagen de unos 3 a 5 cm hacia abajo del nivel del lente.

La altura de la mesa es incapaz de alojar al proyector y provocar una imagen del tamaño apropiado al mismo tiempo. Por ello, se ocupa el espejo; que por efecto de la reflexión de la luz, se puede aumentar la distancia que recorre la imagen con el consecuente crecimiento del área, logrando de esta manera el tamaño objetivo. Para entender mejor este arreglo, se ilustra su configuración en la Figura 155.

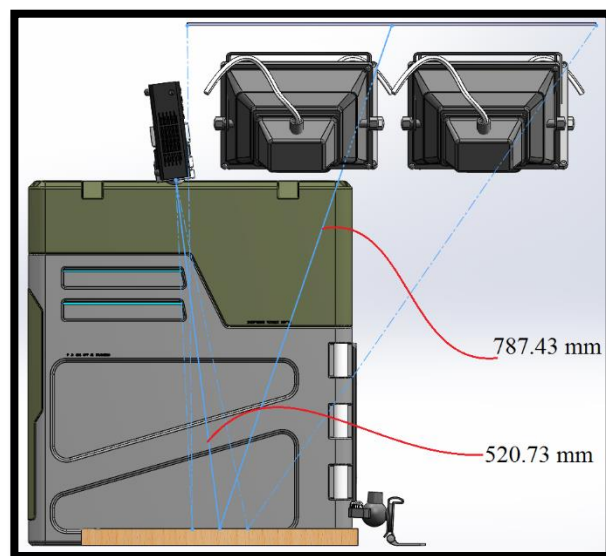


Figura 155. Distancia que la imagen del proyector recorre al rebotar en el espejo.
Fuente: Propia.

De la Figura 155 se tienen las distancias que el rayo (con la imagen) viaja rebotando en el espejo. A continuación se realiza la suma:

$$\text{Distancia del rayo del proyector} = 520.73 + 787.43 = 1308.16 \text{ mm}$$

Se tiene la distancia en milímetros que el rayo debe recorrer para alcanzar a llenar la pantalla. Esta concuerda con el cálculo del software de Epson.

Este método, aunque simple, tiene 2 grandes obstáculos; el primero es el efecto de trapezoide en la imagen por la inclinación del proyector, y segundo es el efecto de imagen fantasma aparece por el rebote constante entre la pantalla y el espejo. Estos son analizados a fondo en el capítulo 4.

Material de proyección y pantalla

Para implementar una pantalla adecuada, es necesaria una configuración de materiales que permitan la proyección de la imagen, y a su vez la detección de los gestos. En la Figura 156 se muestra la configuración más acertada para la tecnología RDI.

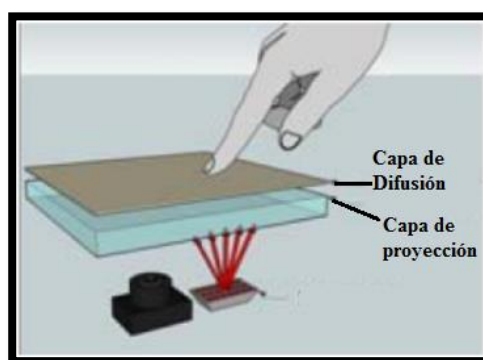


Figura 156. Materiales en la pantalla.

Fuente: (J Schöning et al., 2010).

Para este proyecto, se ha optado por un vidrio de 4 líneas (4mm) y un material de retroproyección denominado Gray; el cual es un material que simula muy bien los colores negros (ausencia de luz) y realza los blancos (luz completa) del proyector. Esto brinda un color nítido con alto contraste. Otra de sus ventajas es la capacidad de reflexión de los objetos que se sitúan encima, Ver Figura 157.

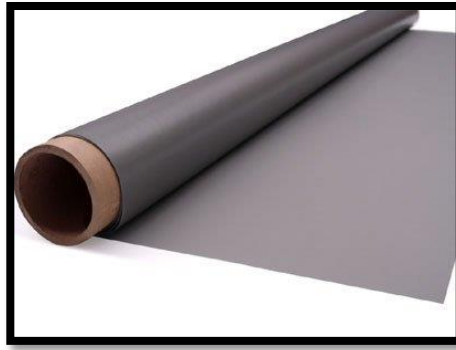


Figura 157. Lona Gray de la compañía Rosco.
Fuente: Rosco.

CPU de procesamiento

El cerebro de todo el proceso de visión computarizada es el CPU. Este debe ser lo suficientemente robusto para evitar latencias y lograr soportar el envío y recepción masiva de datos de las imágenes que ingresan desde la cámara.

El computador escogido para este proceso, es una ASUS Q550lf, la cual tiene una tarjeta de video NVIDIA GeForce 745m de 2 Gigabytes de memoria dedicada solo a imágenes, Cuenta con un procesador Intel Core i7 (4ta, generación) que corre a 1.8 GHz en su doble núcleo. Es capaz de realizar funciones en sus 8 Gigabytes de memoria RAM. Además cuenta con una capacidad de 1TB en su disco duro HDD.

Esta configuración de partes es suficiente para adaptar todos los programas y sus algoritmos de manera eficaz.

3.5.1.5. Subsistema 2: Algoritmos (Software) de la visión artificial

Una vez seleccionados los materiales y dispositivos para efectuar el proceso de visión computarizada, es momento de diseñar el camino que la imagen recorre hasta convertirse en datos utilizables por el software.

Primero, es necesario conocer cómo se crea un objeto digital interpretable por el programa de la interfaz (software de aplicación), a partir de una imagen en bruto tomada por la cámara cuando se detecta un toque. Para ello el flujograma de la Figura 158 muestra la creación de tal objeto.

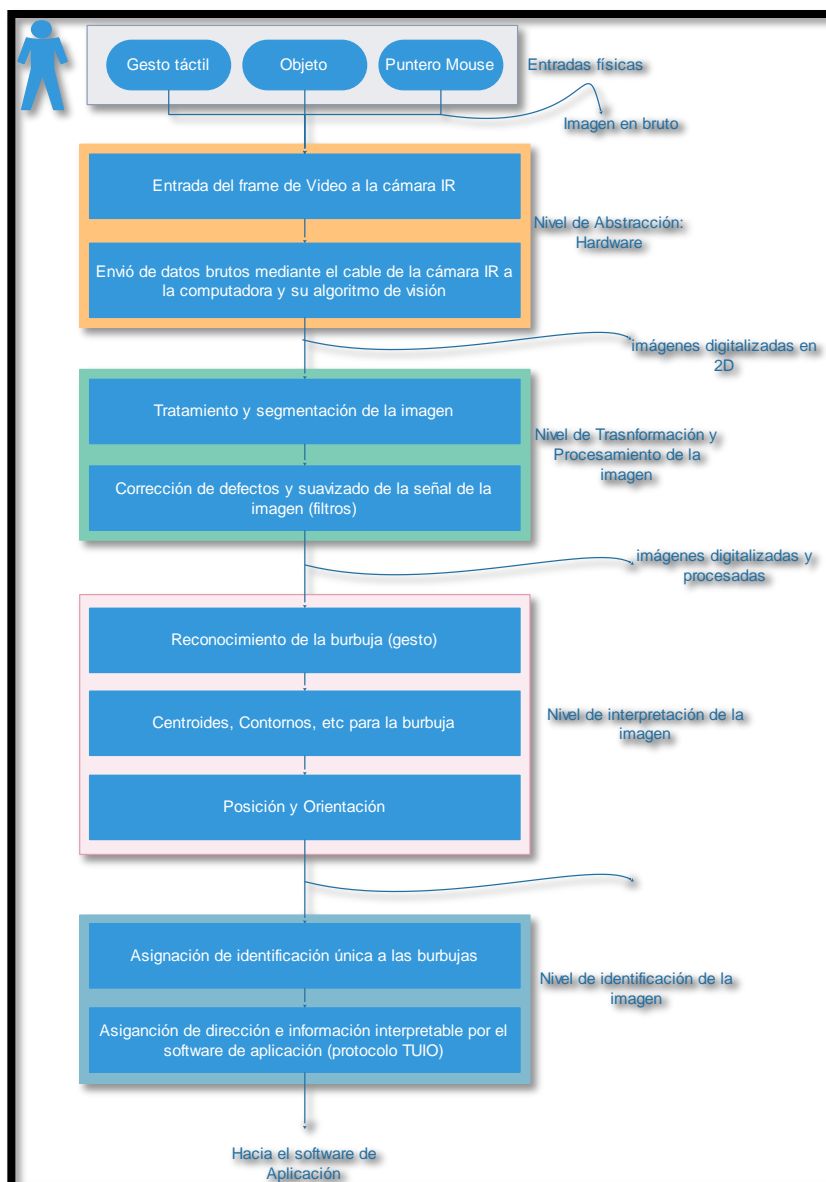


Figura 158. Diagrama de la creación de un objeto digital para ser usado en algún software de aplicación.

Fuente: Propia.

Como se observa en este flujograma de la Figura 158, la creación del objeto digital sigue un proceso estándar escalable para otros más (todos y cada uno de ellos). Sin embargo no se explica todavía cómo interactúa dinámicamente con los eventos (al rastrear y seguir una pieza de ajedrez sobre el tablero por ejemplo), y cómo se generan los diversos tipos de gestos.

Selección de paquetes y librerías para visión

Antes de ahondar en el diseño de los gestos es necesario explicar los diversos paquetes y librerías disponibles. A continuación, se indica en la Tabla 64 las características sobresalientes de cada paquete.

Tabla 64.
Características de las librerías de visión

LIBRERÍA	CARACTERÍSTICAS
CCV (Community Core Vision)	Código abierto y plataforma-cruzada
	Diseñado para mejorar la interfaz natural de usuario (NUI) específicamente.
	Varios protocolos de comunicación disponibles: TUIO, OSC, XML.
	Compatible Con FTIR, DI, RDI, LLP y DSI
	Varios tipos de filtros programables
	Buena compatibilidad con cámaras
	Tracking de burbujas y fiduciales
	Mejor para usos con fuentes infrarrojas (dinámicas y estáticas)
	Plataformas pre instaladas para su funcionamiento: Quicktime y Visual Studio 2008 Redistributable X86.
Posibilidad de varias cámaras	
ReactIVision	Multiplataforma y de código abierto. Es un marco de referencia en cuanto a visión computarizada se refiere
	Tracking de burbujas y fiduciales. (Principalmente fiduciales)
	Compatible Con FTIR, DI, RDI y LLP
	Propio paquete de fiduciales basado en algoritmos genéticos.
	Protocolo TUIO
	Filtros programables, pero no dinámicos en tiempo real
	Mejor con fuentes infrarrojas y estáticas
NI Vision and Motion toolkit (LabView)	Librería VI exclusiva para Labview. Licencia pagada
	Programación gráfica, soporta LabWindows y CVI (ambientes en C)
	Plataformas Windows desde XP en adelante y mínimo 64 Megabytes en RAM
	Sin protocolos dedicados excepto los de comunicación con la cámara. (USB o SERIAL) pero expandible y programable para WLAN o LAN con varias cámaras
	Código de fiduciales no implementado.
	Alta escalabilidad no solo en superficies táctiles sino en cualquier tipo de problema de visión (Uno de los más avanzados recientemente)
	Filtros, funciones de segmentación y herramientas de visión implementadas

- **Selección del software**

Las librerías de ReactIVision y CCV son las más robustas para esta aplicación pues vienen desarrolladas para soportar gran cantidad de entrada de datos. El software de visión de NI LabView también es altamente robusto, pero no se enfoca en sistemas infrarrojos. Sería posible programar un sistema de visión artificial pero no se compararía con las ya existentes probadas y optimizadas durante años para este caso en específico. Además, su licencia es pagada.

Las librerías como D-Touch a pesar de que son ligeras y robustas, tienen el inconveniente de solo servir para detectar fiduciales y no realiza un proceso de cálculo de centroides muy efectivo para marcar el gesto táctil.

La librería CCV se diferencia ampliamente de la de ReactIVision debido a su interfaz dinámica de programación y configuración de los filtros y procesadores de imagen, permitiéndole al usuario obtener un resultado satisfactorio, además CCV cuenta con varios modos de calibración y protocolos de comunicación.

Por esto se optó por seleccionar a CCV en el actual proyecto.

Procesamiento de Imagen con CCV (Community Core Vision) en este proyecto

Se muestran el tipo de filtros y técnicas usadas para lograr la transformación de la imagen en datos computables específicamente para este sistema. También se especifica como interviene CCV en todo el proceso de la visión computarizada mostrado en la Figura 159.

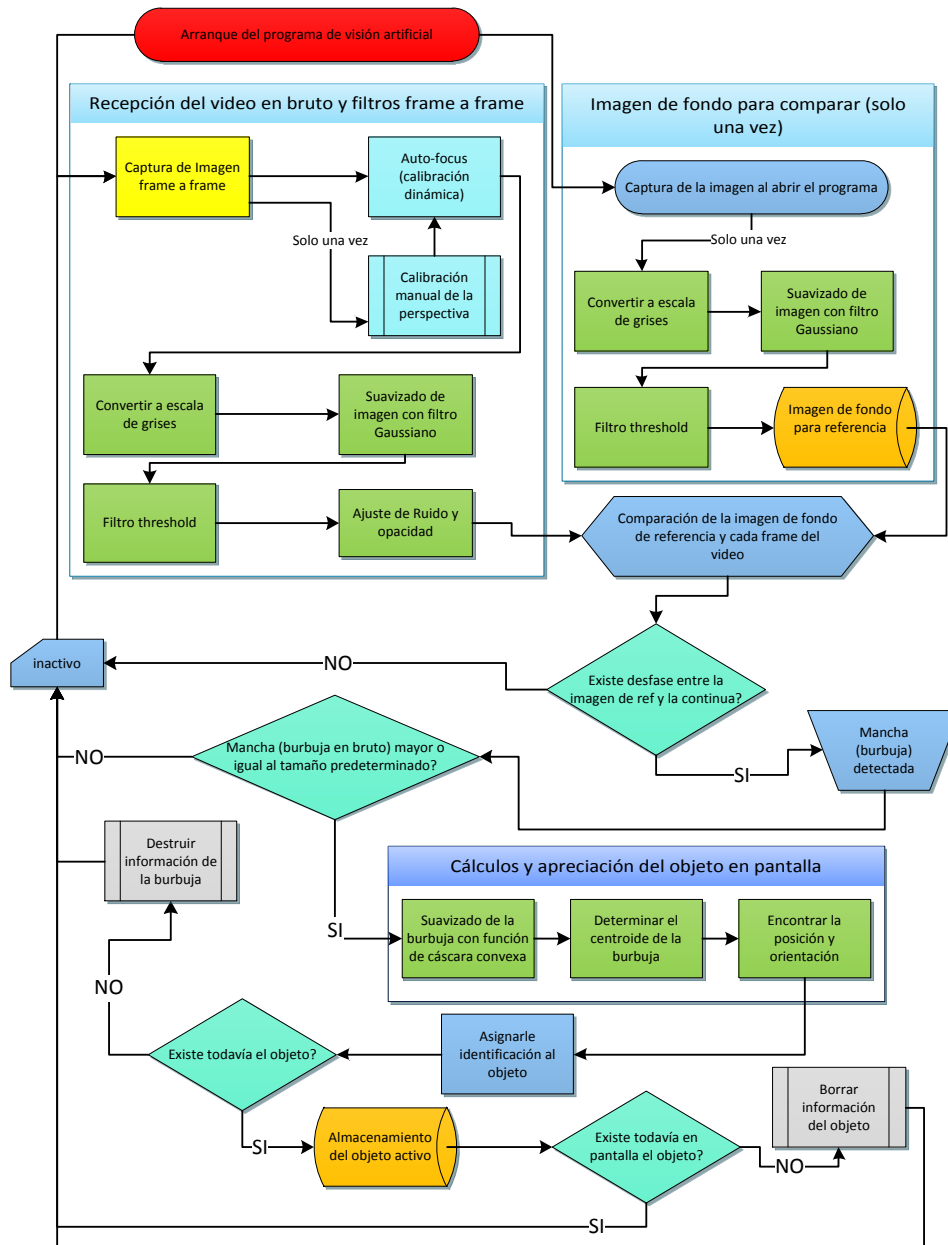


Figura 159. Diagrama cíclico en el reconocimiento y generación de burbujas operables.
Fuente: Propia.

Captura de Imagen

Para empezar, se debe recibir la imagen desde la cámara PS Eye y ajustar los parámetros de imagen de la cámara para cubrir las 39.5 *pulgadas* con nitidez y claridad. La cámara usada debe estar configurada e instalada con sus respectivos controladores

para cambiar las configuraciones. La Figura 160 muestra la interfaz de calibración de la cámara.

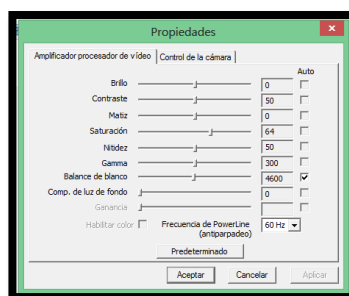


Figura 160. Propiedades Ajustables para la PlayStation Eye.
Fuente: CCV.

Calibración de la perspectiva

Antes de empezar a analizar la imagen, es necesario realizar el enfoque a la imagen de manera manual y de manera dinámica.

La PlayStation Eye tiene una función auto-enfoque desde 1 pie hasta el infinito. El enfoque manual no es necesario a menos que se requiera ajustar el zoom de la cámara. En cuyo caso se usa la perilla del lente. En este proyecto no fue necesario el zoom.

En la Figura 161 se remarca el enfoque de los 4 reflectores LEDs alineados sin opacidad y con buena nitidez de la imagen en bruto.

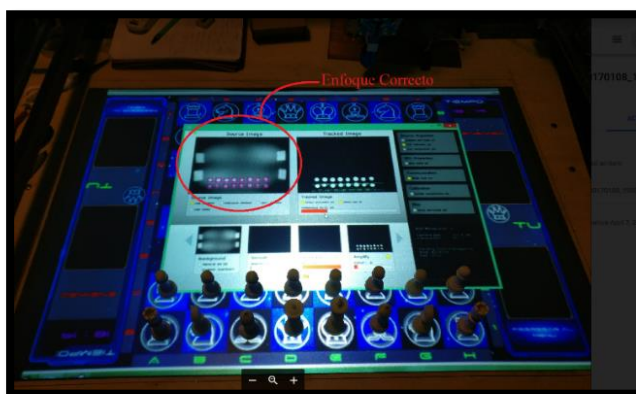


Figura 161. Enfoque correcto no distorsionado por la perspectiva.
Fuente: Propia.

Adicionalmente, se debe que encontrar la posición correcta para evitar un enfoque trapezoidal al centrar la cámara con el espejo. Sin embargo, este paso no es necesario porque, como se observa en la Figura 148, el campo de visión esta cuadrado directamente con el centro de la pantalla en la parte posterior.

Conversión a escala de grises

El proceso de conversión a escala de grises se lo realiza quitando la luminiscencia de la capa RGB.

La razón esencial para clasificar los pixeles por niveles de gris se debe a que pertenecen al mismo objeto. Esto se realiza para reducir la complejidad del dato, acelerando el reconocimiento y simplificando el procedimiento de clasificación. En la Figura 161 se muestra el cambio de la imagen RGB a escala de grises.

CCV usa el algoritmo de conversión a escala de grises por luminosidad, en el que se varía el porcentaje de cada color primario en el pixel de acuerdo a la luminosidad relativa en la captura, para obtener una mezcla lo más acertada a escala de grises aplicando la fórmula en el algoritmo de conversión, como se muestra en la (138).

$$pixel = 0.21 R + 0.72 G + 0.07 B \quad (138)$$

Este parámetro se modificó en el código fuente para obtener el máximo rendimiento.

Suavizado con el filtro Gaussiano

Como siguiente paso, se realiza el filtro gaussiano, que consiste en eliminar el efecto arenoso de la imagen aplicando un algoritmo de suavizado en base a la teoría de Gauss, se gana reducción de ruido. En el CCV, y aplicado a este proyecto, se lo realiza de la siguiente manera (Figura 162):



Figura 162. Filtro Gaussiano de difuminación y ruido.

Fuente: Propia y CCV.

Para el caso de RDI usado en este proyecto, se recomienda no abusar del filtro gaussiano pues conllevaría una unión de las burbujas sin diferenciarlas entre sí. En todo caso, se recomienda ajustar los parámetros de blur y noise del CCV, logrando de esta manera una amplificación solamente de los puntos de interés.

Thresholding (Umbral)

El método de thresholding es muy útil y esencial en este proyecto porque permite reducir una imagen a solo blancos o negros, tomando solo objetos blancos como objetivo o viceversa, como se observa en la Figura 163.



Figura 163. Imagen en CCV despues del filtro de thresholding a la imagen en escala de grises.

Fuente: Propia.

Después del thresholding, se compara el histograma que la cámara capta en cada *frame* y la imagen guardada en vacío (al principio).

Al superponer estos histogramas, se observa un fondo negro si las imágenes resultan las mismas, por el contrario, si existe un objeto que activa la zona del thresholding, entonces crea la mancha denominada burbuja, que es el objeto en sí.

Segmentación de la imagen

Consiste en 3 pasos que determinan la zona de delimitación del objeto respecto del resto de la pantalla, su centroide relativo, y la obtención de su posición y orientación relativa.

Esto permite al algoritmo brindar información del objeto. En la Tabla 65 se muestra el proceso detallado de cada uno de ellos.

Tabla 65.
Procesos de la segmentación.

Proceso de Segmentación	Función
<p>Delimitación y suavizado con la función de cáscara convexa</p>	<p>Sirve como proceso adicional después del threshold para suavizar el histograma de la imagen obtenida reduciendo los extremos “afilados”. Se implementa como algoritmo en el proceso de segmentación (Figura 164).</p> <div data-bbox="738 781 1193 1021" style="text-align: center;"> </div> <p>Figura 164. Objeto con función de cáscara convexa. Izquierda: original, derecha: después del algoritmo. Fuente: (Holzammer & Hahne, 2009).</p>
<p>Segmentación de la burbuja</p>	<p>CCV implementa un algoritmo (modificable) que clasifica el histograma de acuerdo a la tonalidad del mismo. En él, se aplican funciones matemáticas para seguir el contorno del objeto (Figura 165).</p> <div data-bbox="719 1218 1214 1482" style="text-align: center;"> </div> <p>Figura 165. Segmentación a partir del thresholding, también se aprecia el contorno y el centroide. Fuente: CCV.</p>
<p>Determinar el centroide de la burbuja</p>	<p>Se determina el centroide del histograma de la burbuja (Figura 165, contorno rosado) mediante algoritmos matemáticos para cuerpo irregulares. Cabe destacar que este proceso se hace frame a frame. Por ello se debe configurar para evitar latencias. En este proyecto se usan fichas de ajedrez de 20 a 30 mm de diámetro, por lo que se debe ajustar el algoritmo para que tenga este rango de tolerancia de 1 cm.</p>
<p>Determinación de la posición y orientación</p>	<p>Como último paso en la segmentación de la burbuja, donde se estima la posición y orientación relativa tomando como referencia el campo de visión de la cámara.</p>

	<p>En el protocolo TUIO se realiza la medición de los ejes coordenados X e Y de cada burbuja, dividiendo el dato de la posición del pixel en la cámara, para el tamaño del sensor, es decir:</p> $X = \frac{\text{sensorX}}{\text{ancho_sensor}} \quad Y = \frac{\text{sensorY}}{\text{largo_sensor}}$
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Comunicación y protocolo en la visión artificial

Este paso es el último en el procesamiento de la imagen, de aquí en adelante la burbuja o burbujas deben seguir un protocolo denominado TUIO para extraer la información que el software de aplicación (interfaz) usará.

Protocolo TUIO

El protocolo TUIO se inventó específicamente para proveer comunicación versátil a las pantallas multi-táctiles de mesa.

Este protocolo tiene varias características que han sido usadas en este proyecto.

- Posee 3 identificadores por burbuja, una para la orientación y la posición mediante sensores, otra para detectar a la burbuja con posición sin orientación, y el último que detecta el objeto o punta del dedo como una aproximación elíptica en una caja de bordes configurables.
- Esta codificado en OSC que es un formato de transferencia binario muy eficiente.
- Este protocolo transmite a través de cualquier canal que este soportado por una implementación OSC y se lo hace mediante paquetes de datos OSC binarios dentro de un protocolo UDP.
- Para evitar latencia elevada el protocolo TUIO usa el protocolo UDP, donde existe la posibilidad de perder el paquete.
- Asigna diversos atributos a la burbuja para ser aprovechados por el software de aplicación.

El protocolo TUIO define 2 clases principales de mensajes, los cuales son:

- Mensajes SET, los cuales son usados para comunicar información acerca de un solo objeto como la posición, orientación y otros estados reconocidos.

- Mensaje ALIVE, el cual indica la lista de objetos presentes en la superficie usando una lista de IDs de sesión únicos para cada burbuja (Figura 166), que aumentan a medida que aumentan las burbujas.



Figura 166. IDs de sesión.

Fuente: Propia.

Como propiedades de los mensajes en el protocolo TUIO se tienen los siguientes:

- Al remover o colocar un objeto nuevo, el bloque ALIVE envía toda la información de los objetos (existentes y destruidos) y la información del mensaje SET de cada objeto.
- Existen mensajes FSEQ que contienen la información de las actualizaciones que se realizan en el algoritmo. Este sirve para asignar a manera de clases: conjunto SET y el conjunto ALIVE.
- El algoritmo del cliente deduce el estatus de los objetos mediante los mensajes SET y ALIVE en cada frame de su algoritmo. Desde aquí ya se pueden deducir los tiempos de latencia según la cantidad de objetos y la complejidad de los mismos.

El protocolo TUIO tiene varios atributos que se usan en este proyecto (Tabla 66):

Tabla 66.

Atributos, descripción y su tipo de los parámetros que maneja el protocolo en este proyecto.

Atributo	Descripción	Tipo
s	ID de sesión (gesto temporal)	int32
i	ID de la clase (fiduciales)	int32
x, y, z	Posición	float32
a, b, c	Ángulo	float32
w, h, d	Dimensión	float32
f, v	Área y volumen	float32

X, Y, Z	Vector velocidad lineal	float32
A, B, C	Vector velocidad de rotación	float32
m	Aceleración del movimiento	float32
r	aceleración de la rotación	float32
P	Parámetro libre	definido por OSC

Fuente: CCV y TUIO.

Se observa cómo actúa el protocolo TUIO dentro del procesador interno (Figura 167).

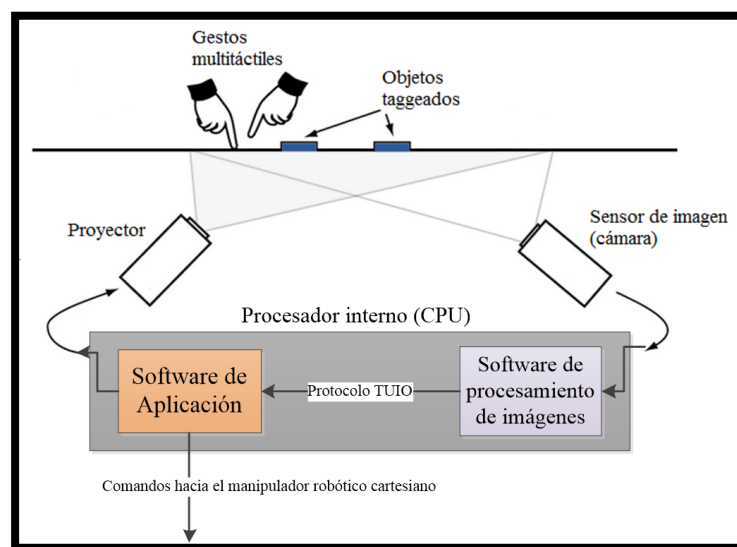


Figura 167. Esquema del proceso de la visión artificial y el protocolo TUIO en el sistema.

Fuente: Propia.

Calibración y Área de trabajo

CCV incluye un modo calibrador de área en caso de que sea imposible ajustar el tamaño de la pantalla proyectada (desde el proyector), con el área de enfoque de la cámara. Para ello CCV utiliza un algoritmo de estimación de la posición, donde se calcula el desfase entre el punto real y el esperado, distorsionando la imagen original, estirando o acortando los píxeles. Esta distorsión se realiza con el modo gráfico una vez que todo el sistema se encuentra implementado. En la Figura 168 y Figura 169 se tienen la pantalla de trabajo del CCV y la pantalla de reconocimiento de toques, respectivamente. En el capítulo 4 se analiza con más profundidad este paso.

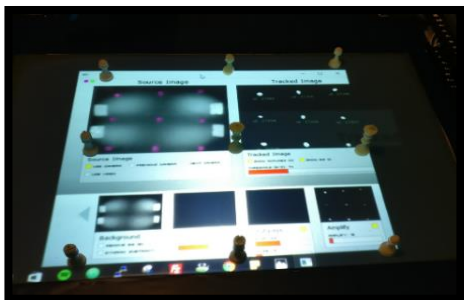


Figura 168. Área original captada por el CCV. Fuente: Propia.

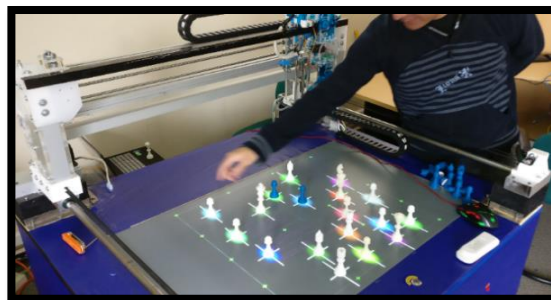


Figura 169. Posiciones calibradas y piezas comprobando la nueva posición. Fuente: Propia.

3.6. Módulo 4: Software de Aplicación (Interfaz)

En este módulo se analizan y diseñan las estrategias de programación para implementar un sistema de juego de ajedrez que integre las características de la visión artificial y la comunicación con el motor de ajedrez.

Para ello, primero se deben analizar los requerimientos cualitativos que el software debe proporcionar, como se muestra en la Tabla 67.

Tabla 67.
Requerimientos del software de aplicación.

No.	Requerimientos
1	Ser interactivo e intuitivo
2	Tener pantallas de Menú y Juego Principal
3	Tener conectividad TCP para conectarse al motor de ajedrez
4	Tener conectividad UDP para conectarse al protocolo TUIO
5	Controlar los movimientos de cada pieza en el tablero (movimientos ilegales)
6	Tener botones de control e información sobre el estatus del juego
7	Agrupar las reglas del ajedrez en algoritmos
8	Sincronizar el envío de datos entre la inteligencia artificial y la visión artificial
9	Lograr una calibración precisa entre las coordenadas del software de aplicación y el software de visión artificial.

Con ello, se debe escoger el paquete que mejor se adapte a estos requerimientos. Se consideran algunos ámbitos:

- Aceptar librerías para la comunicación TCP y UDP
- Aceptar librerías del protocolo TUIO




- Aceptar paquetes de programas para gestos y entradas no convencionales
- Tener facilidad de diseño gráfico
- Lograr comunicación asíncrona y síncrona
- Capacidad para soportar hilos informáticos y procesamiento multinivel.
- Poder crear ejecutables del juego aceptado en varias plataformas
- Aceptar GUI y NUI

Alternativas del paquete para el software de aplicación

Se tienen 3 paquetes que proporcionan las características antes vistas y se enumeran sus características en cada una como se muestra en la Tabla 68.

Tabla 68.

Paquetes de software que soportan el protocolo TUIO.

Paquete de Software	Características
Unity 3D  Figura 170. Logo de Unity5 3D. Fuente: Unity Technologies.	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad para Microsoft y OS X. - Código libre. - Soporta Open GL. - Scripting disponible con UnityScript, C#, JAVA y Boo. - Usa .NET Framework. - Assets gratuitos y pagados.
ActionScript  Figura 171. Logo de ActionScript. Fuente: Adobe.	<ul style="list-style-type: none"> - Derivado de Adobe Flash - Excelente motor para animaciones o interfaces interactivas. - APIs mejoradas y ampliadas. - Orientada a objetos - Soporta JAVA - Procesamiento adicional en XML - Solo procesa paquetes de Flash Player
Processing  Figura 172. Logo de processing. Fuente: Processing.	<ul style="list-style-type: none"> - Entorno de desarrollo integrado IDE destinado para JAVA. - Usado en aplicaciones multimedia y animaciones digitales. - Muy robusto, pero poco intuitivo al programar. - Soporta OpenGL en varias plataformas. - Librerías TUIO disponibles, pero con bugs.

Fuente: Unity Technologies, Adobe, Processing.

3.6.1.1. Selección del paquete de software para el desarrollo del software de aplicación

Se realiza un proceso de selección con matrices de ponderación para escoger el más idóneo, considerando los siguientes aspectos:

- Capacidad de interactuar con el motor de ajedrez
- Capacidad de interconexión con la visión artificial
- Entorno gráfico potente y escalable.
- Procesamiento multinivel (threading).

Ahora se obtiene una ponderación general de las alternativas respecto de los criterios analizados (Tabla 69):

Tabla 69.
Ponderación de criterios con las alternativas.

	Interacción motor ajedrez	Interconexión visión artif.	Entorno gráfico	Procesamiento multinivel	Suma + 1	Ponderación
Unity	0,92	0,94	1	1	4,86	0,3967
ActionScript	0,67	0,83	0,69	0,9	4,09	0,3339
Processing	0,42	0,73	0,69	0,46	3,3	0,2694
				Suma	12,25	1,0

Como se observa el resultado de la ponderación de la Tabla 69, el paquete más apropiado para ser usado como software de aplicación, es Unity. Para la selección se consideraron los siguientes factores:

- Unity tiene una buena relación con los motores de ajedrez por los protocolos que utiliza. En este caso se comunica asíncronamente mediante TCP, el cual resulta complejo, pero más sencillo que ActionScript. En Processing la posibilidad de adaptar el TCP asíncrono es muy difícil por la carga de software que tiene a pesar de ser muy robusto en multimedia.
- La interconexión con la visión artificial es el criterio donde todos logran una similitud, pero como se muestra más adelante, los paquetes desarrollados para

implementar el protocolo TUIO son más robustos y rápidos que en los otros paquetes.

- El entorno gráfico de Unity se diferencia enormemente de los demás porque es un motor de videojuegos especialmente desarrollado para aplicaciones tanto en PC como en dispositivos móviles.
- El procesamiento multinivel es otro de los fuertes de Unity a pesar de que las otras alternativas también tienen un buen procesamiento multinivel por estar implementadas con lenguajes de programación muy robustos. Sin embargo, en Unity hay tipos de procesamientos dedicados solo a la interfaz gráficas y otras al control interno del programa que se desarrolla.

Con los parámetros citados, se escogió a Unity como el paquete de software de aplicación

Diseño final del Software de aplicación sobre la plataforma Unity 3D

El objetivo del diseño del software de aplicación es el control central de todos los sistemas adheridos a él. Es por ello que este sistema se encuentra concebido en módulos, y de presentarse un error, sea solucionable sin tener que modificar el programa completo.

En este apartado se describirán con diagramas de flujo, las técnicas de programación que se implementaron para solucionar los obstáculos y lograr los requerimientos.

El siguiente diagrama de la Figura 173 muestra los diferentes módulos que se encargan de controlar todo el sistema.

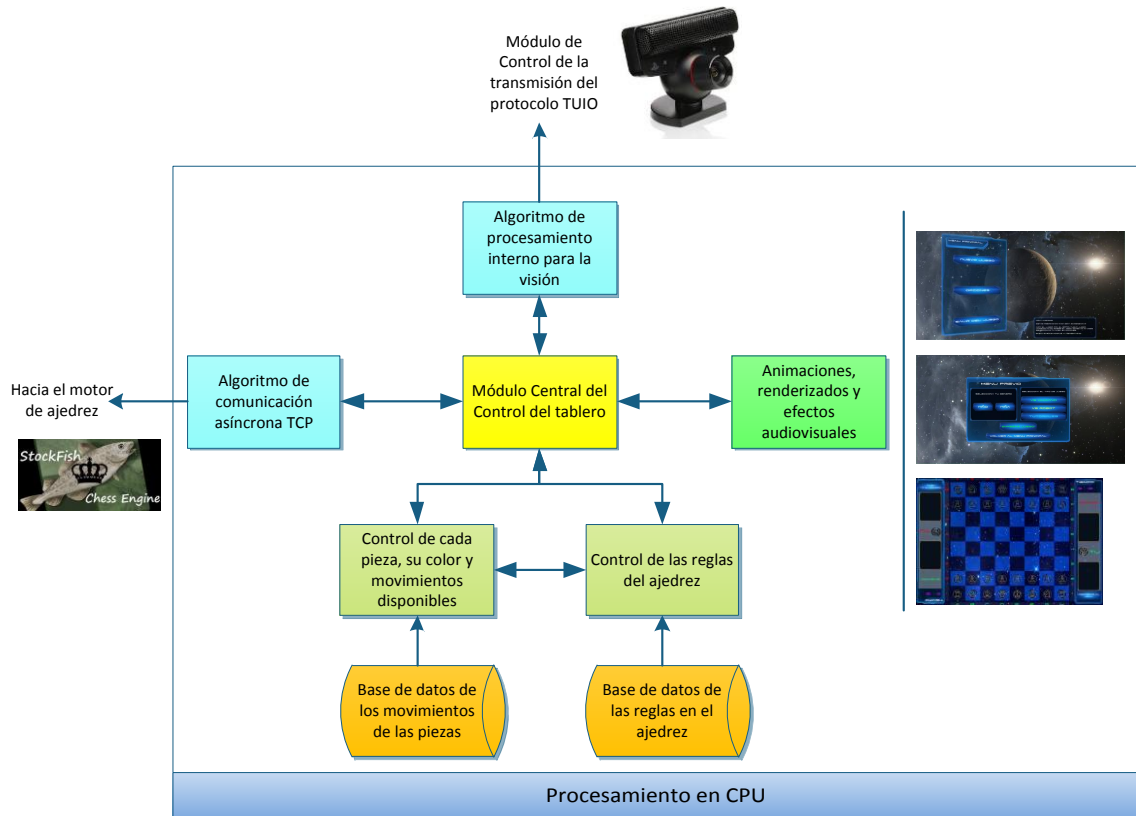


Figura 173. Componentes del software de aplicación.

Fuente: Propia.

3.6.1.2. Diseño de las pantallas de la interfaz

Es necesario especificar las ventanas que la interfaz posee. En ellas el jugador interactúa de acuerdo a los botones y mensajes. En la Figura 174 se especifican las diferentes pantallas de menú y como se encuentran interconectadas

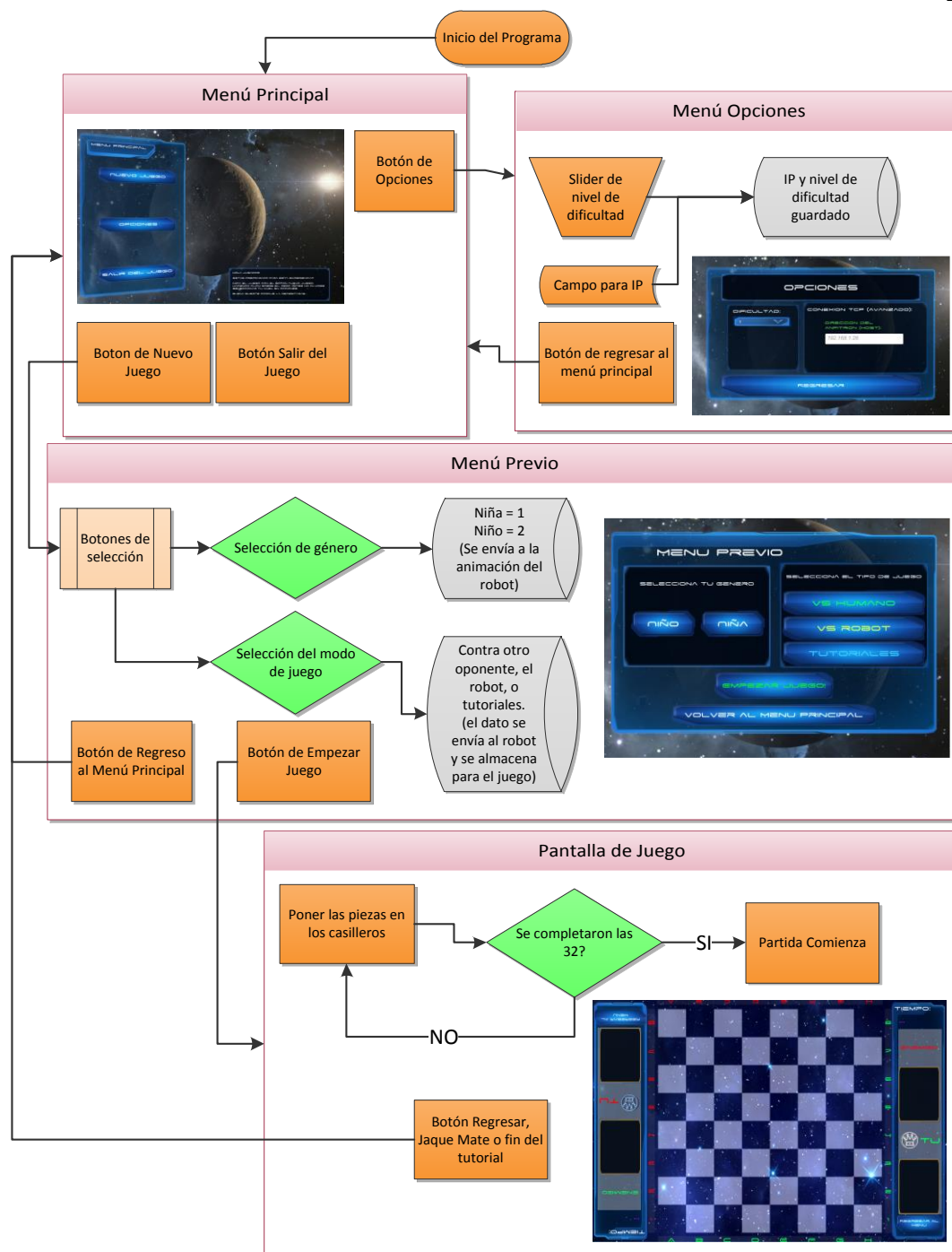


Figura 174. Esquema de las pantallas y su interacción entre ellas.

Fuente: propia.

Basándose en los criterios impuestos por la FIDE se calibro la proyección de la interfaz gráfica de tal manera que la distancia de las casillas sea de 68 mm , por lo cual la distancia horizontal y vertical del tablero es de 544 mm . De esta manera se tiene un área total de 295936 mm^2 como se muestra en la Figura 175.

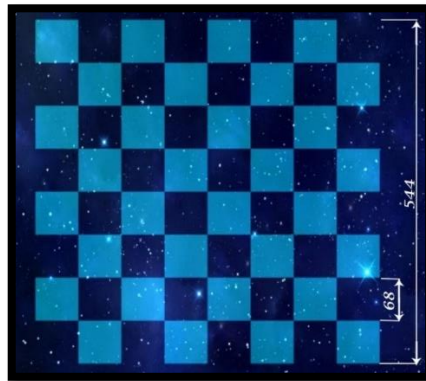


Figura 175. Medidas del tablero proyectado.

Fuente: Propia.

3.6.1.3. Subsistema 1: Algoritmo de procesamiento interno para la visión.

Este algoritmo es el responsable de tomar las señales del protocolo TUIO y procesarlas para obtener los datos de cada objeto. Para ello se muestra el flujograma de programación para esta etapa (Figura 176).

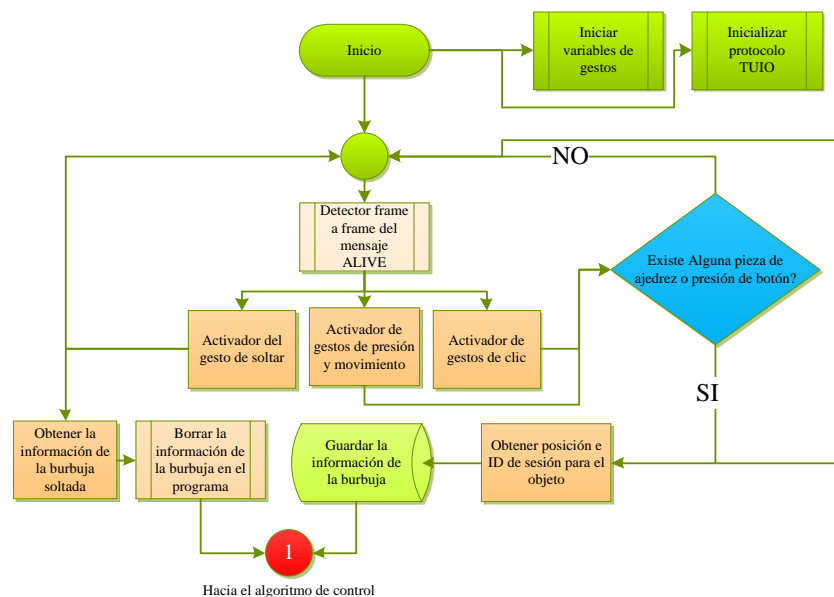


Figura 176. Diagrama de flujo para el algoritmo de visión artificial.

Fuente: Propia.

Como se observa en este diagrama de flujo, el algoritmo se ejecuta un ciclo infinito donde se guardan o borran los datos de las burbujas. En este punto se reconocen gestos de movimiento, clic o alejamiento del objeto de la pantalla. Esta información es importante para el control del tablero porque permite tener información de los gestos táctiles.

El protocolo TUIO tiene una latencia de no más de 4 milisegundos cuando las 32 piezas están en el tablero. Esto se verifica en la información que el CCV proporciona, sin embargo, puede aumentar hasta 6 milisegundos en la interfaz gráfica debido a la cantidad de información que debe ser procesada.

El modo de comunicación con el algoritmo del tablero se lo realiza mediante TouchScript que es una librería para tableros multi-táctiles y superficies (como tabletas o teléfonos inteligentes). Esta API permite separar la información de la posición, ID, velocidad, etc. de manera eficiente.

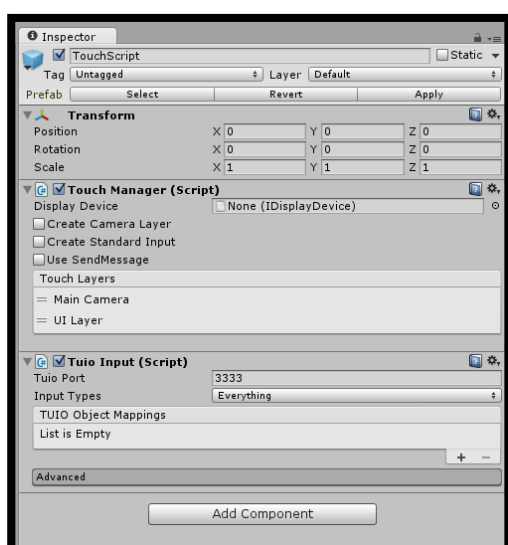


Figura 177. Inspector de la librería touchscript en Unity. Aquí se configuran parámetros del control general y del puerto para el TUIO.
Fuente: Propia y Unity.
Fuente: Propia.

```

//***** SECCION MULTITACTIL *****
private void OnEnable()
{
    if (TouchManager.Instance != null)
    {
        TouchManager.Instance.TouchesBegan += touchesBeganHandler;
        TouchManager.Instance.TouchesEnded += touchesEndedHandler;
    }

    // presionParaEngendrarPieza = GetComponent<LongPressGesture>();
    gestoDePresion = GetComponent<PressGesture>();

    // presionParaEngendrarPieza.StateChanged += manipuladorPresionLarga; //ha
    gestoDePresion.Pressed += manipuladorPresionInicial;

    //gestoDeSoltar = GetComponent<ReleaseGesture>();
    //gestoDeSoltar.Released += manipuladorRelease;
}
private void OnDisable()
{
    if (TouchManager.Instance != null)
    {
        TouchManager.Instance.TouchesBegan -= touchesBeganHandler;
        TouchManager.Instance.TouchesEnded -= touchesEndedHandler;
    }

    //presionParaEngendrarPieza.StateChanged -= manipuladorPresionLarga; //ha
    gestoDePresion.Pressed -= manipuladorPresionInicial;

    //gestoDeSoltar.Released -= manipuladorRelease;
}

```

Figura 178. Ejemplo de código en C# que tuvo que ser implementado conjuntamente con touchscript.
Fuente: Propia.

Como se observa en la Figura 177 y Figura 178, Touchscript es solo el API que permite la comunicación con el protocolo TUIO, de aquí en adelante se debe programar los requerimientos que se necesiten en C# y enlazarlos con las animaciones y objetos de la ventana principal en Unity.

3.6.1.4. Subsistema 2: Comunicación con Raspberry PI2 y el motor de ajedrez StockFish

La comunicación con la Raspberry PI 2 se la realiza mediante el protocolo TCP con la computadora. Entre ellas se conectan mediante sockets en comunicación asíncrona. Esto resulta beneficioso por dos razones:

- Se previene el desperdicio de memoria en el programa principal desarrollado en C# para Unity.
- Al ser un protocolo TCP, es más lento, pero se garantiza la comunicación. Sin embargo, el motor de ajedrez StockFish codificado en la Raspberry tarda unos pocos segundos en devolver la respuesta al control de tablero en Unity, por lo que su uso queda justificado.

En la configuración de esta etapa, se debe tomar en cuenta que el programa desarrollado en Unity es un cliente del host (Servidor) que es la Raspberry. Con el fin de quitarle carga al procesador en la computadora, el host precargado con StockFish en la Raspberry se encarga de los cálculos de la jugada y los devuelve siempre que el cliente (computadora) pregunte. Esto le da independencia al programa desarrollado en un Unity pues no requiere administrar la red y le permite desconectarse sin perjudicar toda la red en caso de un desperfecto encontrado.

El proceso de comunicación se detalla en el siguiente flujograma en la Figura 179.

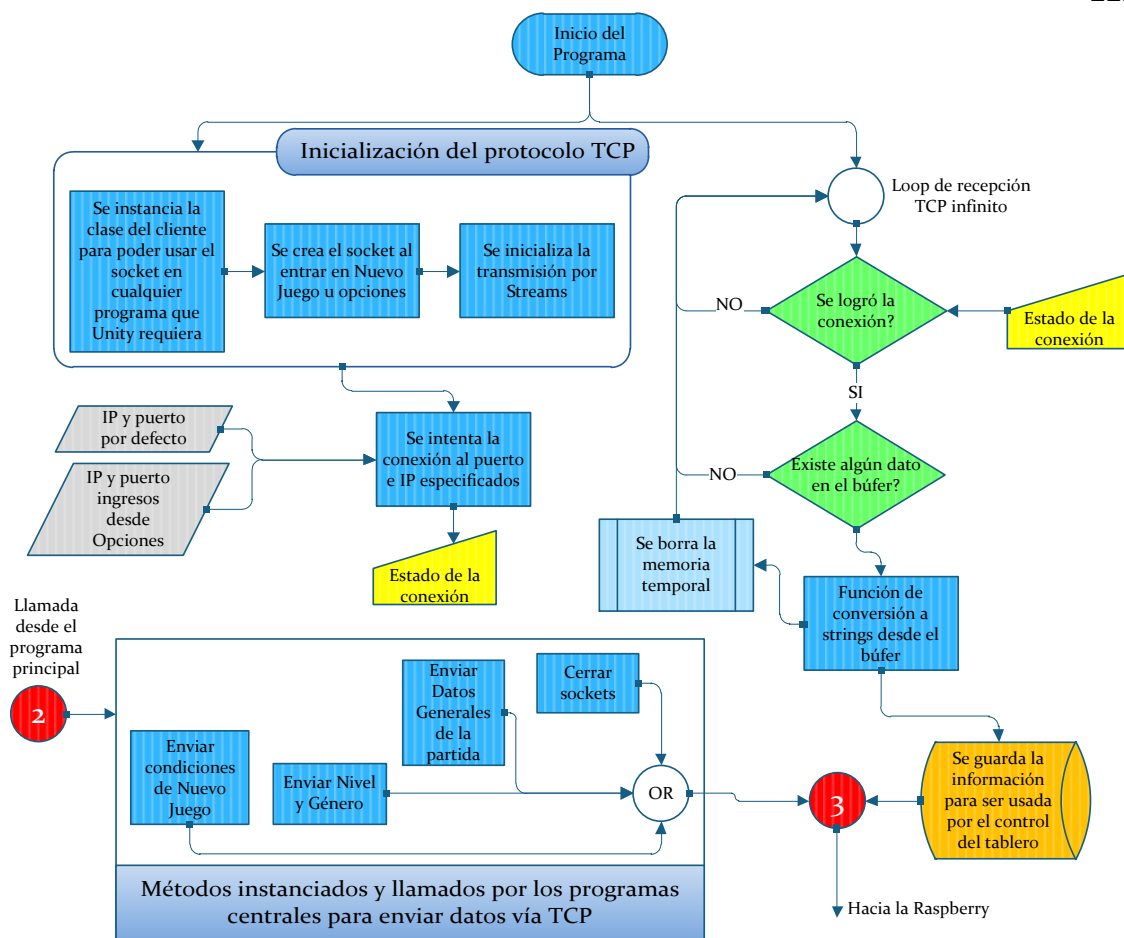


Figura 179. Diagrama de flujo para el algoritmo de conexión vía TCP.
Fuente: Propia.

Como acotaciones sobre este algoritmo se debe recalcar que el método de transmisión de datos es en Stream, un método de envío de datos que no usa la memoria proporcionalmente a la cantidad de datos que envía; sino en un comprimido de tamaño menor. Esto permite una gran transmisión de datos sin perder velocidad ni aumentar latencia.

El sistema al detectar llamadas de envío genera alarmas si la conexión no se ha conseguido. También, la función de conectar con el servidor se realiza al presionar los botones de Nuevo Juego y Opciones.

Nótese que las llamadas desde un algoritmo externo se encuentran separadas del flujograma, pero pertenecen al algoritmo.

Para mayores referencias de conexión, la topología de redes se encuentra especificada en la Figura 131 en el apartado de sistemas de control.

3.6.1.5. Subsistema 3: Control del Tablero de Ajedrez

En este subsistema se diseña el algoritmo de control que gobierna el proceso de la partida de ajedrez, en cualquier tipo de juego que se haya seleccionado. El diagrama de flujo mostrado en la Figura 182 indica de manera concisa el proceso general realizado cuando el motor de ajedrez interviene, es decir cuando la persona juega en contra de la máquina o se realizan tutoriales para aprender a jugar ajedrez.

En la Figura 180 se muestra el proceso de validación para que el movimiento de la pieza sea la indicada. Este más tarde será implementado en el software general (Figura 182 y Figura 183).

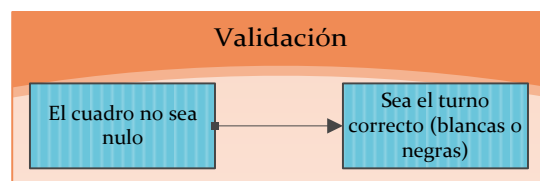


Figura 180. Validación al seleccionar la pieza de ajedrez.

Fuente: Propia.

En la Figura 181 se muestra el proceso de invocación general tomado desde el algoritmo de la visión artificial. Este también será implementado más adelante en el software general de aplicación (Figura 182 y Figura 183).

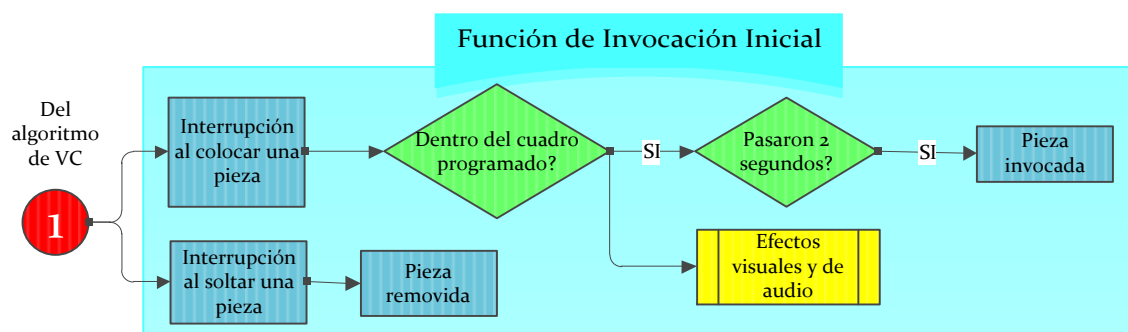


Figura 181. Condiciones al invocar inicialmente las piezas.

Fuente: Propia.

3.6.1.5.1. Algoritmo de control en tutoriales, o partida VS robot.

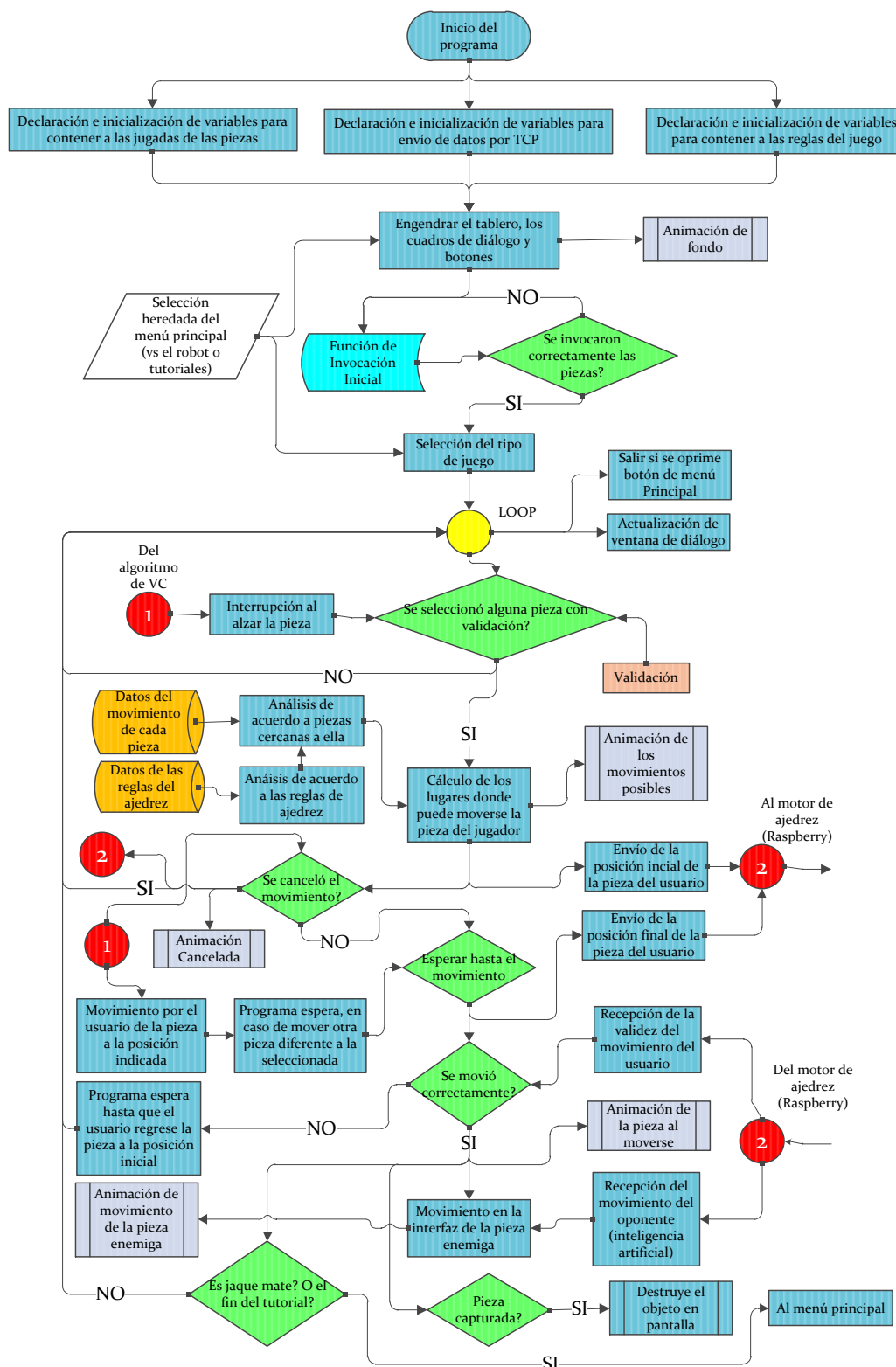


Figura 182. Diagrama de flujo del algoritmo de control con motor de ajedrez. Fuente: Propia.

3.6.1.5.2. Algoritmo de control con 2 jugadores humanos.

Para el juego entre dos personas se aplican las reglas del ajedrez que se desarrollaron en el algoritmo.

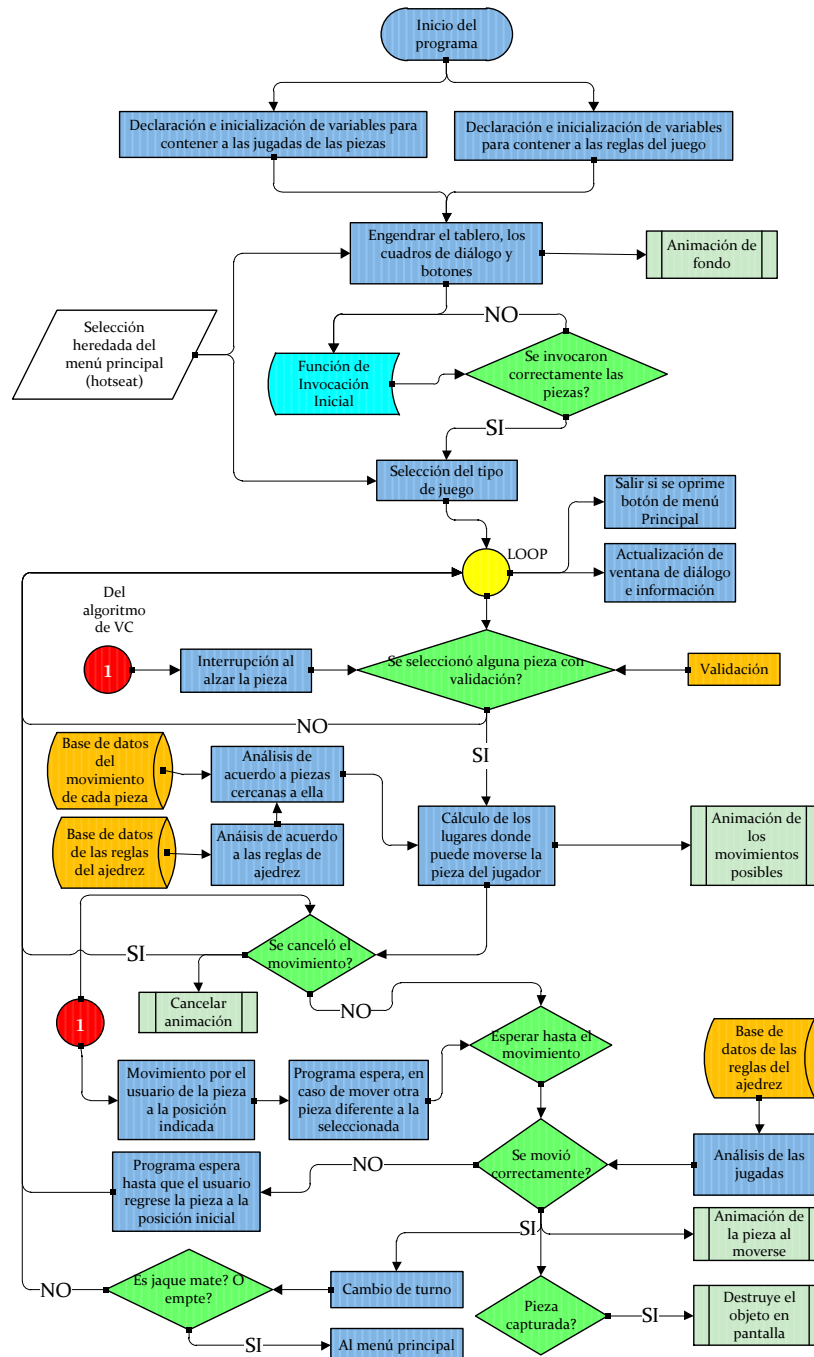


Figura 183. Diagrama de flujo del algoritmo de control sin robot.
Fuente: Propia.

3.6.1.6. Algoritmos específicos en el software de aplicación

El diagrama mostrado en la Figura 182 y Figura 183, describe el problema general solucionado del módulo central del control del tablero. Sin embargo, existen porciones de programación dependiendo de cada situación o condición al que el software se enfrente, enfrente, y que se encuentran implícitos en estos diagramas generales.

En tal virtud, se detallan cada uno de estos sub-módulos de programación.

Cálculo y algoritmo del centro del cuadro de ajedrez

Puesto que el manipulador robótico no tiene una implementación en su algoritmo que detalle la posición exacta de cada pieza (solo la posición preestablecida), es necesario limitar su rango de movimiento en el cuadro de ajedrez del tablero proyectado. De esta manera, el robot puede manipular en posiciones predeterminadas. Sin embargo esto conlleva a generar un código que permita limitar esta zona de detección tal como se muestra en la Figura 184. Después de varias pruebas se determinó una proporción de 0.4 unidades a cada lado para marcar una zona en la que el manipulador robótico reconozca como válida.

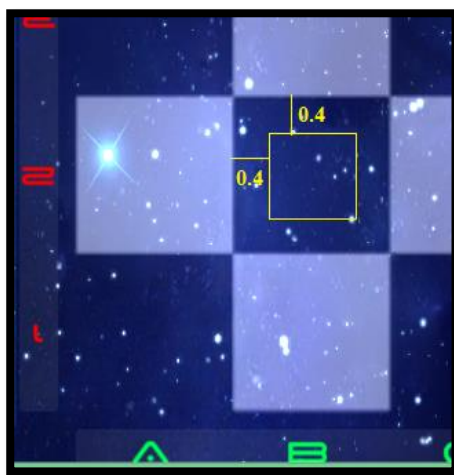


Figura 184. Zona delimitada para detectar el centroide del toque detectado.

Fuente: Propia.

Ahora este algoritmo presenta la siguiente secuencia de aplicación (Figura 185).

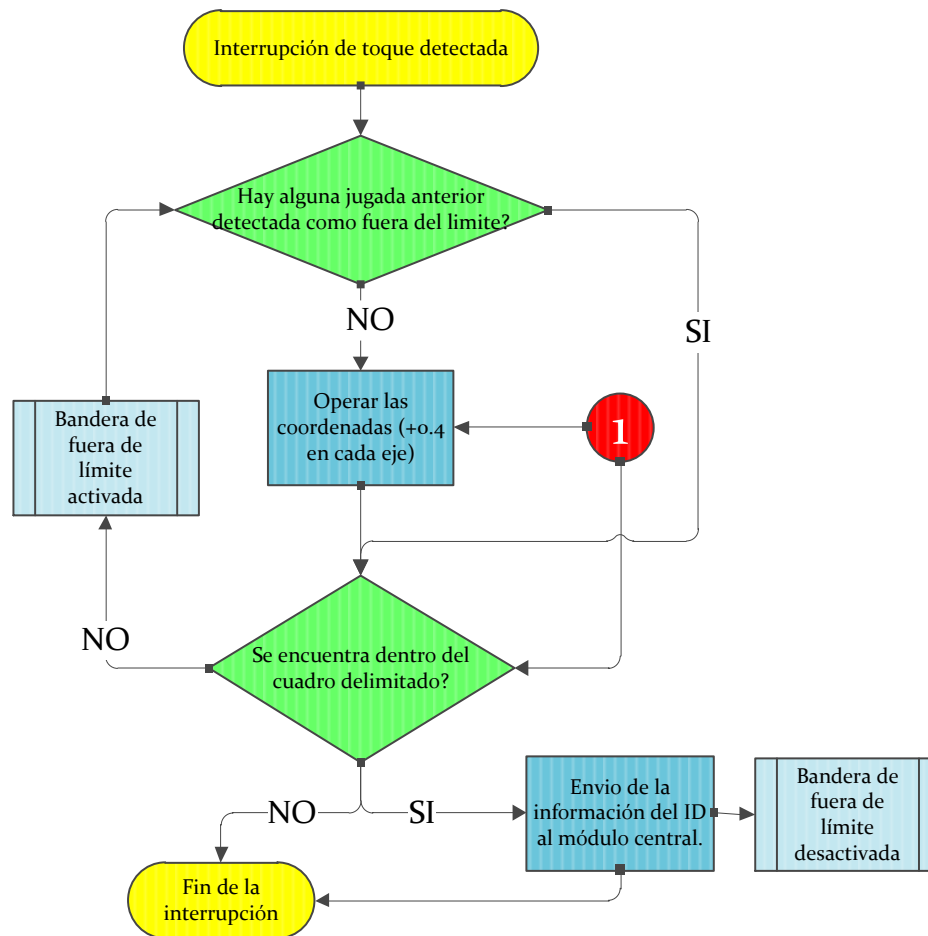


Figura 185. Diagrama de flujo para delimitar el cuadro.
Fuente: Propia.

Base de datos para determinar la validez del movimiento

Ya se determinó que existe una base de datos independiente del motor de ajedrez que tiene la información de todos los posibles movimientos de las piezas, y que a su vez el programa puede acceder cuando este necesite algún tipo de validación.

Pero la razón más importante para esta base de datos, es que se pueda realizar un análisis del movimiento y decidir su validez antes que el motor de ajedrez lo haga. Así se previenen errores frente a las entradas del usuario (el motor de ajedrez toma unos 5 a 8 segundos en responder por lo que el usuario puede realizar otras tareas que comprometerían el flujo normal del programa).

En la Figura 186 se muestra un error típico al poner la pieza a un lugar incorrecto. Este y otros problemas se solucionan en el algoritmo mostrado en el diagrama de la Figura 187.

187.



Figura 186. Error de pieza colocada en el lugar incorrecto.

Fuente: propia.

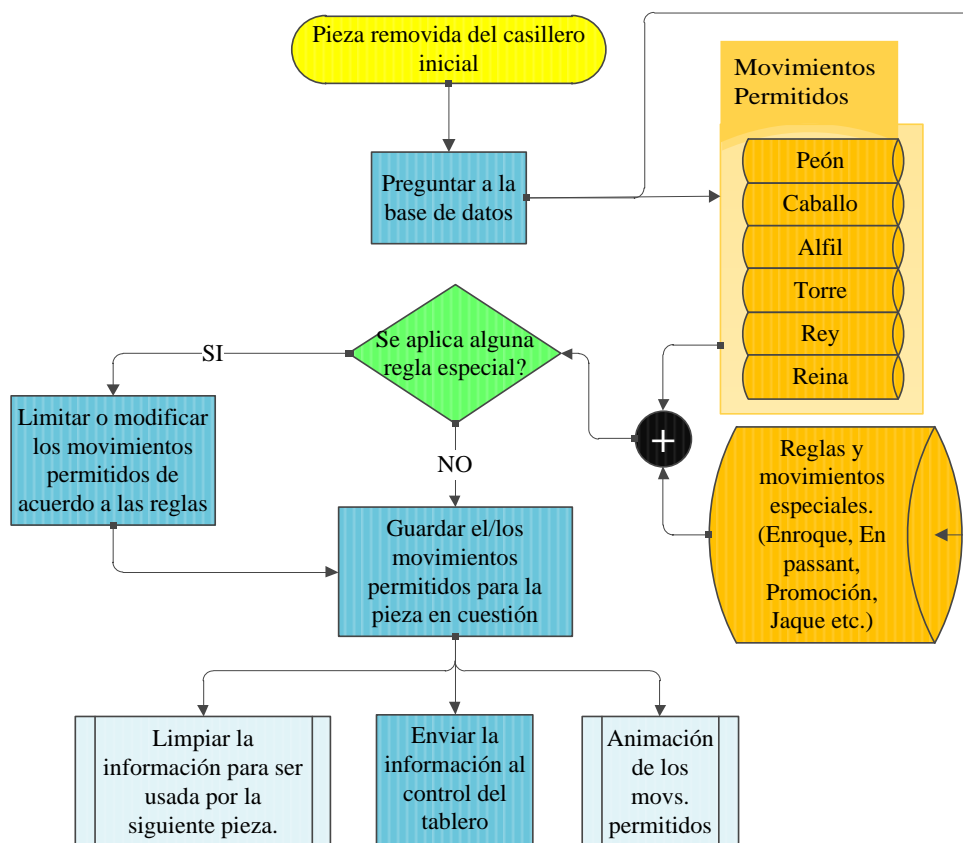


Figura 187. Algoritmo para acceder a la base de datos de movimientos y reglas.

Fuente: propia.

3.6.1.7. Subsistema 4. Animaciones

Dado que el objetivo principal del proyecto es diseñar una interfaz intuitiva e interactiva, el motor de Unity para animaciones fue ampliamente usado para lograr los efectos visuales y de sonido.

En la lista siguiente se detallan los efectos animados implementados.

- Entrada y salida de menús en sus transiciones.
- Efectos de degradación de color en los menús.
- Movimiento del sistema de partículas de Unity para generar el efecto de espacio abierto.
- Animación de los botones en el toque.
- Animación del gesto táctil obtenido de la visión artificial.
- Animación de las piezas en juego y sus posiciones.
- Animación del tablero.
- Efectos de sonido ante movimientos y eventos en la partida.
- Mensajes emergentes interactivos en la pantalla.
- Cuadro de diálogo e información interactivo.

En las siguientes figuras (Figura 188, Figura 189 y Figura 190) se visualizan algunos de los efectos realizados en Unity para este proyecto.

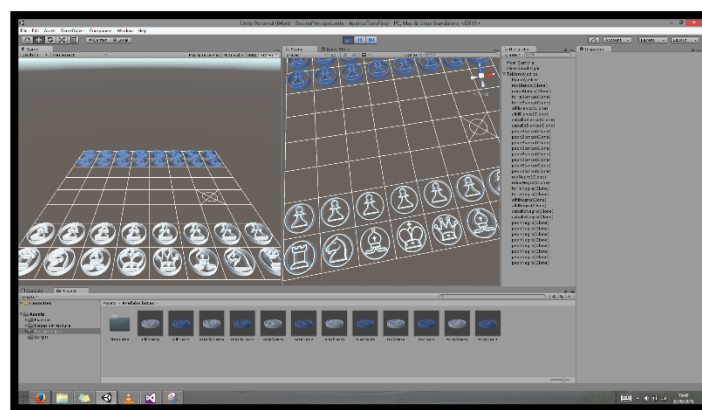


Figura 188. Piezas creadas en software CAD y renderizadas para usarse en Unity.

Fuente: propia.

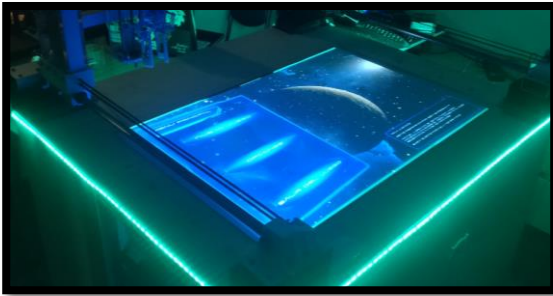


Figura 189. Animación de menús.
Fuente: Propia.



Figura 190. Animación del movimiento de una pieza.
Fuente: Propia.

3.7. Módulo 5: Sistema Eléctrico y Electrónico

Este último módulo muestra el proceso de diseño de los elementos electrónicos y como se acoplan entre sí. Se diseña el sistema eléctrico y electrónico para determinar el consumo. Además, se realiza el diseño de la placa PCB necesaria para la placa Arduino y también sus filtros y acoplamientos. Esto, sin olvidar el cableado estructurado de todo el sistema.

Antes de diseñar el sistema electrónico y eléctrico, es necesario conocer las consideraciones y requerimientos solicitados:

- Para el robot
 - Controlar los motores de manera independiente
 - Tener un control programado.
 - Poder sensar la posición inicial de cada motor en los ejes de movimiento
 - Soportar corrientes moderadamente altas y continuas
 - Lo más robusto posible ante descargas electroestáticas bajas, interferencias electromagnéticas, corrientes parásitas y efectos inductivos, capacitivos y resistivos no deseados de los cables y componentes.
 - Proveer energía constante al módulo.

- Para la comunicación
 - Soportar conexión TCP
 - Soportar conexión serial

- Soportar conexión USB

Con estas especificaciones, ahora es posible diseñar los componentes y sus conexiones.

Subsistema 1: Motores eléctricos

Para este caso, se considera el consumo de potencia que los motores van a ejercer para mover la estructura. Ya se ha determinado que mecánicamente los motores NEMA 23 y NEMA 17 son los adecuados para mover la estructura del robot, y los Servomotores para mover las pinzas del efector final.

3.7.1.1. Potencia y consumo de los motores

Con el dato de la potencia y consumo de los motores a pasos, se selecciona el driver adecuado y su fuente de alimentación.

Motor NEMA 23

De acuerdo al manual técnico del motor NEMA 23 (el más crítico en este proyecto) tomado de Schneider Electric, (2013) se tienen los siguientes parámetros.

$$I_{fase} = 3 \text{ Amps}$$

Que es la corriente de fase del motor.

De acuerdo a Schneider Electric, (2013) se recomienda usar voltajes entre 12 y 75 V para el motor NEMA 23. Como los motores no requieren de gran potencia se limita la corriente a 1.8 amperios en el controlador. Con este dato se tiene el consumo del motor:

$$P = V \times I = 12 \times 1.8 = 21.6 \text{ Watts}$$

Motor NEMA 17

También se usan en este proyecto motores NEMA 17, y de acuerdo a PBC Linear Co., (2013) se tiene la corriente de fase:

$$I_{fase} = 2 \text{ Amps}$$

También este fabricante recomienda voltajes de entre 12 y 36 Voltios. Este motor acepta corrientes de hasta 2 amperios, sin embargo, con 1.8 amperios es suficiente para lograr el movimiento.

$$P = V \times I = 12 \times 1.8 = 21.6 \text{ Watts}$$

Servomotor DS3218

Este motor se seleccionó para mover la base giratoria del efector, posee un torque de 20 Kg.cm. Se tiene que a 6 Voltios puede consumir hasta 1.3 Amperios de acuerdo al manual de AUTOBOTIC, (n.d.). Con ello se puede estimar la potencia que este motor requiere.

$$P = V \times I = 6 \times 1.3 = 7.8 \text{ Watts}$$

Servomotor Hitec HS-485HB

Este motor se seleccionó para las pinzas del gripper doble y genera 5 Kg.cm. Al funcionar con 5 Voltios consume hasta 150 mA. Se estima entonces la potencia:

$$P = V \times I = 6 \times 0.15 = 7.8 \text{ Watts}$$

3.7.1.2. Selección de los drivers para los motores

Puesto que la corriente necesaria para los motores llega hasta los 3 amperios, es preciso seleccionar un controlador que permita administrar la potencia del PWM a los motores en cada paso, y que además tenga protección contra sobre picos de corriente, variando la corriente.

Se adquirió un controlador dedicado para motores a paso HY-DIV268n con las siguientes características:

- Chipset TB6600
- Corriente de salida: Hasta 4.5 amperios
- Voltaje de operación: 12 a 42 Voltios
- Protección contra sobrecarga, sobrecorriente y sobrevoltaje
- Protección de apagado termal
- Peso de 200 gramos

Este driver se adapta perfectamente a las necesidades de los motores NEMA 23 y NEMA 17. En la Figura 191 se muestra la conexión realizada con los motores paso a paso.

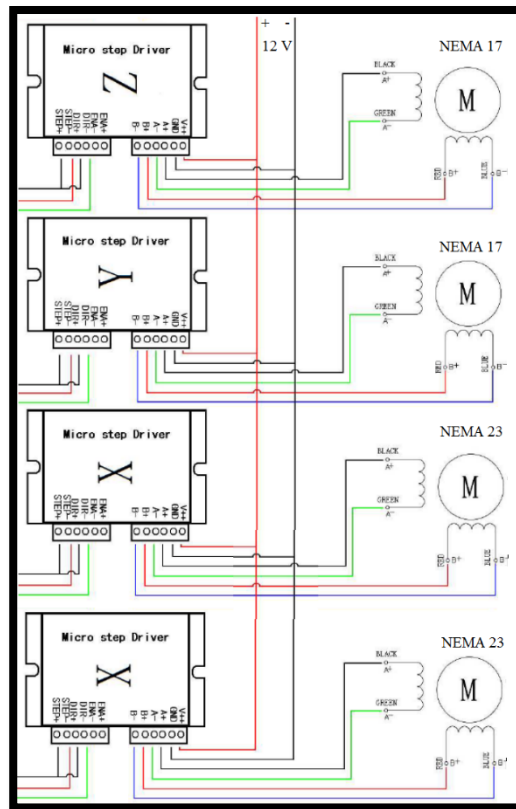


Figura 191. Conexión de los drivers a los motores a pasos.
Fuente: Propia.

3.7.1.3. Potencia en los Servomotores

Para suministrar la potencia en los servomotores es necesario proporcionar el voltaje de entre 4.8 a 6 voltios y que soporte las corrientes de estos motores. Para ello se ha optado por usar un convertidor DC-DC reductor. Este circuito produce una reducción del voltaje desde 12 voltios a los 5 Voltios. Se puede entonces, alimentar los 3 servomotores pues aguanta perfectamente corrientes de hasta 5 Amperios.

Subsistema 2: Componentes electrónicos

3.7.1.4. Potencia y Consumo de los componentes electrónicos (Arduino)

También es necesario conocer el consumo energético de los componentes electrónicos para tenerlos en cuenta al seleccionar la fuente. Sin embargo el único componente electrónico que tiene una carga para la fuente es la placa de control Arduino. El resto de componentes no consume demasiada energía. Y por ello se realiza un estimado.

En el Arduino se tiene un consumo de corriente aproximado de:

$$I = 81 \text{ mA}$$

Este dato se suma a la corriente que el circuito debe soportar y así poder dimensionar la fuente de poder.

3.7.1.5. Componentes electrónicos con fuente independiente.

Existen 2 componentes que forman parte del sistema y que poseen fuente independiente. Ellos son: Raspberry PI 2 y la tira de LEDs.

De aquí la fuente de la placa Raspberry posee una fuente de 5 V que puede entregar hasta 2 amperios.

Por último, la tira de LEDs es alimentada por un adaptador de 12 Voltios que entrega hasta 2.5 amperios.

3.7.1.6. Sensores.

Para la selección de los sensores, se tomaron en cuenta varios aspectos.

- Sean robustos pero pequeños
- Registren la posición inicial de cada eje móvil del robot
- Tengan la menor impedancia posible y no generen demasiadas EMIs

Con este preámbulo, es posible seleccionar dos sensores que cumplen con la teoría.

- Sensor Reed Switch
- Fin de Carrera

Tabla 70.

Características de los posibles sensores de posición.

Características del sensor Reed	Características del fin de carrera
Utiliza campo magnético para funcionar	Contacto puramente mecánico
Sensibilidad a factores externos de electromagnetismo	Robusto en ambientes con alto ruido

Soporta atmósferas muy adversas	Sensibilidad a falsos disparos sin un circuito anti rebote o de PULL UP
No soporta grandes valores de tensión y puede llegar a quemarse o desmagnetizarse en los sobre picos de corriente	Depende de la fuerza de acción y su velocidad de detección es pobre
Tamaño variable	Tamaño pequeño y mediano

Como se aprecia en la Tabla 70, el sensor de fin de carrera presenta características de robustez óptimas, aunque con velocidades de detección un poco lentas. Sin embargo, en el presente proyecto no representa un verdadero problema. Es así, que se seleccionaron los fines de carrera para detectar la posición de cada eje donde se encuentren presentes motores a pasos. Cabe recalcar que los servomotores no necesitan sensorización pues su posición es programable y conocida en todo momento. Por ello no se utilizan sensores para determinar el giro del eje del servomotor.

Subsistema 3: Diseño electrónico

3.7.1.7. Selección de la placa base (baquelita)

De acuerdo al manual de la IPC-2221A de la ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES, (2003) recomienda usar baquelitas con un grosor de entre 0.8 mm a 2.4 mm.

Además, se escoge una placa con norma C2 del mismo manual de la IPC-2221A el cual tiene dimensiones de 180 x 170 mm.

3.7.1.8. Diseño de la placa PCB

Para el diseño de la placa PCB se tienen los siguientes parámetros que deben ser considerados.

- Albergar a la placa Arduino Mega 2560
- Albergar el convertidor de voltaje DC-DC reductor
- Albergar los empaquetados de transistores Darlington
- Puerto Paralelo

- Condensadores de desacople y filtros
- Puertos para motores, fuente, botones, etc.

Así con estos requerimientos en mente, se tiene el diseño final de la placa PCB que albergará estos elementos como se muestra en la Figura 192 y Figura 193, detallados en la Tabla 71.

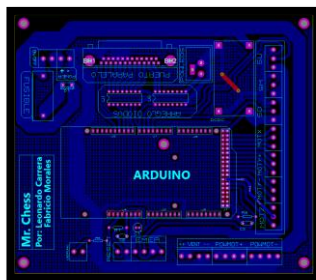


Figura 192. Placa PCB para el proyecto.
Fuente: Propia.

Se enlistan los elementos representativos de la placa PCB.

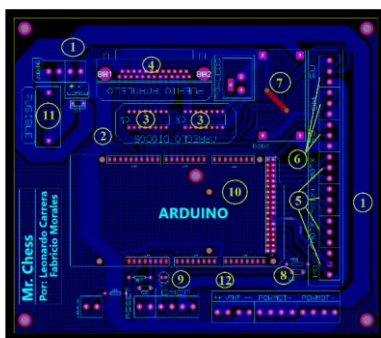


Figura 193. Placa PCB para el proyecto con los elementos representativos.
Fuente: Propia.

Tabla 71.

Componentes numerados que van en la placa PCB

No.	Componente
1	Línea de 12 Voltios
2	Plano de Tierra
3	Arreglo de transistores en configuración Darlington
4	Puerto Paralelo
5	Puertos para los drivers de los motores a pasos

6	Puertos para los cables de los servomotores
7	Convertidor DC-DC reductor a 5 V.
8	Circuito anti rebote
9	Circuito de desacople
10	Socket para Arduino Mega 2560
11	Fusible

En esta placa de acuerdo a los voltajes aplicados se recomienda una separación entre las pistas (de los puertos de entrada y salida de los motores y botones) de 0.1 mm.

De acuerdo al manual del IPC (ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES, 2003), es necesario separar los circuitos de alta frecuencia con los de baja frecuencia, para así evitar posibles retrasos de propagación. Así, como se observa en la Figura 192, la placa de control Arduino se encuentra en el centro lo más aislada posible de los puertos de entrada y salida de baja y media frecuencia. Esto se debe a que se usa la comunicación Serial y esta suele ser de alta frecuencia.

También se efectúa un mallado de tierra para evitar altas impedancias que son portadoras de emisiones de RF y corrientes parásitas. Al estar expuesto a mucho ruido electromagnético por la gran cantidad de cables que a su vez son largos, es necesario implementar condensadores de desacople cerca de los circuitos de control para minimizar la impedancia del circuito (Figura 194).

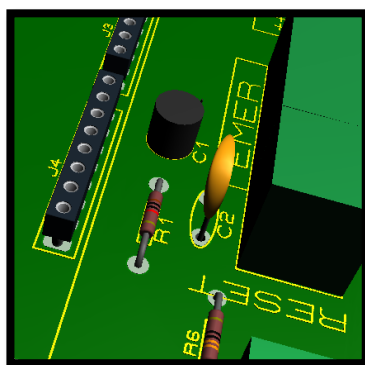


Figura 194. Condensadores de desacople en la placa PCB simulada.

Fuente: Propia.

Este circuito también cuenta con desacople de las señales semi-críticas como son las de los sensores y así evitar disparos falsos. Aquí se usan circuitos anti rebotes (Figura 195).

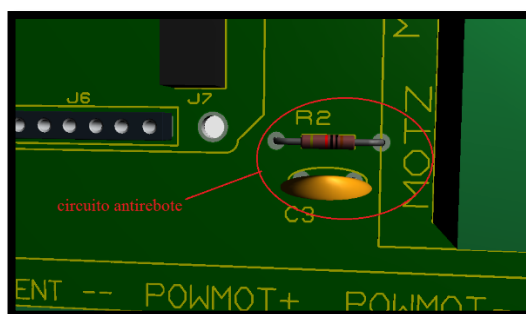


Figura 195. Circuito anti rebote para un pulsador en la placa PCB simulada.

Fuente: Propia.

Para la protección del circuito y sus componentes, el circuito también cuenta con un diodo antirretorno de 10 amperios y un fusible de 15 amperios (Figura 196).

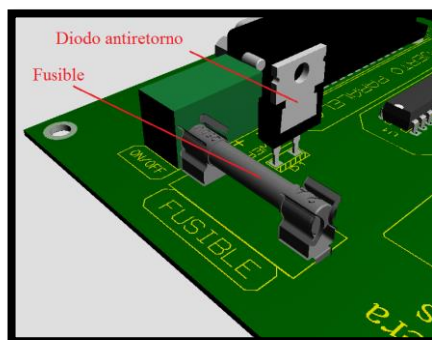


Figura 196. Fusible y diodo antirretorno en la placa PCB simulada.

Fuente: Propia.

3.7.1.9. Conexiones generales de la electrónica de este proyecto.

Como último paso, se muestra la conexión de todos los componentes importantes del circuito controlador del sistema (Figura 197). Nótese la presencia de los fines de carrera en la parte inferior derecha y el pulsador de emergencia.

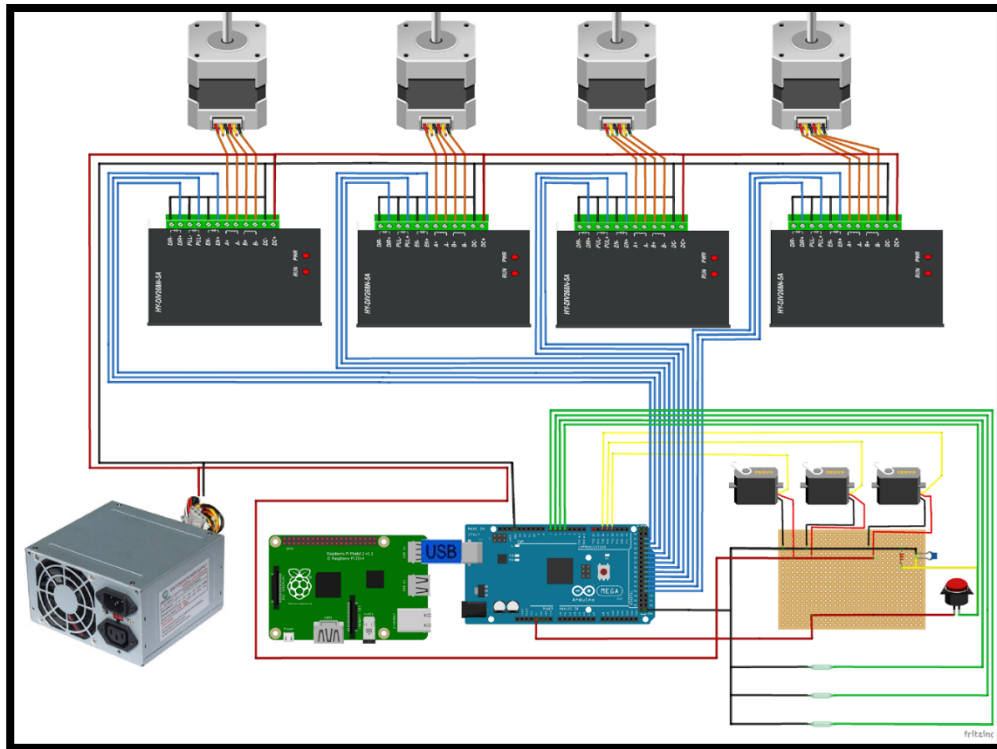


Figura 197. Conexión general del sistema electrónico.

Fuente: Propia.

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

En el actual capítulo se describen los procesos mecánicos utilizados en la manufactura y construcción de las partes que componen el sistema. Se presenta a detalle la implementación y ensamble del robot y del efector final, así como los resultados procedentes de pruebas físicas tanto por software como por posicionamiento mecánico.

4.1. Implementación

4.1.1. Manipulador robótico

Para el manipulador robótico se utilizaron algunos procesos de manufactura por medio de los cuales se clasificaron a las partes del mismo.



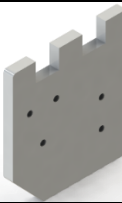
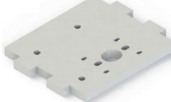



4.1.1.1. Corte Láser del acrílico PMMA









El manipulador robótico cartesiano posee partes en acrílico PMMA. Por ende, debe ser mecanizado con el método de corte por láser de CO_2 . Este método tiene la ventaja de evitar el desperdicio del acrílico y de lograr complicadas y precisas formas.











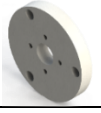
Para cortar las formas del acrílico PMMA vistas en la Tabla 72, se contrató un servicio de corte por láser con CO_2 , que contaba con un haz de 100 Watts de potencia. De acuerdo al material y al espesor, se puede calcular el tiempo de fabricación. Con el manual para el corte láser de Hurricane Laser, (n.d.) se tienen las velocidades de corte para los acrílicos de 9 mm, 6 mm, y 3 mm, que son: $5 \frac{mm}{seg}$, $15 \frac{mm}{seg}$, y $40 \frac{mm}{seg}$ respectivamente.



Con el valor de la velocidad respectivo para cada espesor, se calcula el tiempo de corte de cada pieza mostrada en la última columna de la Tabla 72.

Tabla 72.
Piezas del manipulador robótico cortadas en láser.

Nº	Croquis	Nombre	Material	Operación	Tiempo de corte
1		Soporte transversal	PMMA	Corte Láser CO2	5.11 min.
2		Soporte transversal posterior	PMMA	Corte Láser CO2	6.24 min
3		Pared codo frontal	PMMA	Corte Láser CO2	1.9522 min
4		Pared codo superior izquierdo	PMMA	Corte Láser CO2	2.54 min
5		Pared codo posterior izquierdo	PMMA	Corte Láser CO2	2.33 min
6		Pared codo superior derecho	PMMA	Corte Láser CO2	2.78 min
7		Espaciador de acrílico	PMMA	Corte Láser CO2	0.331 min
Continúa ➡					

8		Preeje vertical	PMMA	Corte Láser CO2	4.449 min
9		Armazón lateral motor NEMA 17	PMMA	Corte Láser CO2	0.714 min (x2)
10		Armazón superior motor NEMA 17	PMMA	Corte Láser CO2	0.425 min
11		Tapa frontal eje vertical	PMMA	Corte Láser CO2	0.748 min (x2)
12		Tapa lateral eje vertical	PMMA	Corte Láser CO2	0.8 min (x2)
13		Tapa superior eje vertical	PMMA	Corte Láser CO2	0.341 min
14		Tapa del gripper	PMMA	Corte Láser CO2	1.453 min
15		Pared Gripper	PMMA	Corte Láser CO2	3.002 min (x2)
					Continúa ➡

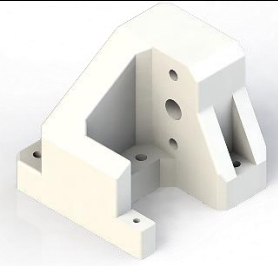
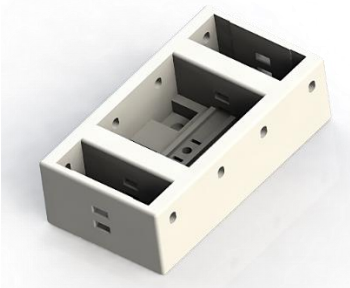

16		Base tope del servo	PMMA	Corte Láser CO2	3.68 min (x2)
17		Engrane conducido gripper	PMMA	Corte Láser CO2	0.22 min (x2)
18		Engrane conductor gripper	PMMA	Corte Láser CO2	0.22 min (x2)
19		Eslabón 2	PMMA	Corte Láser CO2	0.28 min (x4)
20		Base tope del servo 2	PMMA	Corte Láser CO2	0.504 min (x2)
21		Atrapapieza	PMMA	Corte Láser CO2	0.492 min (x2)
22		Tapa Esponja Atrapaieza	PMMA	Corte Láser CO2	0.12 min (x2)
23		Soporte A1	PMMA	Corte Láser CO2	0.248 min (x2)
24		Soporte A2	PMMA	Corte Láser CO2	0.248 min (x2)
25		Soporte B7	PMMA	Corte Láser CO2	0.16 min (x2)
26		Soporte B8	PMMA	Corte Láser CO2	0.16 min (x2)
					Continúa ➡



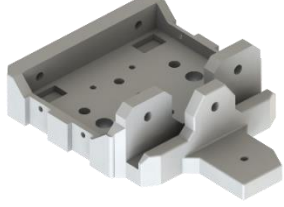
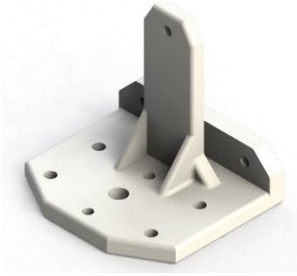
27		Base de tapa	PMMA	Corte Láser CO2	0.218 min (x2)
28		Alza de tope servo	PMMA	Corte Láser CO2	0.14 min (x2)
SUMA:					39.635 min

4.1.1.2. Impresión 3D

Se utilizó el proceso de prototipado rápido de impresión 3D en varias piezas del manipulador como se muestra en la Tabla 73.

Tabla 73.
Piezas del manipulador robótico impresas en 3D

Nº	Croquis	Nombre	Material	Operación
1		Soporte eje piñón GT2 (izquierdo)	ABS	Prototipado 3D
2		Soporte columna y cojinetes (izquierdo)	ABS	Prototipado 3D
3		Acople paredes de acrílico y columnas (izquierdo)	ABS	Prototipado 3D
				Continúa ➡

4		soporte eje piñón GT2 (derecho)	ABS	Prototipado 3D
5		Acople paredes de acrílico y columnas (derecho)	ABS	Prototipado 3D
6		Soporte efector final, cojinetes y tuerca en eje vertical	ABS	Prototipado 3D
7		Soporte superior eje z	ABS	Prototipado 3D
8		Soporte inferior eje z	ABS	Prototipado 3D

Se utilizó la impresora 3D MakerBot Replicator con las configuraciones mostradas en la Tabla 74.

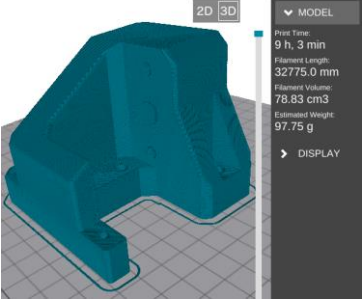
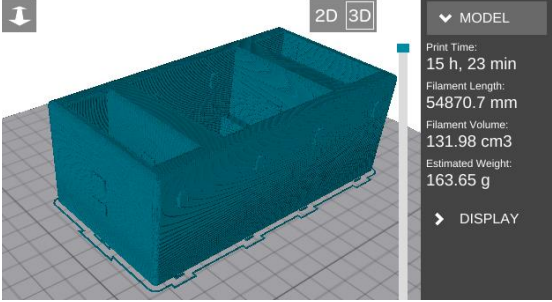
Tabla 74.**Configuraciones establecidas para la impresión de las partes del robot**

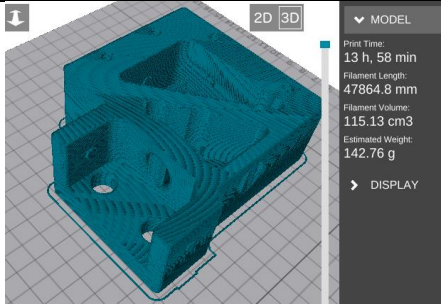
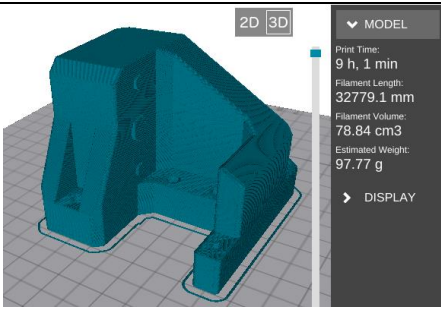
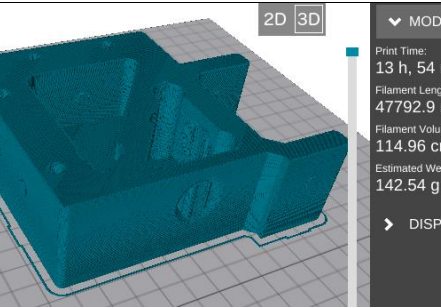
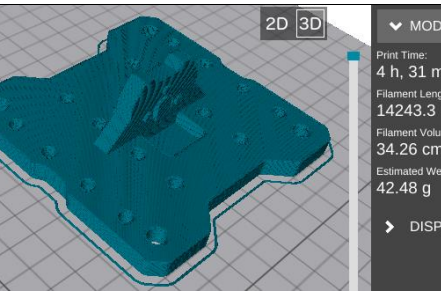
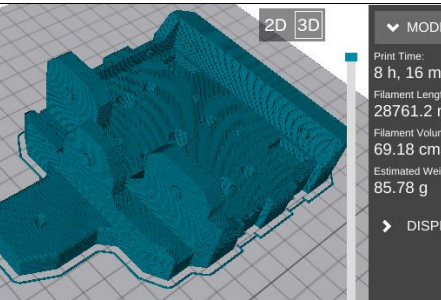
Configuración	Especificación
Espesor de capa	0.2 mm
Material	ABS
Material de soporte	3.5 mm
Mallado	Triangular
Temperatura del extrusor	235°
Temperatura de la cama	95°
Densidad	80%

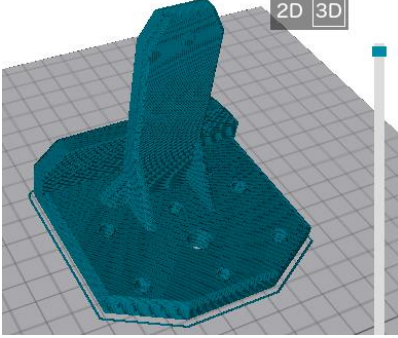
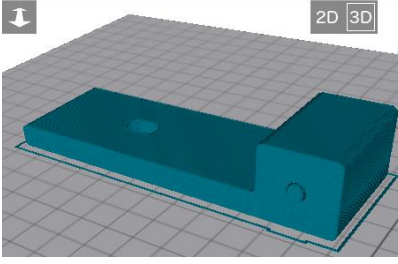
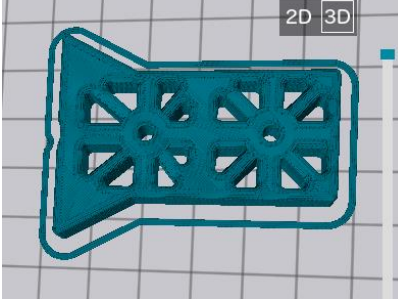
Tiempos de impresión 3D

Se presenta el tiempo de impresión para cada pieza, utilizando las configuraciones previamente establecidas como se muestra en la Tabla 75.

Tabla 75.**Tiempos de impresión 3D de las partes del robot**

N°	Imagen con características de impresión	Nombre	Tiempo de impresión
1		Soporte eje piñón GT2 (izquierdo)	9 h, 3 min
2		Soporte columna y cojinetes (izquierdo)	15 h, 23 min
Continúa ➡			

3		Acople paredes de acrílico y columnas (izquierdo)	13 h, 58min
4		soporte eje piñón GT2 (derecho)	9 h, 1 min
5		Acople paredes de acrílico y columnas (derecho)	13 h, 54 min
6		Soporte efector final, cojinetes y tuerca en eje vertical	4 h,31 min
7		Soporte superior eje z	8 h, 16 min
Continúa ➡			

8	 <div data-bbox="767 232 916 568"> <p>2D 3D</p> <p>MODEL</p> <p>Print Time: 5 h, 47 min</p> <p>Filament Length: 17909.7 mm</p> <p>Filament Volume: 43.08 cm³</p> <p>Estimated Weight: 53.42 g</p> <p>DISPLAY</p> </div>	Soporte inferior eje z	5 h, 46 min
9	 <div data-bbox="767 591 916 853"> <p>2D 3D</p> <p>MODEL</p> <p>Print Time: 2 h, 37 min</p> <p>Filament Length: 9905.8 mm</p> <p>Filament Volume: 23.83 cm³</p> <p>Estimated Weight: 29.54 g</p> <p>DISPLAY</p> </div>	Acople de acrílicos PMMA	2 h, 37 min
10	 <div data-bbox="767 871 916 1173"> <p>2D 3D</p> <p>MODEL</p> <p>Print Time: 53 min</p> <p>Filament Length: 2020.1 mm</p> <p>Filament Volume: 4.86 cm³</p> <p>Estimated Weight: 6.03 g</p> <p>DISPLAY</p> </div>	Soporte Clamp T2	53 min
Tiempo Total			83 h, 22 min

4.1.1.3.Mecanizado

Como se ha mencionado, algunas de las partes están conformadas por acero inoxidable y aluminio. Estas se enlistan en la Tabla 76 junto con el tiempo de fabricación (corte, pulido y/o pintado).

Tabla 76.
Piezas metálicas para mecanizar.


No.	Pieza	Material	Tiempo de Fabricación
1	Varilla 20 mm	Acero AISI 1060	Corte: 10 min
2	Tubo rectangular para columnas	Aluminio 7075 T6	Corte y agujeros: 15 min
3	Ángulo de acople de columnas	Hierro dúctil	Corte: 15 min, Pulido; 50 min, pintado: 30 min.
4	Perfil en X	Aluminio 7075 T6	Corte: 10 min
5	Varilla de 8 mm	Acero inoxidable	Corte: 8 min
6	Tubo cuadrado anti fleje.	Aluminio	Corte: 20 min
7	Eje para GT2	Acero inoxidable 8 mm.	Corte: 10 min, refrentado y desbastado; 60 min
			SUMA: 228 min

Se realizaron hojas de procesos para la construcción y el mecanizado de las piezas metálicas (Tabla 77 y Tabla 78).

Tabla 77.
Hoja de procesos del eje GT2.

HOJA DE PROCESOS – EJE PARA GT2				
Dimensiones				
Encargados		Leonardo Carrera C. Fabricio Morales M.		
Elemento	Material	Operaciones	MMHH	Tiempo
	Varilla de acero inoxidable 8 mm	Trazado	Pie de Rey Micrómetro Punzón Gramil	5 min
		Corte	Sierra	10 min
		Refrentado de caras	Torno, Cuchilla	20 min
		Desbaste de eje	Torno, Cuchilla	40 min
		Pulido	Amoladora	2 min

Tabla 78.**Hoja de procesos del ángulo de acople de columnas.**

HOJA DE PROCESOS – ÁNGULO DE ACOPLE DE COLUMNAS				
Dimensiones				
Encargados		Leonardo Carrera C. Fabricio Morales M.		
Elemento	Material	Secuencia de operaciones	MMHH	Tiempo
	Hierro dúctil	Marcado de medidas	Pie de Rey Punzón Gramil	2 min
		Corte	Sierra	10 min
		Pulido	Amoladora , Lija	40 min
		Pintura	Spray de pintura	40 min

Como se observa, no existen hojas de procesos para los otros tubos y elementos de acero pues no necesitan de un trabajo muy detallado ni necesitan de varios procesos de manufactura. En lugar de ello, en la Tabla 72 se especifican los procesos realizados. En la Figura 198, Figura 199 y Figura 200, se observan dichos procesos.

**Figura 198.** Pulido del ángulo de acople de columnas



Figura 199. Cortes en tubos



Figura 200. Fabricación de agujeros en tubo cuadrado de aluminio.

Mesa de madera

Como se puede observar en la Figura 201, la Figura 202 y la Figura 203 se presenta el proceso para la construcción de la mesa de madera. En la Figura 204 se presenta el ensamble que cumple con los criterios de diseños establecidos en la presente investigación.



Figura 201 Proceso de trazado para la mesa de madera



Figura 202. Proceso de corte para la mesa de madera



Figura 203. Proceso de clavado y lijado para la mesa de madera



Figura 204. Ensamble de la mesa de madera

En la Tabla 79 se tiene la hoja de procesos para la mesa de madera y todos sus procesos realizados.

Tabla 79.

Hoja de procesos de la mesa de madera.

HOJA DE PROCESOS - MESA DE MADERA				
Dimensiones				
Encargados		Leonardo Carrera C. Fabricio Morales M.		
Elemento	Material	Secuencia de operaciones	MMHH	Tiempo
Estructura caja 	Madera Pino Valsain 4 mm	Trazado	Metro Escuadra Punzón Compás Gramil	20 min
		Corte	Corte con segueta	180 min
		Limado	Prensa Lima	20 min
		Lijado	Papel de lija	20 min
		Clavado	Clavos Martillo	40 min

4.1.1.1. Ensamble del Manipulador robótico

Una vez construidas las piezas y con la mesa completa, se procede con el proceso de armado del manipulador. Para entender el proceso de armado del robot, se especifica en Tabla 80 el proceso de armado.

Tabla 80.

Proceso de armado del manipulador cartesiano.

Paso	Etapa de Armado
1	Armado del sistema de ejes vertical
2	Sujeción del sistema de ejes verticales a los elementos del eje transversal
3	Armado del sistema de ejes Transversal
4	Calibración de las guías del eje transversal con el eje vertical
5	Armado del sistema de ejes longitudinal
6	Acoplamiento del eje longitudinal con el eje transversal.
7	Calibración de las guías del eje longitudinal con el eje transversal

Armado del sistema de eje vertical

Como primer paso, se realiza el armado del eje vertical. Para ello se acoplan las piezas del eje vertical para que adopten la forma vista en la Figura 205. Y completo en la Figura 206.



Figura 205. Armado del Eje Vertical.

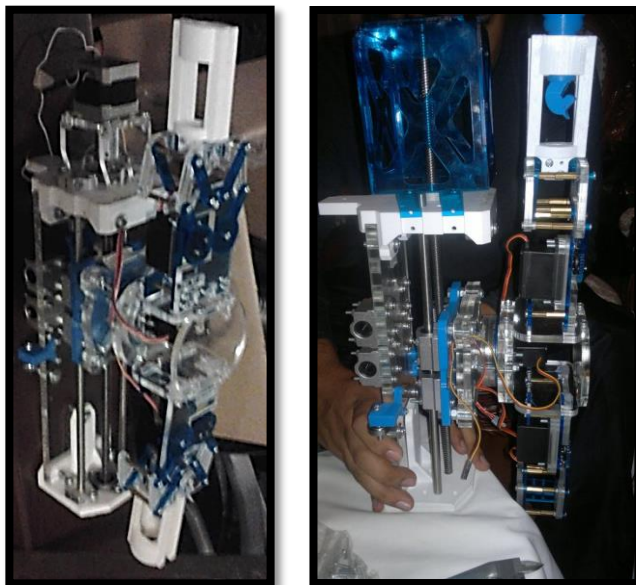


Figura 206. Sistema de ejes vertical armado con el gripper.

Sujeción del sistema de ejes verticales a los elementos del eje transversal

Una vez realizado el armado del sistema de eje vertical, se debe acoplar el sistema a las guías del eje transversal. Este paso se visualiza en el la Figura 207.

En este paso también se calibran las guías del eje transversal con el carro del sistema de eje vertical para que deslicen sin fricción en todos sus puntos de contacto, y que no existan juegos ni fricciones inesperadas.

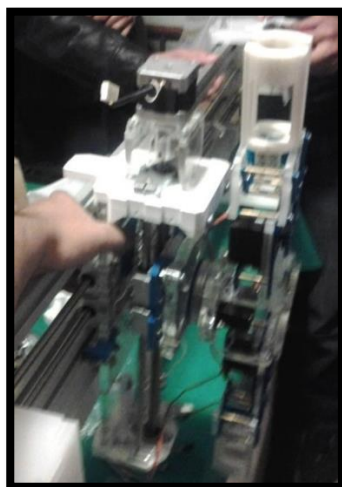


Figura 207. Sistema de eje vertical acoplado a los ejes transversales.

Armado del sistema de ejes transversal

Una vez acoplado el sistema vertical a los ejes, es necesario implementar las columnas del sistema de ejes transversal a los perfiles y varillas. Este proceso se muestra en la Figura 208 y el ensamble en la Figura 209.

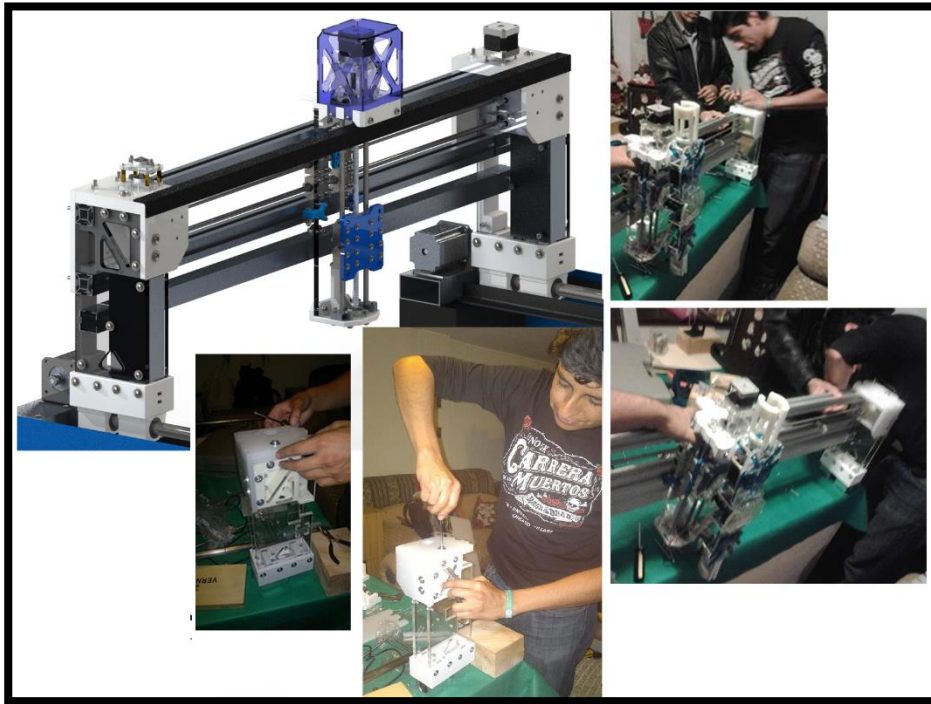


Figura 208. Armado del Eje Transversal.

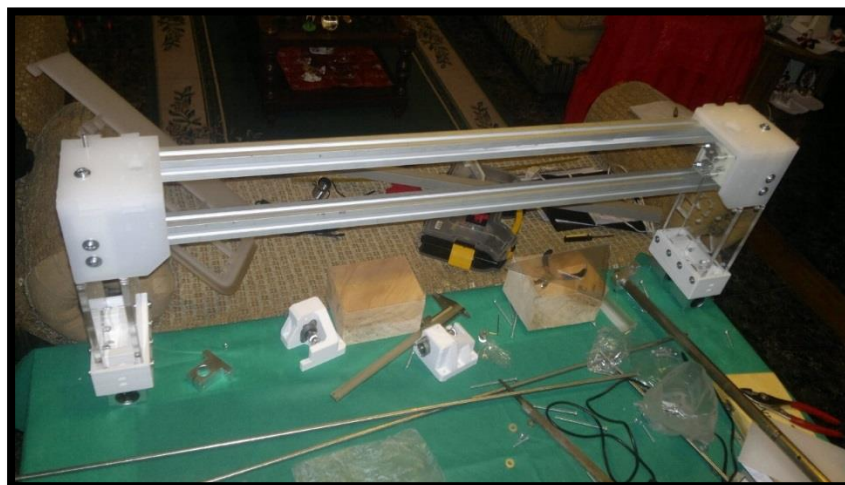


Figura 209. Eje transversal armado casi en su totalidad.

Armado del sistema a los ejes longitudinales.

Hasta aquí, se ha visto el armado de 2 ejes del robot, entonces, se sigue con el proceso de acoplar los ejes longitudinales al armazón transversal como se muestra en la Figura 210.

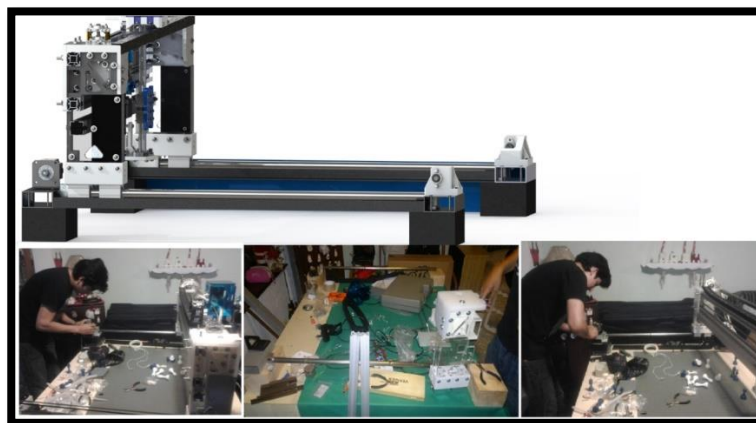


Figura 210. Armado del Eje longitudinal.

Ensamble Completo del robot y sujeción a la mesa

Como último paso, se tiene el ensamble del robot y su proceso de fijación a la mesa. Para ello es necesario atornillar los soportes SK20 del robot a los soportes de madera que irán fijados con ángulos de hierro a la mesa como se observa en la Figura 211. En la Figura 212 se observa la sujeción portátil del robot a la mesa.



Figura 211. Ensamble completo del robot.

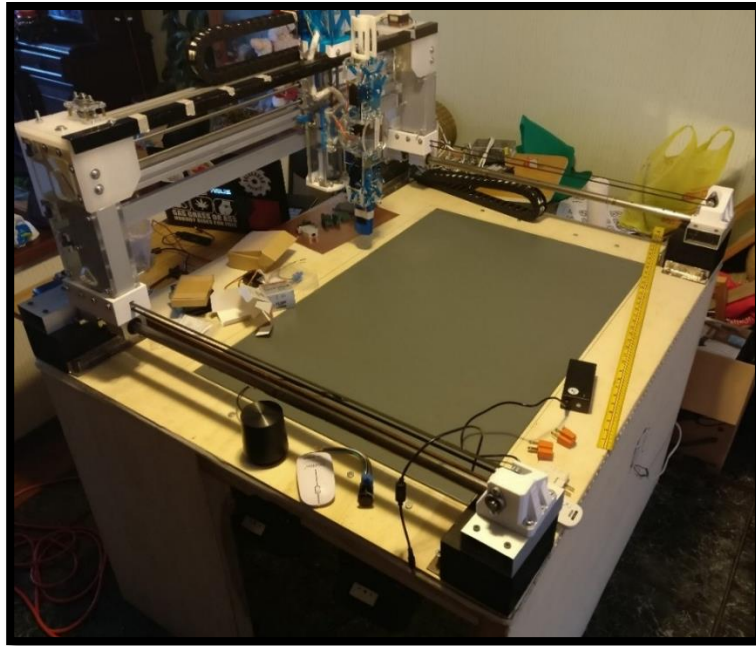


Figura 212. Ensamble del robot sujeto a la mesa con los ángulos en cada extremo.

4.1.2. Efector final

Posterior al diseño se procedió a construir los componentes del efector por medio de los procesos que se describen a continuación.

4.1.2.1. Impresión 3D

Los dedos utilizados en el efector se elaboraron con el proceso de prototipado 3D con plástico ABS siguiendo las configuraciones establecidas en la Tabla 74. El efector final está constituido de dos pinzas por lo cual se imprimieron cuatro dedos; dos de color blanco y dos de color azul (Figura 213).

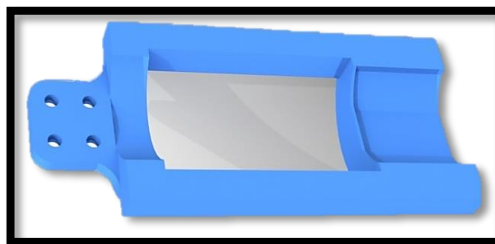


Figura 213. Renderizado del dedo del efector final

Tiempos de impresión 3D

El tiempo de impresión para cada una de los dedos es de 1 hora y 57 minutos como se observa en la Figura 214. Como se imprimió 4 veces la misma pieza se tiene un tiempo total de impresión para el proceso de 7 horas con 48 minutos.

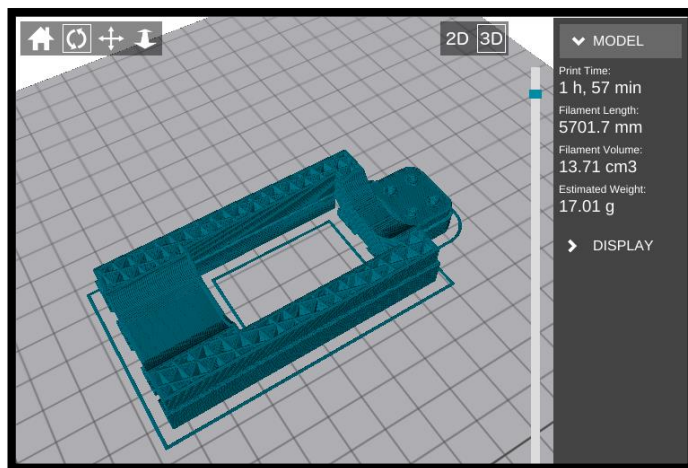


Figura 214. Tiempo de impresión 3D del dedo del efector final

En la Figura 215 se muestra el resultado final de la impresión que cumple con el diseño previamente realizado.



Figura 215. Dedos del efector final impresos en 3D

Ensamble del efector final

Posterior a la construcción de los componentes por medio de los procesos previamente descritos se realizó el ensamble del efector final. Se acoplan todos los componentes

siguiendo el diseño preestablecido en cada pinza, se atornillan los dedos impresos de la Figura 215 en los extremos como se muestra en la Figura 216.

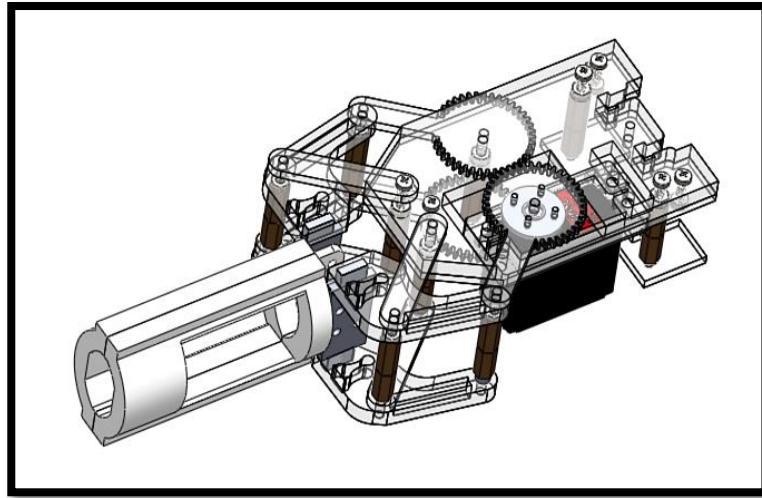


Figura 216. Ensamble de la pinza del efector final

Luego del ensamble de las pinzas individuales, se realiza el acople con la base giratoria que permitirá el cambio de pinza como se muestra en la Figura 217.

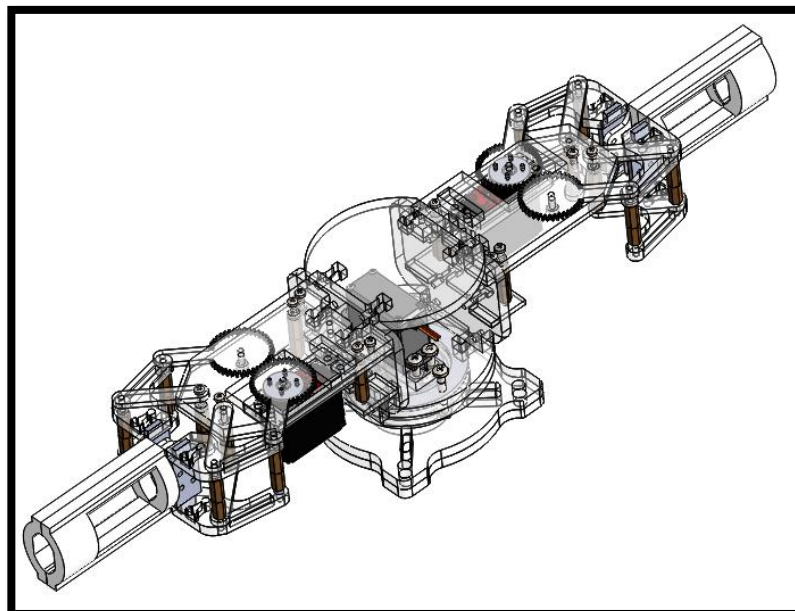


Figura 217. Ensamble del efector final

Finalmente, concluido el ensamble del efector final se realiza el acople con el eje Z, y se verifica dimensiones y la trasmisión de movimiento producido por el tornillo sin fin como se muestra en la Figura 219.

4.1.2.2. Ensamble del robot con el eje Z

En la Figura 218 se muestra el ensamble del robot con el gripper adaptado.

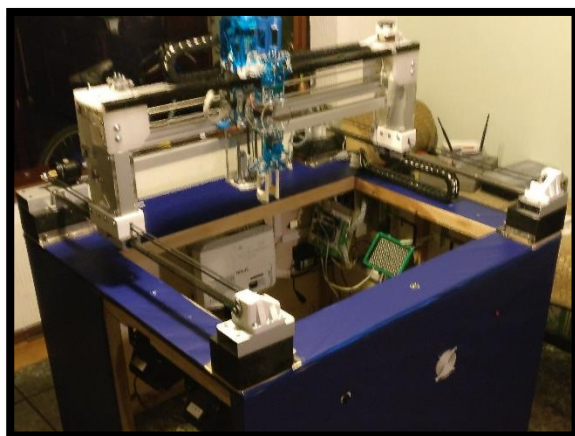


Figura 218. Ensamble del robot con el gripper.

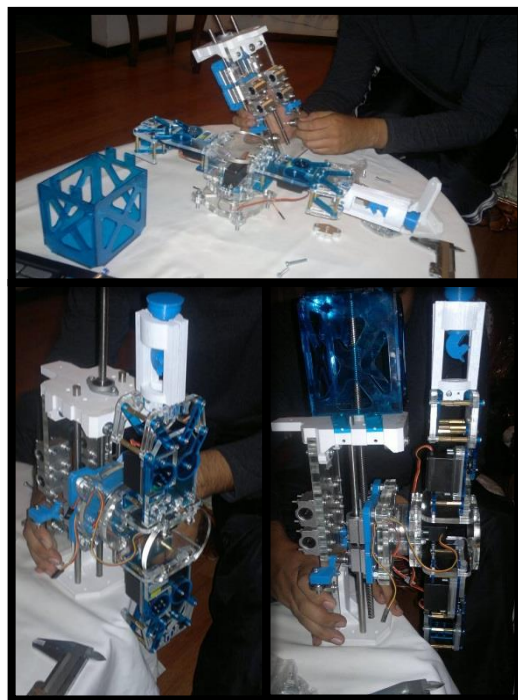






Figura 219. Ensamble del efector final con el eje Z.

4.1.3. Piezas de ajedrez

El proceso de prototipado rápido 3D fue utilizado en la elaboración de las piezas de ajedrez. Para el juego completo se utilizó material de color blanco para las piezas claras, mientras que para las piezas opacas se utilizó el color azul (Tabla 81).

Tabla 81.**Proceso de manufactura de las piezas de ajedrez**

N°	Croquis	Nombre	Material	Operación
1		Rey	ABS	Prototipado 3D
2		Reina	ABS	Prototipado 3D
3		Torre	ABS	Prototipado 3D
4		Alfil	ABS	Prototipado 3D
				Continúa ➡

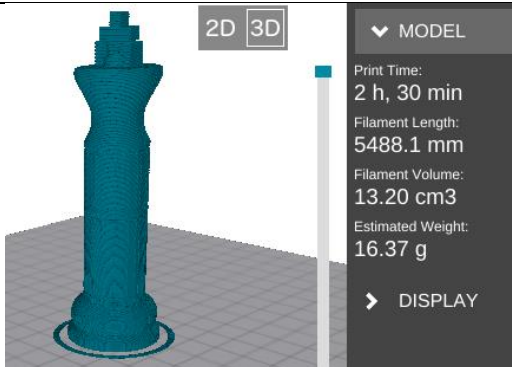
5		Caballo	ABS	Prototipado 3D
6		Peón	ABS	Prototipado 3D

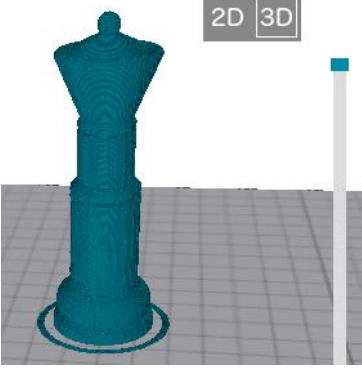
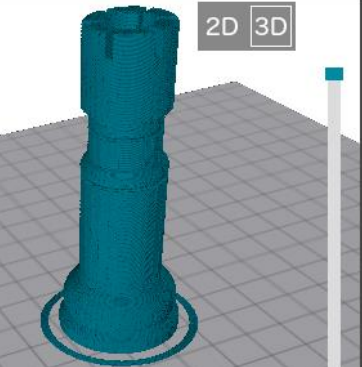
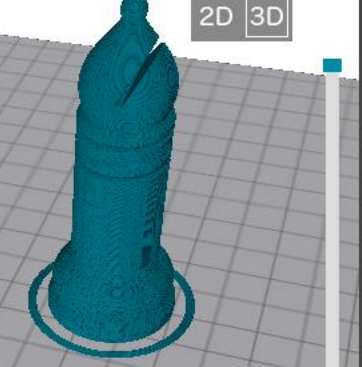
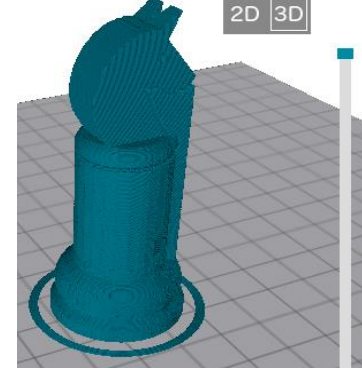
Tiempos de impresión 3D

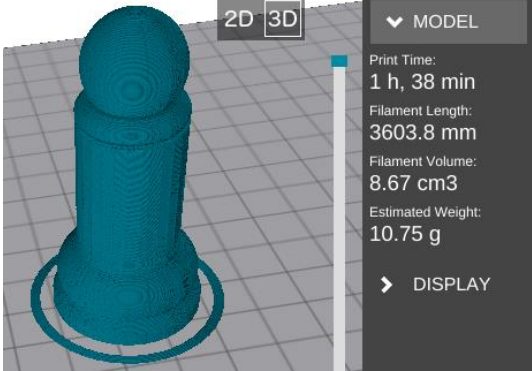
Se presenta el tiempo de impresión para cada pieza y el tiempo total de impresión 3D, utilizando las configuraciones previamente establecidas se tiene un tiempo de 24 horas con 36 minutos como se muestra en la Tabla 82.

Tabla 82.

Tiempos de impresión de las piezas de ajedrez

Nº	Imagen con características de impresión	Nombre	Tiempo de impresión
1		Rey	2 h, 30 min
			Continúa ➡

2	 <p>2D 3D</p> <p>▼ MODEL</p> <p>Print Time: 2 h, 23 min</p> <p>Filament Length: 5198.2 mm</p> <p>Filament Volume: 12.50 cm³</p> <p>Estimated Weight: 15.50 g</p> <p>► DISPLAY</p>	Reina	2 h, 23 min
3	 <p>2D 3D</p> <p>▼ MODEL</p> <p>Print Time: 2 h, 4 min</p> <p>Filament Length: 4695.7 mm</p> <p>Filament Volume: 11.29 cm³</p> <p>Estimated Weight: 14.01 g</p> <p>► DISPLAY</p>	Torre	2 h, 4 min
4	 <p>2D 3D</p> <p>▼ MODEL</p> <p>Print Time: 1 h, 54 min</p> <p>Filament Length: 4207.9 mm</p> <p>Filament Volume: 10.12 cm³</p> <p>Estimated Weight: 12.55 g</p> <p>► DISPLAY</p>	Alfil	1 h, 54 min
5	 <p>2D 3D</p> <p>▼ MODEL</p> <p>Print Time: 1 h, 49 min</p> <p>Filament Length: 3787.3 mm</p> <p>Filament Volume: 9.11 cm³</p> <p>Estimated Weight: 11.30 g</p> <p>► DISPLAY</p>	Caballo	1 h, 49 min
Continúa ➡			

6		Peón	1 h, 38 min
Tiempo total de las piezas blancas			12 h, 18 min
Tiempo total de las piezas azules			12 h, 18 min
Tiempo total			24 h, 36 min

El proceso utilizado para la impresión de las piezas se basa en el control de la impresión (Figura 220), el relleno de las piezas con material de aporte y de soporte con mallado triangular (Figura 221 y Figura 222), y finalmente el retiro de las piezas impresas (Figura 223).

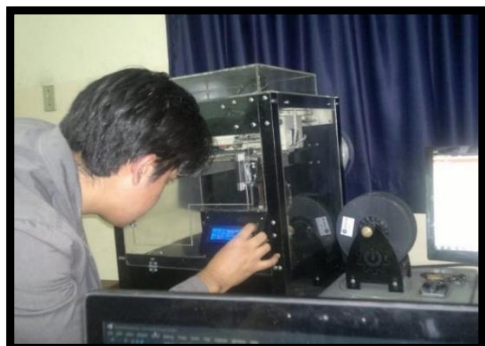


Figura 220. Control de la impresión 3D

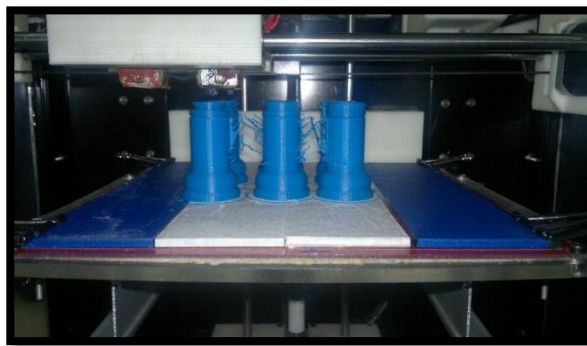


Figura 221. Impresión 3D de las piezas de ajedrez.

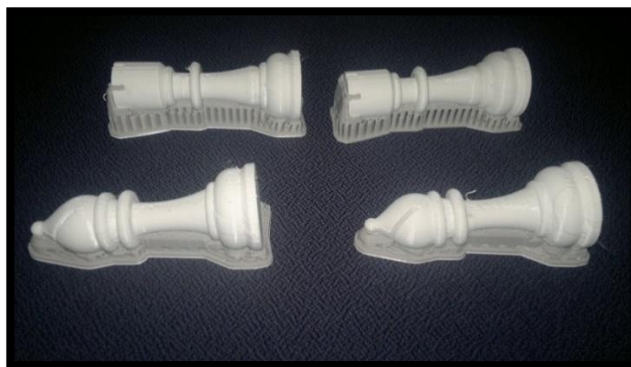


Figura 222. Piezas de ajedrez impresas en 3D



Figura 223. Juego completo de las piezas blancas

4.1.4. Sistema de Retroproyección y visión artificial

Con la caja contenedora del sistema de retroproyección listo, queda entonces el armado de los componentes (hardware).

- Soporte del proyector
- Soporte de los reflectores infrarrojos
- Soporte y armado de la pantalla
- Soporte y armado de la cámara PlayStation Eye.

El soporte del proyector para montar el proyector EPSON, es el QualGear PRB-717 universal para cualquier tipo de proyector. Este se instala en la viga media trasera de la caja. Este soporte tiene la ventaja de ser regulable en cualquier tipo de ángulo vertical u horizontal; es decir, tiene 2 grados de libertad. En la Figura 224 se muestra el soporte y el montaje de este dispositivo.



Figura 224. Soporte QualGear (izquierda) y montaje del proyector en el soporte en la caja (derecha).

Para el soporte de los reflectores infrarrojos se usaron ángulos en L prefabricados de acero inoxidable que se adaptan perfectamente con la solapa de los infrarrojos (Figura 225).



Figura 225. Ángulos en L para sostener los reflectores infrarrojos.

Para el armado de la pantalla, se ha especificado el uso de un vidrio de 4 líneas (4 mm) en lugar del panel reflexivo de plexiglass, siempre y cuando se regularan los parámetros del proyector para evitar problemas de puntos calientes. Por ello en la Figura 226 se visualiza el conjunto armado de la pantalla y la lona Gray de Rosco en el asiento fabricado en los bordes de la mesa.



Figura 226. Mesa sin la pantalla (izquierda), solapa para soportar la pantalla (centro), mesa con la pantalla colocada (derecha).

Otro elemento importante en el sistema de retroproyección es el soporte de la cámara PlayStation Eye. En la Figura 227 se muestra el soporte acoplado a la cámara.

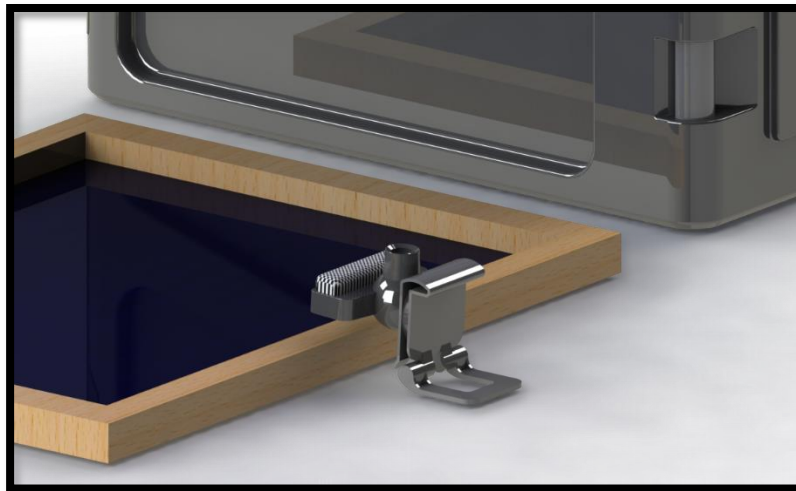


Figura 227. Soporte y cámara Playstation Eye.

4.1.5. Sistema Electrónico

La implementación y construcción del sistema electrónico comprende el armado del sistema de retroproyección y sus conexiones, el sistema de control (circuito) del manipulador, y el cableado general del sistema de ventilación y botones.

4.1.5.1. Cableado del Sistema

El sistema de retroproyección y la electrónica deben tener un sistema de cableado estructurado. Así, esto se muestra en la Figura 228 y la Tabla 83.

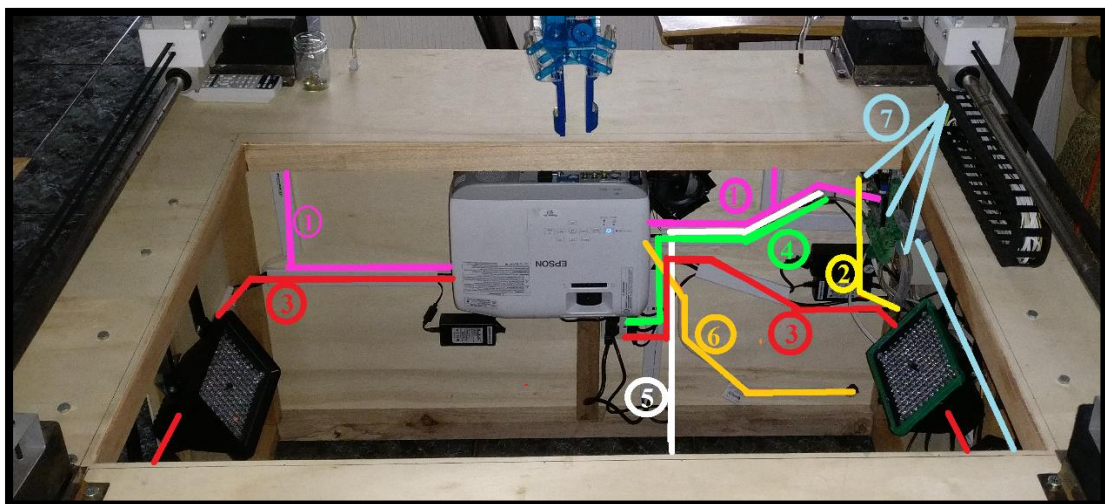


Figura 228. Cableado de todos los elementos electrónicos.

Tabla 83.
Identificación del cableado estructurado de la mesa.

No.	Cableado
1	Cable de motores a pasos del eje longitudinal
2	Cable Serial entre Raspberry PI y Arduino
3	Cable de poder para los infrarrojos, Cargador Raspberry, proyector y Fuente DC de 12 Voltios.
4	Cable HDMI para la computadora con el software de aplicación
5	Cable USB para la cámara PlayStation Eye
6	Cable principal del cortapicos hacia afuera del conjunto de la mesa.
7	Cables desde el Arduino hacia: los botones, los drivers y sensores.

En la Figura 229 se muestra la disposición de los elementos electrónicos que se colocan dentro de la caja, lo que da una idea más clara de cómo está realizada la conexión del cableado estructurado. En la Figura 230 se detalla el cableado del circuito electrónico.

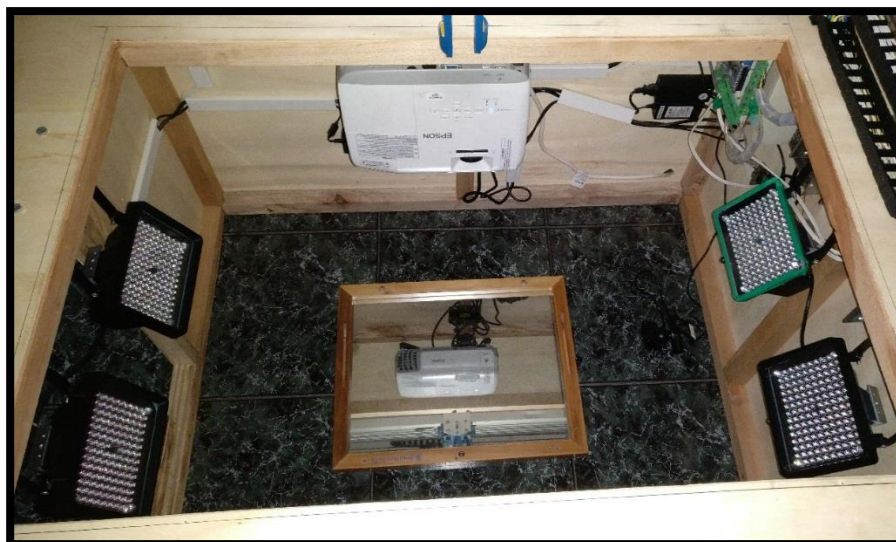


Figura 229. Componentes interiores de la mesa.

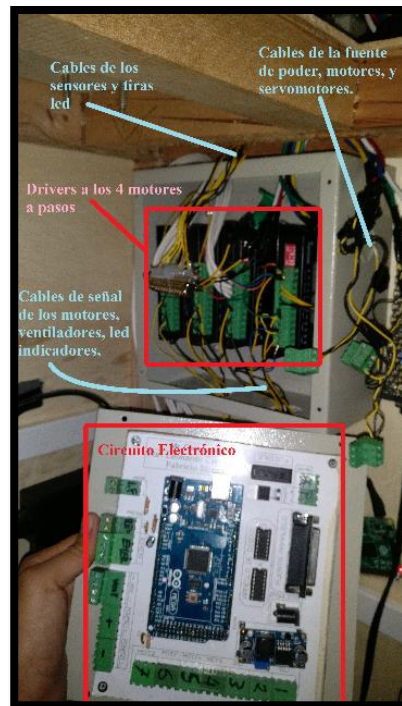


Figura 230. Componentes electrónicos del sistema de control y su cableado.

4.1.5.2. Implementación del sistema Electrónico.

Una de las partes que se diseñaron para este sistema, fue la creación del circuito de control del manipulador robótico. En la Tabla 84 se enumera el proceso de creación de la placa circuital para este proyecto. Y en la Figura 231 y Figura 232, se visualizan estos pasos.

Tabla 84.

Proceso de creación del circuito de sistema de control.

No.	Paso
1	Limpiar de impurezas la baquelita
2	Traspasar el diseño a la baquelita
3	Soldar los componentes electrónicos al circuito impreso
4	Conectar los cables de fuente y señales
5	Test de fusible y conexión correcta.

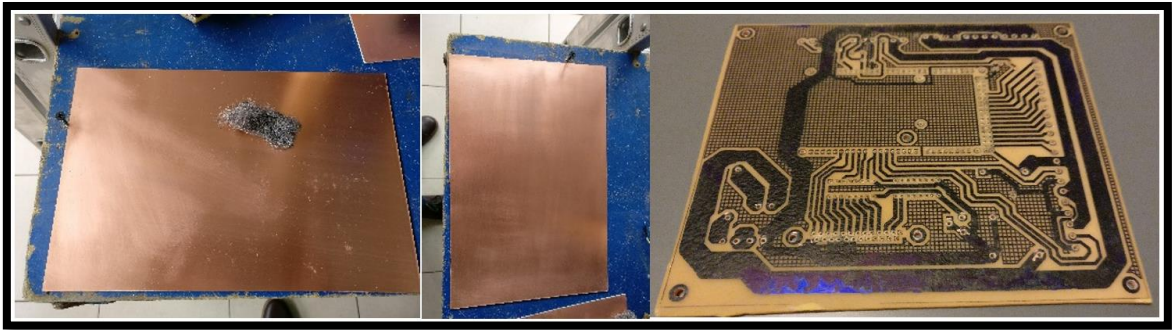


Figura 231. De izquierda a derecha: pulido, limpieza e impresión en el cobre.

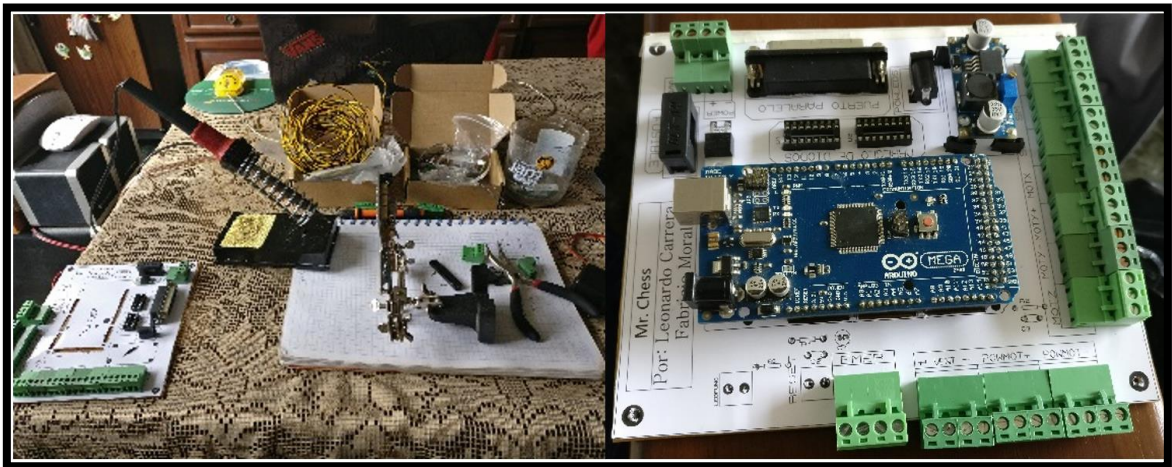


Figura 232. De izquierda a derecha: suelda de elementos, placa terminada.

En la Figura 233 se visualiza el circuito conectado a la fuente y a la Raspberry.

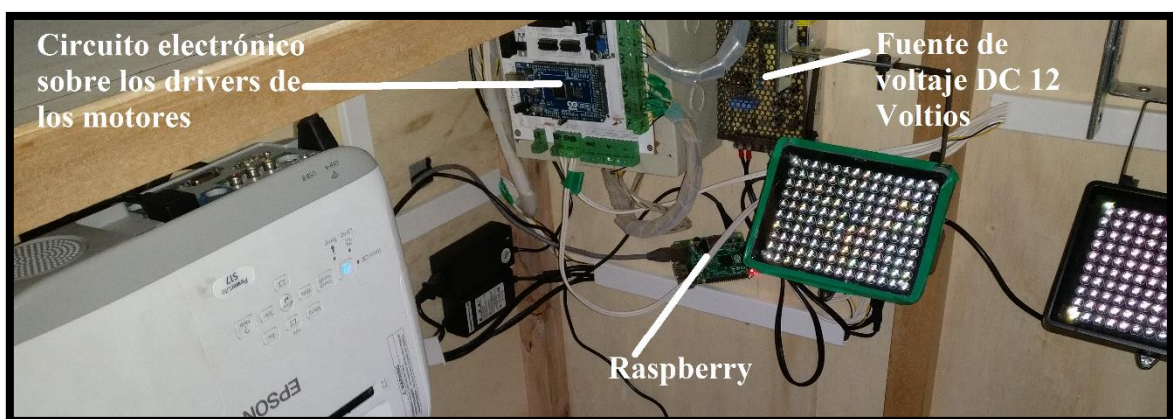


Figura 233. Fuente y circuito electrónico dentro de la mesa.

4.1.5.3. Panel de control

A pesar de que el sistema de retroproyección con el módulo táctil reconoce las entradas del usuario, el sistema debe contar con un sistema de reseteo y emergencia analógica que responda al instante para detener el manipulador o liberarlo para evitar daños en el usuario, por ocurre un error en la interfaz táctil.

En la Figura 234 se visualiza el panel de control analógico que se ha implementado para este proyecto.

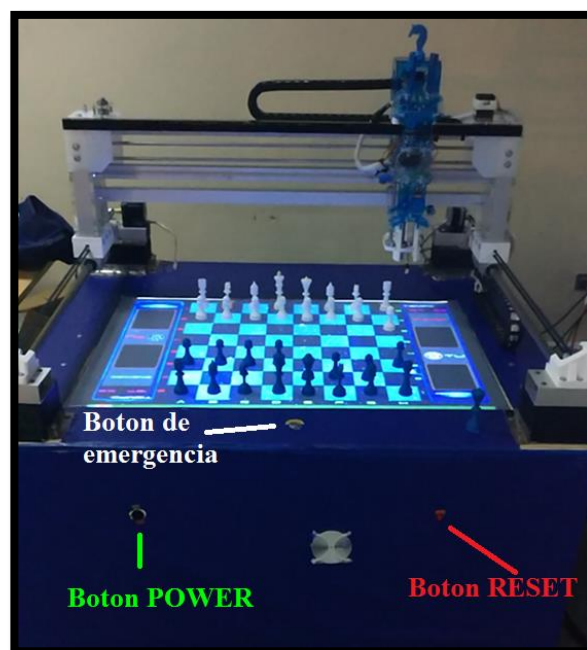


Figura 234. Panel de control en el sistema implementado.

4.2.Pruebas

4.2.1. Prueba de velocidad en pasos por segundo de cada motor con su respectivo eje rectangular

En la primera prueba se evaluó la velocidad en pasos por segundo de cada motor con su respectivo eje rectangular. Debido a que el tiempo de ejecución de cada jugada ejercido por el robot es relativo en comparación con la de un humano, la prueba se enfocó en el movimiento óptimo en cuanto a precisión y vibración; más no por rapidez de ejecución.

Resultados

El análisis de los resultados se realizó de manera cualitativa, determinado la optimización del movimiento con las palabras: “Óptimo” y “No óptimo”.

Tabla 85.

Prueba de optimización para la velocidad en cada eje rectangular

Prueba	Ejes	Velocidad [pasos/s]	Movimiento
1	X	3000	No óptimo
	Y	1500	Óptimo
	Z	3500	No óptimo
2	X	2000	Óptimo
	Y	2000	No óptimo
	Z	4000	No óptimo
3	X	2500	No óptimo
	Y	2500	No óptimo
	Z	3800	No óptimo
4	X	2800	No óptimo
	Y	1800	No óptimo
	Z	3200	Óptimo

Como se observa en la Tabla 85, se realizaron cuatro pruebas de donde se obtuvieron velocidades óptimas para cada eje rectangular, las cuales se muestran a continuación:

- Eje X: 2000 [pasos/s]
- Eje Y: 1500 [pasos/s]
- Eje Z: 3200 [pasos/s]

En esta prueba se determinó que mientras más velocidad se le da al motor, se obtiene menos torque y por lo tanto menos capacidad para mover el robot con carga. Esto corrobora los datos del diseño.

4.2.2. Prueba de posicionamiento del efector final del robot en un punto indicado con coordenadas rectangulares

Se realizó una segunda prueba, la cual consiste en comprobar el posicionamiento del efector final del robot en un punto indicado con coordenadas rectangulares. La prueba establecerá la precisión del robot en cada eje.

Se debe resaltar que cada eje tiene su propia velocidad (movimiento simultáneo de ejes), por lo cual se analizó cada uno.

Resultados

Las posiciones se midieron desde la posición (0,0,0) como punto inicial hasta la posición deseada como punto final, de esta manera nunca se tendrá valores negativos. Cada medición se realizó luego de que el robot ejecute el movimiento partiendo de *home*, esto se debe a que al finalizar cada jugada de ajedrez el robot regresa a su posición inicial. Los resultados alcanzados se resumen en la Tabla 86.

Tabla 86.
Prueba de posicionamiento del módulo robótico

Prueba	Ejes	Posición deseada [cm]	Posición obtenida [cm]	Error absoluto	Error relativo [%]
1	X	71	70,9	0,1	0,14
	Y	25	24,7	0,3	1,2
	Z	10	9,9	0,1	1
2	X	52	51,9	0,1	0,19
	Y	70	69,7	0,3	0,42
	Z	15	14,9	0,1	0,66
3	X	10	10,9	0,1	1
	Y	43	42,7	0,3	0,69
	Z	3	2,9	0,1	0,23

En el error absoluto se muestra un patrón para cada eje, lo cual se debe al proceso de medición establecido, y al uso de transmisiones de movimiento con correas y tornillo sin fin propias de aplicaciones con precisión y a la resolución espacial del robot.

4.2.3. Prueba de posicionamiento del efector final en las casillas del tablero de ajedrez.

En la tercera prueba se verificó el posicionamiento del efector final en las casillas del tablero de ajedrez.

Previo a la prueba se efectuó la calibración por medio de software asignando las dimensiones del tablero proyectado y el *offset* existente desde el *home* del robot hasta la primera esquina del tablero como se muestra en la Figura 235.

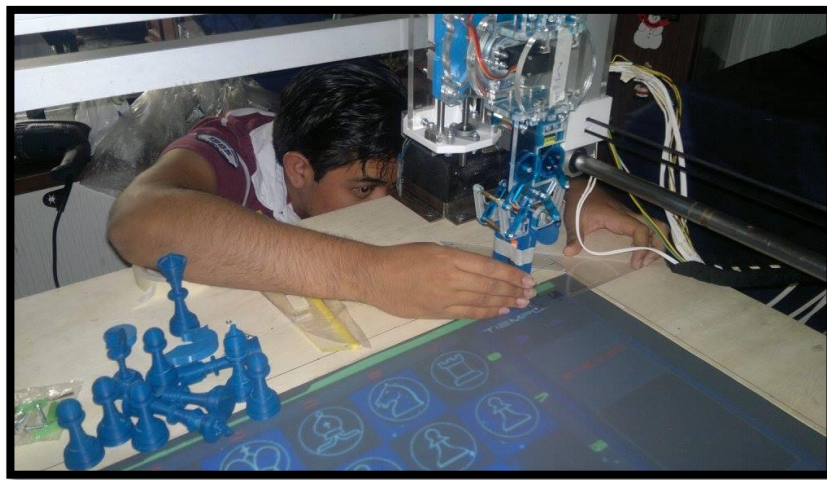


Figura 235. Calibración con el offset presente en el tablero

La prueba se realizó enviando comandos de alto nivel al controlador del robot, señalando las casillas a las cuales se requería el posicionamiento del efector final en el centro de cada una, como se muestra en la Figura 236.



Figura 236. Posicionamiento del robot en diferentes casillas de ajedrez

Resultados

El análisis de resultados se realizó de manera cualitativa, determinando la validez del movimiento con las palabras “Válido”, “No válido”.

Tabla 87.

Prueba de posicionamiento en diferentes casillas del tablero

Movimiento	Validez
A1H8	Válido
G2B5	Válido
D3A7	Válido
H1C4	Válido
E6A7	Válido
F4H3	Válido
A3B8	Válido

Como se observa en la Tabla 87, se validó en su totalidad el posicionamiento del robot en las diferentes casillas del tablero previamente enviadas vía serial.

4.2.4. Prueba de agarre y giro del efector final

En la cuarta prueba se evaluó el agarre y el giro del efector final, el cumplimiento del robot en jugadas como: enroque, captura y promoción.

En la Figura 237 se muestra la prueba realizada con el movimiento de captura. Primero con la pinza blanca manipula la pieza que comerá; el efector final gira 180° cambiando a la pinza azul, la cual captura la pieza vencida. Finalmente, con otro giro de 180° y con la pinza blanca posiciona a la pieza vencedora.

De esta manera se verifica la ejecución de la jugada y el agarre del efector final de las piezas implicadas.

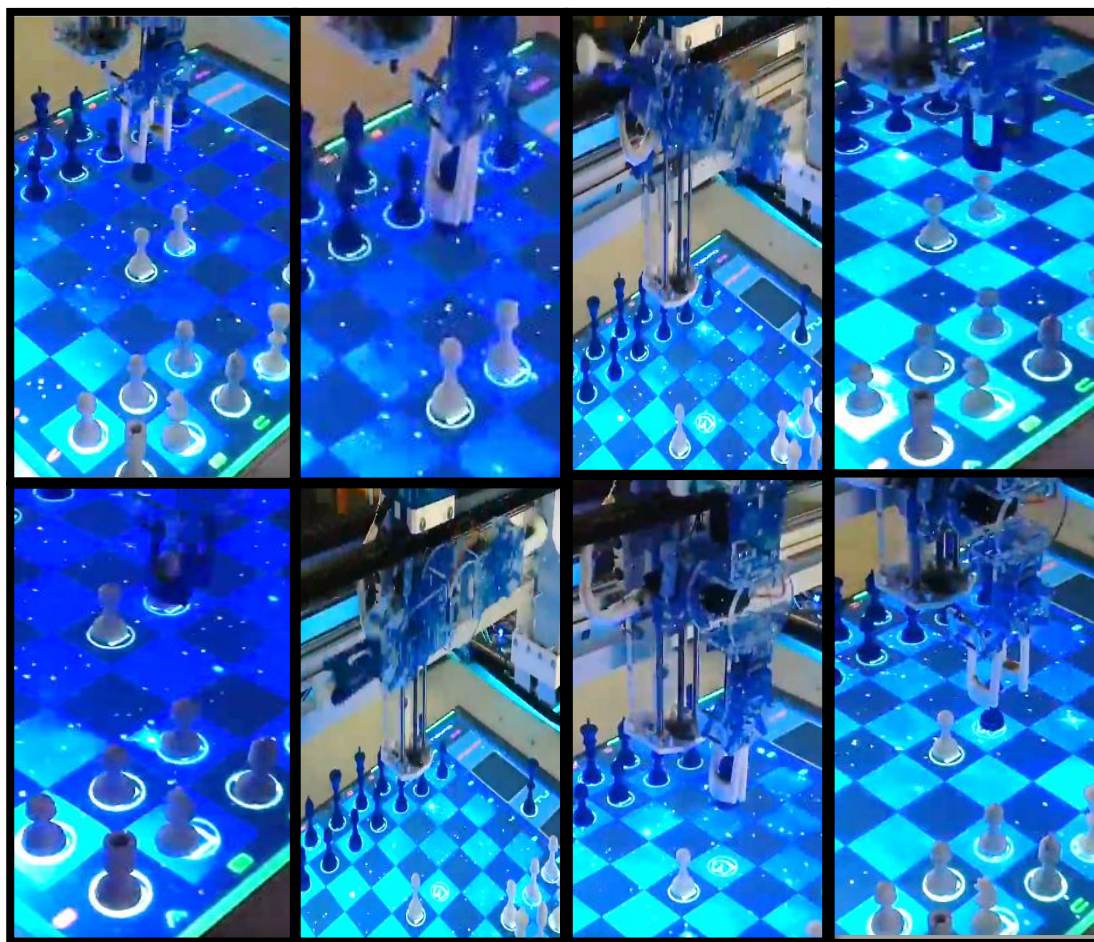


Figura 237. Secuencia del movimiento de captura de pieza y prueba de agarre

En la prueba de agarre del efector final se encontró un fallo en la manipulación de piezas debido a la superficie lisa de los dedos en las pinzas.

Resultados

Se corrigió el fallo en las pinzas colocando una capa esponjosa de 1 mm de espesor en cada dedo teniendo un agarre óptimo de cada pieza.

Los resultados de la cuarta prueba se validaron de la misma forma que la tercera, es decir de manera cualitativa.

Tabla 88.

Prueba de ejecución de jugadas con el robot cartesiano

Jugada	Validez
Captura	Válido
Enroque	Válido
Promoción	Válido

Como se observa en la Tabla 88, el robot ejecutó cada jugada de manera satisfactoria.

4.2.5. Prueba del tiempo de respuesta cada sub-módulo del sistema

En la quinta prueba se evaluó a todo el sistema tanto al hardware como el software, se determinó el tiempo de respuesta para cada jugada ejecutada por el robot luego de procesar la jugada del usuario.

Resultados del manipulador robótico

En la Tabla 89 se muestran los tiempos de respuesta del robot en cada tipo de jugada, los cuales son aceptables debido a que el tiempo de procesamiento y ejecución de jugadas por parte de un humano en promedio es mayor a 3 minutos, por lo cual se cumple con los criterios establecidos para la aplicación de la presente investigación.

Tabla 89.**Tiempos de respuesta del robot en cada tipo de jugada**

Tipo de Movimiento	Tiempo de respuesta [s]
Procesamiento de la jugada del usuario	3
Traslado de una pieza a otra casilla	30
Captura entre piezas	65
Promoción	45
Enroque	45

Como ítem adicional a esta prueba se analizaron las latencias del software de aplicación, visión artificial, tiempo de proyección, análisis de jugada y tiempo de respuesta de la placa de control (no el movimiento del robot, solo latencias del software).

Resultados de la latencia de la cámara

La primera prueba de latencia es la de la cámara. En esta se consideraron 3 latencias de acuerdo a (Johannes Schöning et al., 2008) como se muestra en la Figura 238.

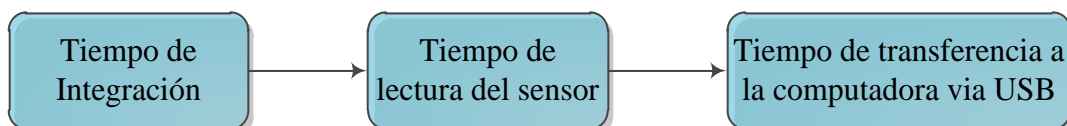


Figura 238. Latencias presentes en la cámara PlayStation Eye.

Fuente: (Johannes Schöning et al., 2008).

De la Figura 238, se tiene:

- Tiempo de integración: Es el tiempo en el que el sensor recoge la luz.
- Tiempo de lectura del sensor: Es el tiempo que se necesita para transferir el dato del sensor al circuito de la cámara y procesar el dato.
- Es el tiempo de transferencia entre la cámara y el computador que de acuerdo a (MAKEHARDWARE, 2016) es de 75 ms aproximadamente (otros autores coinciden en gran medidas con este valor).

De acuerdo a (Johannes Schöning et al., 2008) el tiempo de integración y de lectura del sensor de la cámara es generalmente 33 milisegundos aproximadamente.

Con estos valores se tiene un valor de latencia de la cámara igual a 108 ms.

Resultado de la latencia del software de aplicación

Para medir la latencia del software, fue necesario agregar timers al programa desarrollado en C#, para Unity. Este arroja valores en condiciones de jugadas complicadas y normales, desde que se receipta el dato de la cámara, hasta que se acaba el movimiento de la pieza.

Así se tuvo un promedio de 65 milisegundos para este proceso. A este también se le deben añadir unos 10 ms extras por efecto de las animaciones en Unity, que pueden o no ocurrir pues algunas animaciones deben acoplarse al toque de la burbuja.

Resultado de la latencia en el Proyector

Como siguiente paso, se analiza la latencia de disparo del proyector para formar la imagen en la pantalla proyectada. Esta latencia se estudió con el método de comparación con una fotografía de la pantalla proyectada y la pantalla fuente de donde sale la imagen, mientras aparecen líneas de izquierda a derecha en ambas pantallas como se muestra en la Figura 239.

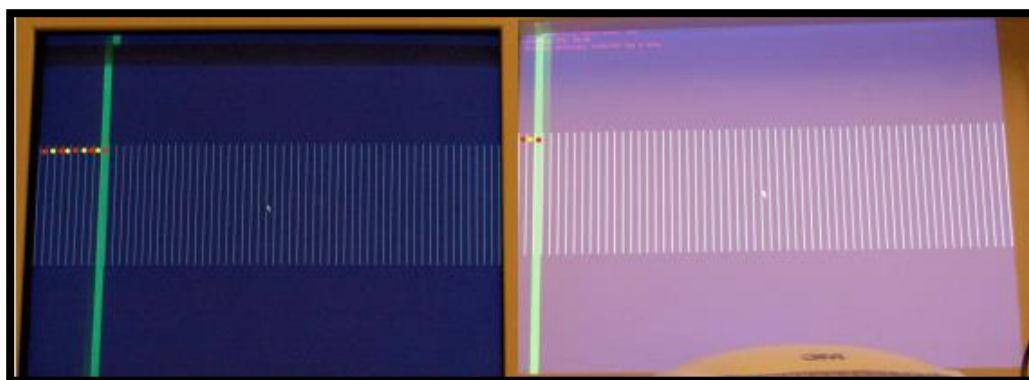


Figura 239. Latencia entre la pantalla del computador y la pantalla proyectada del proyector EPSON PowerLite S17.

Este procedimiento dio una latencia calculable de acuerdo a los fotogramas por segundo (FPS) de 100 milisegundos, realizando el cálculo de la frecuencia del FPS del proyector de 1/60 ms que son 16.67 ms. (60 Hz de refresco). Si se multiplica por los puntos que de diferencia entre ambas pantallas se tiene:

$$\frac{1}{60} \times 6 = 0.1 \text{ segundos} = 100 \text{ milisegundos}$$

Ahora, este es un valor aceptado, pero no es un valor absoluto de la latencia resultante del proyector.

Este valor puede ser estudiado más a fondo de acuerdo a (Johannes Schöning et al., 2008) en donde se analizaban casos críticos para pantallas multitáctiles.

Resultados completos de la latencia

El siguiente resultado de la latencia total representa el procesamiento que se ejecuta desde que la cámara capta la imagen hasta que termina por mostrar el resultado en el proyector. Si bien este resultado no es completamente exacto, si muestra un valor acertado de la duración del procesamiento completo.

El resultado de las latencias se muestra en la Tabla 90.

Tabla 90.
Latencias en Sistema de retroproyección.

Tipo de Latencia	Duración (aproximados y variables)
Latencia de la cámara	108 ms.
Latencia del software de aplicación	65 ms.
Latencia del proyector	100 ms.
	SUMA: ~273 ms.

4.2.6. Prueba de los ángulos correctos para el proyector y reflectores

Aquí se prueban los ángulos correctos para el proyector, y los reflectores infrarrojos para aprovechar al máximo la superficie de la pantalla y su característica multi-táctil.

Resultados:

Proyector

El proyector tiene un ángulo de inclinación para producir rebote de la imagen con el espejo hasta llegar a la pantalla (y así aumentar el área de proyección). Esto presenta el problema de crear unidistorsión y alteración en la perspectiva (Figura 240).

El problema se corrige gracias a la función KeyStone que el propio proyector tiene para solucionar el efecto, consiguiendo distorsionar la imagen con un trapezoide inverso que se anula con el de la imagen reflejada, logrando una imagen cuadrada que calza con la pantalla.



Figura 240. Efecto de imagen trapezoidal por el ángulo de inclinación del proyector.
Fuente: Propia.

Para saber cuánto se debe modificar el valor en la configuración del Keystone en el proyector EPSON, es necesario conocer el aprovechamiento que diversos valores dieron al realizar la calibración de la pantalla, como se muestra en la Figura 241 y se evalúa en la Tabla 91.

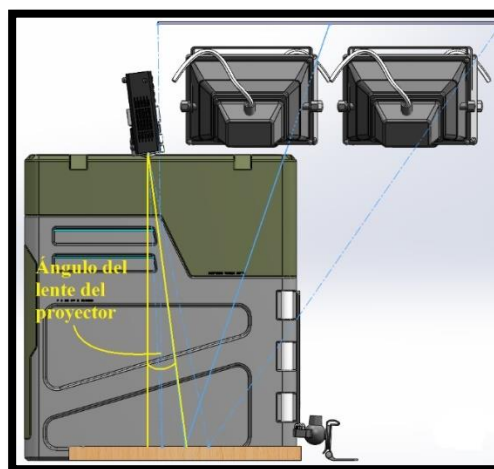


Figura 241. Ángulo del lente del proyector.

Tabla 91.

Ángulos probados para la proyección sobre el espejo y pantalla.

Ángulo del lente del proyector	Desfase	
	A lo largo	A lo Ancho
3° a 5°	13,4 cm hacia arriba.	1 cm menos del ancho
5° a 10°	2,8 cm hacia arriba y abajo	2 cm menos del ancho
10° en adelante	hasta 15 cm hacia abajo	6,5 cm menos del ancho en adelante



Figura 242. Aprovechamiento de la pantalla proyectada.

La Figura 242 muestra el aprovechamiento aproximado que se tiene al aplicar un ángulo del lente de 5° a 10° después de haber aplicado la función de corrección Keystone.

Reflectores infrarrojos

Para esta parte de la sexta prueba, es necesario calibrar (ángulo y distancia) los reflectores infrarrojos para esparcir toda la luz sobre la pantalla de manera uniforme. Así se evitan problemas de oclusión en lugares específicos donde la cámara necesite enfocar.

En la Figura 243 se muestra el ángulo y la distancia para la medición.

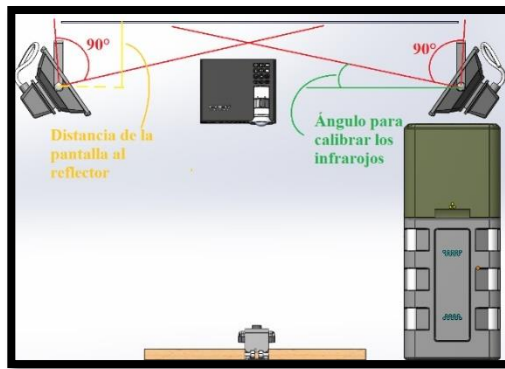


Figura 243. Ángulo y distancia para calibrar la mejor recepción de luz.

Para concluir los resultados de esta prueba, no existía un método estándar sobre la posición exacta para colocar los reflectores infrarrojos, por lo que se optó por realizar algunas pruebas empíricas-prácticas y así determinar el mejor ángulo y distancia de separación de los reflectores.

En la Tabla 92 y Tabla 93 se muestran las pruebas más representativas para determinar la posición idónea de los reflectores infrarrojos. Y en la Figura 244 se muestra la imagen del CCV con los reflectores alineados a 40° y a ~14.5 cm de separación.

Tabla 92.

Prueba de ángulo en los reflectores infrarrojos.

Prueba de ángulo.	Resultado
30°	No válido
40°	Válido
60	No válido

Tabla 93.

Prueba de distancia en los reflectores infrarrojos.

Prueba de distancia (desde donde comienza el haz hasta la pantalla)	Resultado
5 a 10 cm	No válido
11 a 29 cm	Válido
30 en adelante	No válido



Figura 244. Imagen del CCV con los reflectores encendidos y funcionando.

4.2.7. Prueba del sistema de retroproyección ante condiciones de luminosidad ambiente

En esta séptima prueba se evaluó el sistema de retroproyección ante condiciones de luminosidad del ambiente, diferentes enfoques, diferentes aspectos y nuevos valores de filtros.

Resultados:

Proyector

Para ello fue necesario realizar un conjunto de pruebas de acuerdo a las condiciones mostradas en la Tabla 94 para el proyector.

Tabla 94.

Condiciones para evaluar la validez de los valores en el proyector EPSON.

Proyector EPSON PowerLite S17		
CARACTERÍSTICA	CONDICIONES	VALIDEZ
Aspecto de la proyección	16:9	Válido
	4:3	No Válido
Resolución	320 x 240	No Válido
	800x 600	Válido
Zoom	1x	Válido
	1.35 x	No Válido
Luminosidad	100%	No Válido
	70%	Válido
Entrada de video	RS-232	No Válido
	HDMI	Válido

Las condiciones seleccionadas fueron probadas y validadas para satisfacer o solucionar los siguientes problemas:

- Evitar “puntos calientes” debido a la concentración de luz en un solo punto que la cámara puede interpretar erróneamente como burbuja infrarroja
- Aprovechar al máximo la extensión de la pantalla
- Obtener la mejor resolución visual en la pantalla
- Evitar encandilamiento del usuario al observar directamente la pantalla

Cámara

Tal como se realizó para el proyector, la cámara también tiene características modificables que tuvieron que ser evaluadas para obtener la mejor imagen antes y aprovechamiento de la misma. En la Tabla 95 se validan dichos resultados.

Tabla 95.

Condiciones para evaluar la validez de los valores en la cámara PlayStation Eye.

Cámara PlayStation Eye		
CARACTERÍSTICA	CONDICIONES	VALIDEZ
Brillo	muy brillante	No Válido
	balance (0)	Válido
Contraste	valores intermedios	Válido
	valores máximo o mínimo	No Válido
Saturación	entre 50 y 70	Válido
	entre 10 y 40	No Válido
Gamma	300	Válido
	100	No Válido
Frecuencia	60 Hz	Válido
	50 Hz	No Válido

Estos valores corrigen los siguientes problemas:

- Poca oclusión por luz ambiente
- Amplificación de los puntos poco iluminados por los reflectores infrarrojos
- Inmunidad mejorada a la luz infrarroja ambiente

- Buena consistencia de la imagen (imagen con contraste intermedio).
- Correcta exposición del sensor a la luz circundante (Gamma).

Filtros en el ccv

Una vez seleccionadas las mejores condiciones prácticas obtenidas para la cámara, es necesario probar los valores de los filtros hasta obtener burbujas sólidas, sin vibración, con buen suavizado y con buena nitidez.

Estos valores se ajustaron de acuerdo a las condiciones de luz ambiente e iluminación del proyector en el material de la pantalla. No se considera la luz de los reflectores, pues esta es constante en todo momento. En la Tabla 96 se observa el rango de valores disponibles que logran el reconocimiento del objeto en la pantalla de manera óptima. En la Figura 245 y Figura 246, se visualiza el rango aceptable de Thresold y Blur respectivamente en relación a los parámetros de la Tabla 96.

Tabla 96.

Parámetros configurables en el CCV para lograr un buen reconocimiento del gesto táctil.

PARAMETRO*	Luz ambiente		Iluminación del proyector	
	Día	Noche	Iluminado	No iluminado
Thresold (umbral)	2 a 10	1 a 7	1.5 a 5	1 a 4
Difuminado (Blur)	5 a 8	6 a 9	1 a 12	2 a 11
Ruido (Noise)	2 a 4	2 a 4	-	-
Suavizado (Gaussiano)	hasta 8	hasta 5	-	-

*: Valores en la escala del 1 al 100.

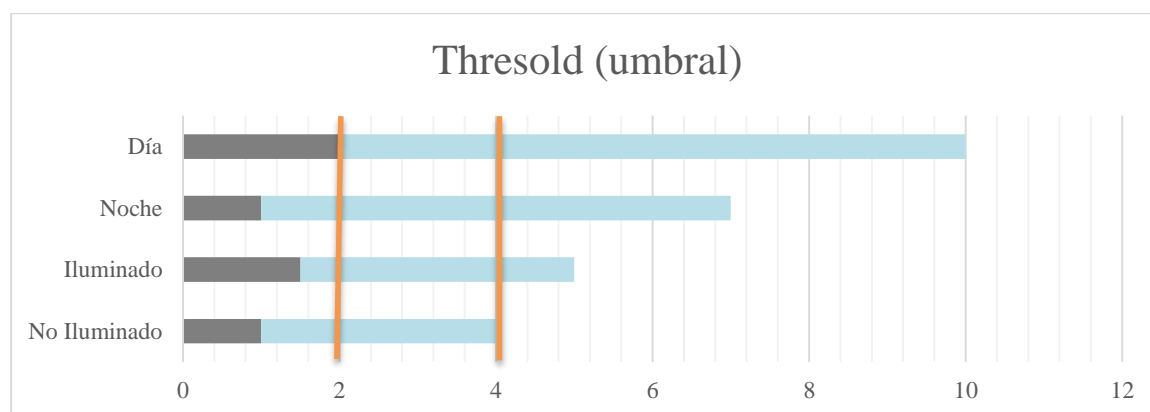


Figura 245. Rangos aceptados para el parámetro de umbral (*Thresold*).

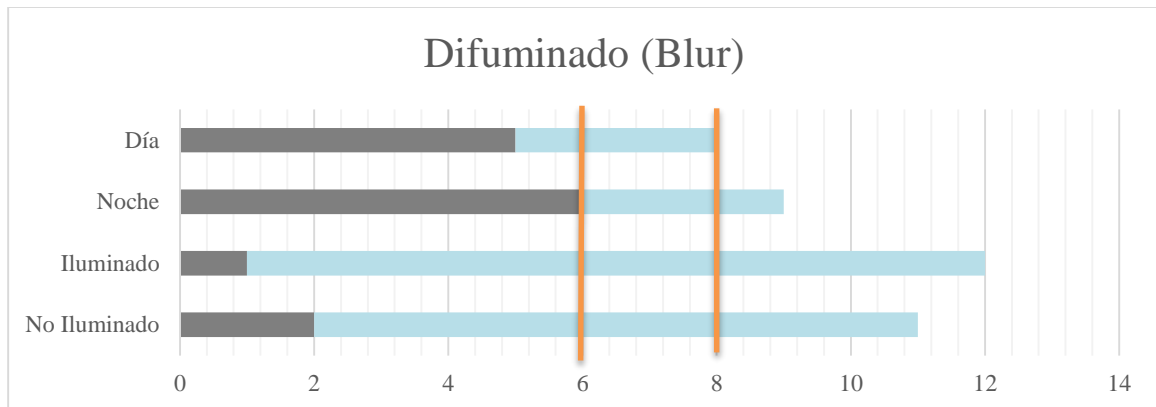


Figura 246. Rangos aceptados para el parámetro de Difuminado (*Blur*).

Conclusiones de los resultados:

- El valor del umbral (*Thresold*) para este proyecto varía entre 2 y 4 logrando una separación de la escala de grises a blanco y negro, con la mejor nitidez.
- El valor de difuminado también tiene un rango pequeño de entre 6 y 8 para que las burbujas se expandan hasta la forma del objeto colocado encima, sobre todo en los lugares oscuros de la pantalla.
- El valor de ruido se acepta en el rango de 2 a 4, porque de ser mayor, se aceptarían fuentes infrarrojas externas del medio ambiente; y al ser menor, la cámara no aceptaría todo el potencial de los reflectores infrarrojos. El proyector al no ser una fuente directa de rayos infrarrojos (poca luminosidad infrarroja), no se toma en cuenta en el estudio.
- El suavizado Gaussiano se acepta hasta un valor de 4 para que sea óptimo en cuanto a la corrección de bordes afilados. Este valor no sobrepasa el 4 porque de otro modo la triangulación del centroide se dificultaría para el CCV.

En la Figura 247 se observa el CCV configurado con los valores óptimos de funcionamiento para este proyecto en concreto.

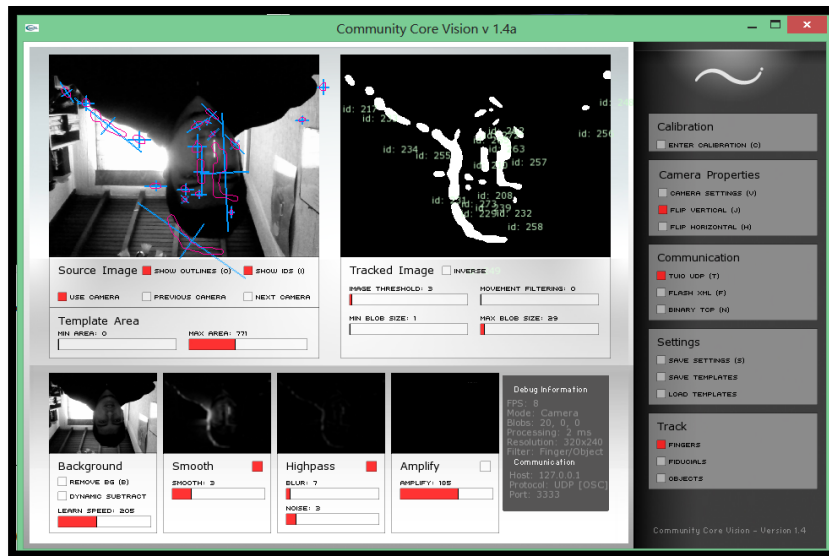


Figura 247. CCV con los valores configurados para este proyecto.

4.2.8. Prueba de calibración de toques

Es necesario acomodar la imagen del proyector con la imagen de la cámara. Para ello el CCV tiene una herramienta que le permite al usuario modificar la posición de los vértices en la red de calibración. Con esto se alinea los límites de la red (obtenido por el proyector), hasta los bordes táctiles y visibles (obtenido por la cámara).

La calibración distorsiona solo el espacio que se muestra al usuario más no el espacio obtenido por la cámara.

Resultados

Para poder alinear los vértices, el CCV muestra una serie de puntos verdes que pueden ser añadidos o quitados (Figura 248). El toque se detecta en la posición desfasada pero encima del punto y se deja 3 segundos sobre el punto para que adopte su nueva posición. Este proceso se muestra en secuencia en la Figura 249, Figura 250 y Figura 251.

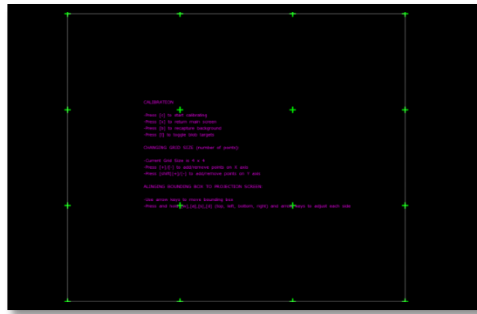


Figura 248. Puntos de calibración de los vértices.

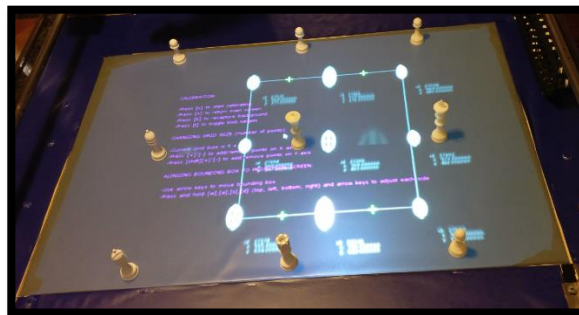


Figura 249. Área desfasada originalmente.
Fuente: Propia.

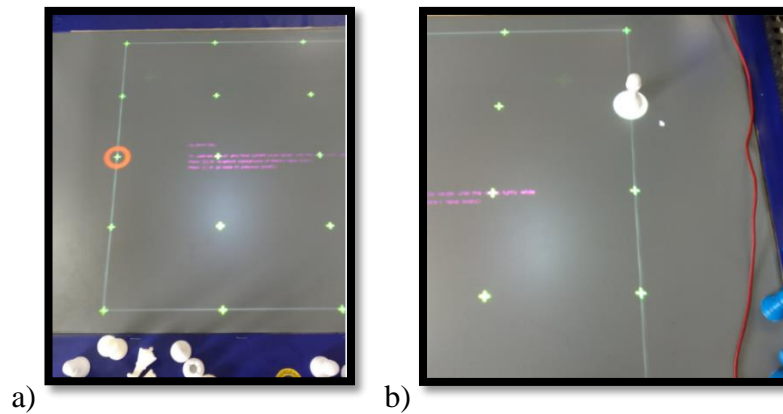


Figura 250. Proceso de calibración. a) Punto sin tocar, b) pieza de ajedrez calibrando la posición.
Fuente: Propia.

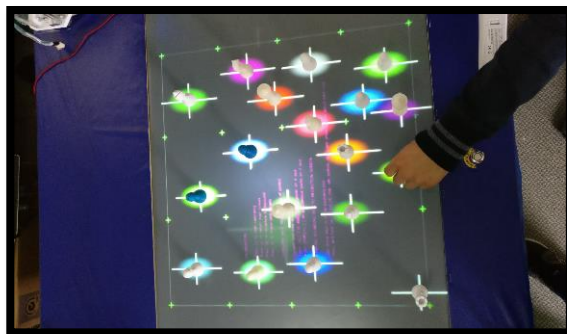


Figura 251. Posición calibrada.

Fuente: Propia.

Como el software tiene la ventaja de añadir más puntos en la red de calibración, se estimó la menor cantidad de puntos válidos para una calibración satisfactoria como se muestra en la Tabla 97.

Tabla 97.
Número de puntos de calibración.

Matriz de Puntos (cruces verdes) (filas X columnas)	Resultado
Menor a 4 X 4	No válido
Mayor o igual a 4 X 4	Válido

4.2.9. Prueba de mapeo con el software de aplicación

En esta novena prueba se evalúa la concordancia de los puntos ya calibrados del CCV con el software de aplicación creado en Unity.

Este paso es importante pues el ejecutable en Unity abarca toda la pantalla y debe ser escalado hasta que los puntos coincidan con los ya calibrados. Para mostrar este efecto, se muestra en la Figura 252 el desfase que existe al tomar la misma burbuja de CCV y trasladarla a Unity. Se observa un desfase muy sutil pero crítico para el reconocimiento de la posición.

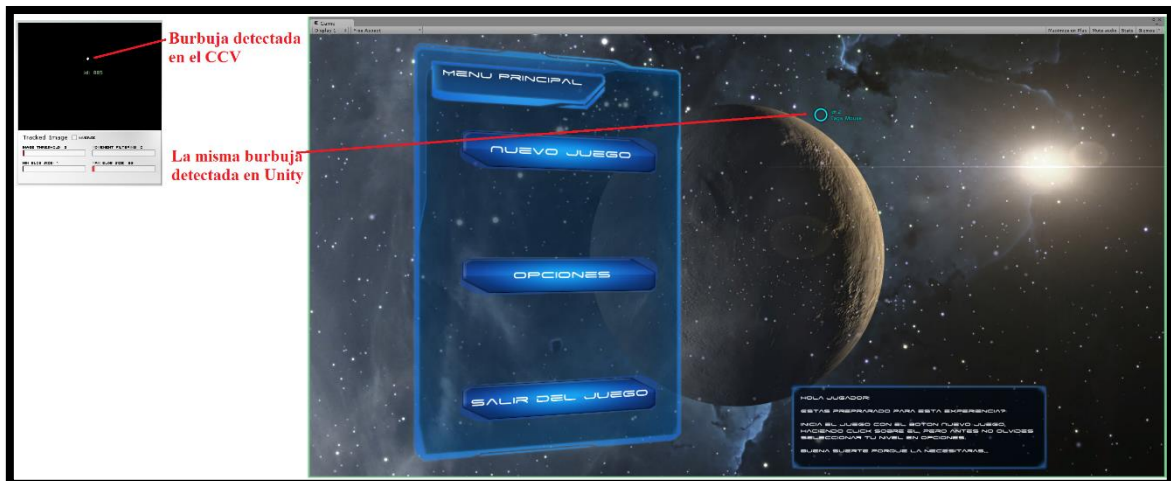


Figura 252. Puntos en CCV y en Unity.

Para solucionar este problema simplemente fue necesario cambiar el aspecto y redimensionar mediante programación parte de la resolución de la ventana principal para coincidir con la pantalla proyectada del programa. En la Tabla 98 se muestran los aspectos con los que se realizó el análisis.

Tabla 98.

Aspectos de pantalla para la ventana de Unity en este proyecto.

Aspecto	Resultado
4:3	No válido
16:9	Válido
16:10	No válido

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, se presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de titulación, el cual se basa en los resultados obtenidos tanto en el diseño como en la implementación, justificando los objetivos planteados.

5.1. Conclusiones

- Se diseñó e implementó un módulo robótico multifuncional interactivo para la enseñanza del ajedrez, el cual se caracteriza por tener cuatro principales funciones: tablero de ajedrez con retroproyección e interfaz multi-táctil; reconocimiento de jugadas físicas de ajedrez; predicción de jugadas realizadas por el usuario y cálculo de jugadas nuevas ejecutadas por un brazo robótico cartesiano. La interfaz del tablero de ajedrez permite coordinar la comunicación con el motor de ajedrez, y coordinar la secuencia de juego en el sistema de retroproyección.
- Se diseñó e implementó un sistema robótico con la capacidad de jugar ajedrez de manera autónoma, el sistema de control se estructuró en base a una arquitectura de software que contiene cuatro módulos: módulo de visión artificial con protocolo UDP; controlador del sistema desarrollado en Arduino con protocolo Serial; software de aplicación desarrollado en lenguaje C# y enlazado mediante protocolo TCP/IP con el módulo de control del sistema desarrollado en Python en el computador de placa reducida Raspberry PI B+, en el cual se estableció un modelo de cliente – servidor. Para el análisis y predicción de jugadas se utilizó el motor de ajedrez Stockfish, el cual es uno de los más potentes en el mundo y cuenta con una programación de alto nivel.
- Para el posicionamiento de piezas se desarrolló con éxito un efector final exclusivo para la aplicación de la presente investigación, en el que se tomaron en cuenta parámetros como fuerza de agarre, precisión y geometría específica. Se restringió los grados de libertad existentes en las piezas de ajedrez mediante el diseño de una geometría específica para los dedos del efector final, teniendo no solo una línea de contacto sino toda una superficie de contacto.

- Se diseñaron las piezas de ajedrez en CAD/CAE siguiendo recomendaciones y normas de la Federación Internacional de Ajedrez (FIDE). Las piezas de ajedrez se elaboraron con la técnica de impresión 3d con material ABS, donde la base del rey es de 30 mm siendo el 44.1% del tamaño de la casilla; en cuanto al tamaño de las piezas se usó la clasificación comercial denominada Staunton 5, la cual no toma en cuenta atributos como el color y el material.
- En el capítulo 4 se muestra la eficacia del sistema de retroproyección mediante el correcto dimensionamiento de los equipos utilizados para sensar los gestos táctiles. También se logró realizar una correcta calibración en el software de retroproyección para adaptarse a las condiciones de este proyecto. Los problemas detectados fueron solucionados de iluminación infrarroja se lograron implementando fuentes de luz adicionales en lugares focales donde los reflectores infrarrojos no llegaban realizados de manera casera. La cámara tanto como el proyector no presentaron problemas mayores en cuanto a su implementación.
- En el capítulo 3 y 4 se diseñó el software de aplicación una vez logrado el sistema de control del robot y el sistema de retroproyección. Al hacer funcionar independientemente cada sistema, solo bastó implementar el sistema de comunicación y control del tablero, e interconectarlo todo. Este sistema modular de programación resultó muy satisfactorio para ensamblar todo el software y corregir errores a medida que aparecían.
- El sistema general también es modular, y se amplía a otras aplicaciones. Es decir, el manipulador robótico puede ser desensamblado de la estructura de la mesa. De esta manera el sistema de retroproyección puede ser utilizado independientemente como una interfaz de control, o para jugar ajedrez en el modo humano versus humano. El manipulador robótico también es modular y puede ser usado en otras aplicaciones típicas de un robot cartesiano, como cortador láser, fresa o impresora 3D con las herramientas adecuadas para cada uso.
- Para el manipulador robótico y efector final, se lograron precisiones con un error menor al 1%. Tanto correas, tornillo sin fin y mecanismo de los servos fueron probados teórica y experimentalmente para alcanzar esta eficiencia. En cuanto a la resolución espacial del robot, se logró una medida de 1.1 mm en

cada eje, que a la vez, después de muchas pruebas, no afectó en la repetitividad de los movimientos del robot. La velocidad del robot tuvo un máximo de 400 mm/s y 80 mm/s, que generan una sensación de juego bastante rápida asemejando a un jugador humano. Así mismo, el manipulador robótico (sin contar con el gripper) tiene una capacidad de carga teórica de hasta 10 Kg. De los cuales se probó el sistema hasta con 2 Kg de carga son ningún efecto adverso. Y en cuanto al efector final (gripper) se tiene una capacidad de carga teórica de 5 Kg (por los servomotores) de los cuales no se ocupó todo su potencial al cargar solo las piezas de ajedrez de 5 gramos aproximados cada una.

- En cuanto a la desviación entre el toque real y el proyectado en la pantalla se obtuvieron imprecisiones de hasta ± 5 pixeles en el eje vertical y ± 4 pixeles en la horizontal. Estos no afectan significativamente en la posición del robot respecto del toque en la pantalla. No se obtuvieron problemas muy grandes en cuanto a la precisión del toque y la posición real.
- El sistema en general, a pesar de que está estructurado con tecnologías avanzadas de visión artificial y motor de ajedrez, resulta intuitivo para ser usado por cualquier persona sin un conocimiento sobre estas tecnologías. De hecho, este sistema se diseñó con el propósito de enseñar ajedrez a personas. De tal manera, el sistema cuenta con pantallas interactivas donde el usuario solo hace clic en cada botón y configura la partida a su gusto. Del mismo modo la partida de ajedrez es intuitiva, y existen mensajes a lo largo de todo el juego que le indican al usuario el estado del mismo y las posibilidades de movimiento en cada jugada.

5.2. Recomendaciones

- Para el sistema en general, se recomienda seguir con la investigación sobre nuevos métodos que integren las tecnologías de visión artificial y robótica, y así generar modelos alternos al estudiado en este proyecto. Si bien la autonomía en general es óptima y fluida, este podría cambiar de prestaciones si se cambiaran las tecnologías de mapeo de objetos o sistema de control del robot.

- Se recomienda futuros estudios el diseño de efectores finales con tres o más dedos, de tal manera que se restrinjan totalmente los grados de libertad de las piezas tanto en rotación como en traslación aumentando su aprehensión.
- Para mejorar el posicionamiento y orientación del sistema robótico se recomienda reducir el tamaño del tablero y utilizar un robot antropomórfico, con lo cual se podría disminuir tiempos de respuesta en el juego.
- En trabajos futuros se recomienda el desarrollo de tutoriales para la enseñanza del juego, tanto para el movimiento de cada pieza como para jugadas preestablecidas que mejoren las destrezas y la lógica del jugador.
- Con la implementación del módulo se busca incentivar la investigación de tecnologías robóticas en el ámbito pedagógico. Se recomienda realizar investigaciones dentro de este campo para el beneficio de generaciones futuras de modo que se involucren con tecnologías de vanguardia desde edades tempranas.
- Se recomienda utilizar un robot humanoide social que mejore la interactividad y el entretenimiento del juego con reacciones y emociones humanas dependiendo del estado del juego.
- Se recomienda combinar métodos de detección de objetos alternos como el FTIR o el LLP para brindar una robustez al sistema de RDI implementado en este sistema. Con esto se obtendría una solidez en los gestos táctiles y una disminución de los gestos falsos detectados como reales.
- Se recomienda agregar cámaras de seguridad infrarrojas, destinadas a captar solamente luz infrarroja. Estas suelen ser realmente caras, pero sus prestaciones de nitidez y capacidad de luz son muy remarcables. Estas superan a la cámara usada en este proyecto. Esto se recomienda para poder captar las marcas fiduciales que no se logran enfocar por el rango limitado de la PlayStation Eye, o captar las burbujas sin oclusión y poco ruido.
- Otra recomendación de este proyecto en cuanto a los reflectores infrarrojos, consiste en sustituir por marcos leds infrarrojos fabricados especialmente. Estos marcos tienen la ventaja de brindar un ángulo de 120° y emitir una luz menos puntual y más distribuida que los reflectores de seguridad. Estos marcos previenen oclusiones y puntos muy luminosos solo en ciertas áreas.

- Se recomienda también diseñar una versión más pequeña de este prototipo que combine tecnologías similares, pero en menor escala. Esto mejoraría la implementación de la máquina y lo haría mucho más fácil de calibrar y poner a punto. Eso, sin mencionar el costo y la portabilidad del sistema.
- Como última recomendación en tanto al software de aplicación se recomienda seguir agregándole animaciones y efectos multimedia, puesto que el motor de juegos donde fue diseñado, es de gama alta, y soporta muchas características de los juegos profesionales. Esto brindaría una interacción más intuitiva con el usuario y a su vez, permitir que este se involucre y divierta mientras aprende.

BIBLIOGRAFÍA

- ACIPCO. (n.d.). Hierro Dúctil. Recuperado de: <http://www.valamer.com.ar/hd.htm>
- Andino, R. C., & Salgado, C. J. (2012). Diseño e implementación de un sistema de entrenamiento con el protocolo estándar ISO 14908 Lonworks para el laboratorio de domótica del departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5707>
- ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. (2003). IPC-2221A, (Mayo), 124.
- AUTOBOTIC. (n.d.). DS3218 Servo, Control Angle 180 degree+25T Servo Armv. Retrieved April 16, 2017, from <https://www.autobotic.com.my/ds3218-servo-control-angle-180-degree-25t-servo-armv>
- Banerjee, N., Saha, D., Singh, A., & Sanyal, G. (2012). A Simple Autonomous Robotic Manipulator for playing Chess against any opponent in Real Time.
- Barrientos Cruz, A., Peñín Honrubia, L. F., Balaguer Bernaldo de Quiroz, C., & Aracil Santoja, R. (1997). *Fundamentos De Robotica*. Madrid: McGraw - Hill.
- Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava). McGraw-Hill Latinoamérica.
- Cenev, Z. (2014). *DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DOUBLE H'-GANTRY MANIPULATOR FOR TUT MICROFACTORY CONCEPT*. TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Chen, A. T. Y., & Wang, K. I. K. (2016). Computer vision based chess playing capabilities for the Baxter humanoid robot. *Proceedings - 2016 the 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2016*, 11–14. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2016.7486689>
- Du, G., Bi, S., Xiao, Y., & Li, W. (2013). The compliance control study of Chinese chess robot in Cartesian coordinate system. *International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ICAMEchS*, 31–35.

<https://doi.org/10.1109/ICAMechS.2013.6681745>

- Dung, L. R., Lai, G. Y., & Wu, Y. Y. (2013). Shadow touching for interactive projectors. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 1798–1802. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6637962>
- EKT. (2015). *CNC LINEAR ROD RAIL SHAFT SUPPORT Model : SHF8 Flanged Shaft Support Blocks*.
- Fernández, F. J. (2010). *El Ajedrez de la Filosofía* (Plaza y Va).
- Gates Co. (2007a). *Synchronous Belt Data Summary Belt Tensile Properties*.
- Gates Co. (2007b). *Timing belts, pulleys, chains and sprockets*, 86.
- Gliga, F., & Flesner, P. I. (2014). Cognitive Benefits of Chess Training in Novice Children. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 116, 962–967. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.328>
- Godoy Hernández, R. D., & Rodríguez Quintero, W. (2007). Diseño y modelamiento de un robot cartesiano para el posicionamiento de piezas.
- Gonçalves, J., Lima, J., & Leitão, P. (n.d.). CHESS ROBOT SYSTEM : A MULTI - DISCIPLINARY EXPERIENCE IN AUTOMATION.
- Goncalves José, & Leitao Paulo. (2004). CHESS ROBOT SYSTEM.
- Holzammer, A., & Hahne, U. (2009). Combining Diffuse Illumination and Frustrated Total Internal Reflection for touch detection.
- Hóz, N., Veres, J., & Cserey, G. (2011). Hall position encoder-based touch surface. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, (Cd), 220–225. <https://doi.org/10.1109/AIM.2011.6027036>
- Hurricane Laser. (n.d.). *Recommended Engraving and Cutting Settings for 100W Laser*.
- IdePlas. (2012). *Ficha técnica lamina PMMA*.

- INSTRUCTABLES. (2014). DIY MT-50 Multitouch Table. Retrieved May 21, 2017, from <http://www.instructables.com/id/DIY-MT-50-Multitouch-Table/>
- Irestal Group. (n.d.). *Tablas Tecnicas del Acero Inoxidable*.
- Khan, T. M., Arshad, M., & Ahmad Choudry, M. (2013). Modeling and Control of Cartesian Robot Manipulator.
- Kim, S., Kim, J., & Lee, C. (2007). Implementation of Multi-touch Tabletop Display for HCI (Human Computer Interaction). *Techniques*, 854–863. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73107-8>
- LEADSHINE TECHNOLOGY CO. LTD. (2014). *Motor Torque Calculation*.
- Luqman, H. M., & Zaffar, M. (2016). Chess Brain and Autonomous Chess Playing Robotic System. *International Conference Autonomous Robot System and Competitions*. <https://doi.org/10.1109/ICARSC.2016.27>
- Madian, & NUI Group. (2009). Spectral Analysis of IR LEDs and Filters - NUI Group Community Forums. Retrieved April 6, 2017, from <http://nuigroup.com/forums/viewthread/6458/>
- MAKEHARDWARE. (2016). Finding a low-latency webcam. Retrieved April 27, 2017, from <https://www.makehardware.com/2016/03/29/finding-a-low-latency-webcam/>
- MakeItFrom. (2009). Polylactic Acid (PLA, Polylactide). Retrieved February 26, 2017, from <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide>
- Matuszek, C., & Mayton, B. (2011). Gambit: A Robust Chess-Playing Robotic System. ... *on Robotics and* Retrieved from <http://ai.cs.washington.edu/pubs/240>
- Mohtar, S. (2013). *Design and Structural Analysis of a CNC Router*. Lebanese University.
- NATIONAL PRECISION BEARINGS. (2009). *Industrial Ball Bearings*.

- Ningbo Meiyate Precision Transfers Component Co., L. (2015). *Linear Motion Ball Bearing Slides*. Shangshao.
- PBC Linear Co. (2013). NEMA 17 Stepper Motor, 6200490, 5.
- Picussa, J., Garc, L. S., Bueno, J., Direne, A. I., Bona, L. C. E. De, Silva, F., ... Sunye, M. S. (2004). a User-Interface Environment Solution As an Educational Tool for an Online Chess Server on the Web, 262–267.
- Ramsundar, K. G. (2015). Interactive touch board using IR camera. *2nd International Conference on Electronics and Communication Systems, ICECS 2015*, (Icecs), 1690–1695. <https://doi.org/10.1109/ECS.2015.7124874>
- RPOne. (n.d.). Alloy GT2 Belt Clamp RepRap 3D Printer Delta Kossel Prusa i3 Linear Motion CNC | eBay. Retrieved April 2, 2017, from <http://www.ebay.com/itm/Alloy-GT2-Belt-Clamp-RepRap-3D-Printer-Delta-Kossel-Prusa-i3-Linear-Motion-CNC-/321937363449>
- Sarker, S. (2015). Wizard chess: An autonomous chess playing robot. *2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, 475–478. <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE.2015.7443971>
- Schneider Electric. (2013). *NEMA 23 1.8 degrees 2-phase stepper motor*.
- Schöning, J., Brandl, P., Daiber, F., Echtler, F., Hilliges, O., Hook, J., ... Zadow, U. Von. (2008). Multi-Touch Surfaces : A Technical Guide Technical Report TUM-I0833 Categories and Subject Descriptors. *Most*, (January 2016), 19. Retrieved from <http://www.mendeley.com/research/multitouch-surfaces-a-technical-guide/>
- Schöning, J., Hook, J., Bartindale, T., Schmidt, D., Oliver, P., Echtler, F., ... Zadow, U. (2010). Building Interactive Multi-touch Surfaces. *Tabletops - Horizontal Interactive Displays*, 27–49. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-113-4_2
- SDP/SI. (2007). Ball & acme lead screw technical information.
- Shaizan Jusoh, K. O. (2011). The Mechanical and Circuit Design of Robot Soccer : A Study, (June), 119–124.

- Slazar Pereyra, M. (2008). Robot Cartesiano. *Seminario de Mecatronica*.
- Somanader, M. C., Saylor, M. M., & Levin, D. T. (2011). Remote control and children's understanding of robots. *Journal of Experimental Child Psychology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.005>
- Sony Computer Entertainment. (2012). *Field of View for Ps3 Eye Camera*.
- SUMITEC. (2010). Acero Inoxidable AISI 304. *Betelgeux, 1, 3*.
- SUPERTRONIC. (n.d.). *Tabla de propiedades del plastico abs*.
- T.E.A. Transmissions Pty Ltd. (n.d.). Flanged Shaft Support Blocks.
- TEKKOTSU LAB. (n.d.). The Chiara Robot. Recuperado: Mayo 21, 2017, de
<http://chiara-robot.org/>
- ThyssenKrupp. (n.d.). *Aceros de Construcción*. Recuperado de
http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/aceros_construccion_ThyssenKrupp.pdf
- Torres, C. M. (2007). EL JUEGO COMO ESTRATEGIA DE APRENDIZAJE EN EL AULA.
- Tseng, C. H., & Wei, Y. C. (2011). Design and implementation of the multi-touch tables. *Proceedings - 1st International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, RVSP 2011*, 340–343. <https://doi.org/10.1109/RVSP.2011.38>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos* (Quinta Edi).
- Urting, D., & Berbers, Y. (2003). MarineBlue: A Low-cost Chess Robot. *Robotics and Applications*. Retrieved from
http://www.researchgate.net/publication/220785821_MarineBlue_A_Low-cost_Chess_Robot/file/50463522e1d99a1e6c.pdf
- VALENCIANA DE ALUMINIOS. (n.d.). *Aluminio AW7075*.
- Valentin Simonov. (2015). Unity Touch. Retrieved February 8, 2017, from
<http://touchprefab.com/>

Yacuzzi, E., Martín, F., & Pharma, A. (2016). QFD: CONCEPTOS, APLICACIONES Y NUEVOS DESARROLLOS Enrique Yacuzzi (Universidad del CEMA) Fernando Martín (Aventis Pharma). *Yacuzzi, Enrique Martín, Fernando Pharma, Aventis*, 1–37. <https://doi.org/10.1007/b138775>