



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Comparativa de Controladores al Interactuar con
una Torre de Hanoi en Entorno de
Realidad Virtual**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Rubén Abraham Paredes Jiménez

DIRECTOR DE TESIS

M.A. Luis Yair Bautista Blanco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la vida y las oportunidades que me ha permitido a lo largo de estos años. Así mismo, quiero agradecer al Apóstol Naasón Joaquín García por su ejemplo incansable, porque su amor nos cobija y nos da fuerza para caminar a su lado.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme aprender en sus instalaciones el valor de la Ingeniería, por todas las lecciones brindadas y por la oportunidad de realizar un intercambio académico en la Universidad de Nagoya. Agradezco a los más de 60 profesores por su enseñanza e instrucción en el significado y valor de la Ingeniería Mecatrónica.

Agradezco a mis padres, Miguel y Maribel, quienes me apoyaron en todo lo posible según su capacidad, y muchas veces más allá de ella. Sin ellos, este esfuerzo no habría sido posible; este logro también es suyo. Quiero que sepan que los amo y los llevo en mi corazón.

Agradezco a mi hermano Miguel, por ser el mejor amigo y compañero que Dios me ha concedido. Hemos estado juntos en los mejores y los peores días desde el principio. Agradezco y reconozco tu cuidado más allá del deber, solo descrito como amor fraternal. Deseo que encuentres tu camino en esta vida y prometo estar allí para apoyarte.

A mi novia y amiga Sabetahí, Dios te pague por tu amor incondicional y tu alegría. Me has enseñado a disfrutar de la vida en el presente, sin dejar de lado los sueños del futuro. Me has compartido tu brillo, y con tu luz pude ver la mía. Nuestro tiempo llegará pronto, lo prometo.

Agradezco a mis tíos por su apoyo y sus ánimos a lo largo de estos años, que Dios les pague por su amor. A mi abuela Trinidad le agradezco su cuidado, y a mi abuela Tina quisiera decirle que lo logramos, espero escucharle decir *xacua mucamac* una vez más.

Agradezco a los amigos que conocí en el camino: a quienes conocí desde el principio, Lilian, Salvador, Fernando y Ernesto; a los que hice en el intercambio, Iván y Rodrigo; y en especial quiero agradecer a Karina González y Carlos Luna, por ser mis amigos hasta el final. Espero conservar su amistad en el futuro.

Quiero agradecer al profesor Luis Yair Bautista Blanco por su apoyo, su gran paciencia y su amistad al haber dirigido este trabajo de tesis. También agradezco a los sinodales, Gabriel Hurtado Chong, Álvaro Núñez, y Edgar Raymundo López, quienes también fueron mis maestros, brindándome su guía, enseñanza y consejo. Así mismo, agradezco a la ingeniera Miriam Mendoza por su apoyo.

También agradezco a los demás participantes de la tesis: Abdiel, Edgar, Bidkar, Alejandro, Arnaud, Israel, Joel, Daniel M., Daniel R., Diana, Moisés, Roy, Araceli, Eduardo y Héctor.

Este es el capítulo final del sueño que comenzó hace 10 años, el resultado de esfuerzos conjuntos y la antesala para seguir desarrollándome profesionalmente. Reconozco que queda mucho por aprender, y espero estar a la altura de las expectativas. Por mi raza hablará el espíritu.

Índice

Agradecimientos
Índice	ii
Lista De Figuras	iv
Lista De Tablas	xi
Capítulo 1 Contexto Teórico	1
1.1 Ambientes Virtuales	2
1.1.1 Usuarios de Ambientes Virtuales	3
1.1.2 Interfaz entre el Usuario y el Ambiente Virtual	3
1.1.3 Actividades en un Mundo Virtual	3
1.1.4 Dispositivos de entrada para la interacción Mundos Virtuales	4
1.2 Torre De Hanoi	9
1.2.1 Objetivo	9
1.2.2 Descripción de la Prueba y su algoritmo de resolución	10
Capítulo 2 Planteamiento Del Problema	12
2.1 Objetivos	12
2.1.1 Objetivo General	12
2.1.2 Objetivos Específicos	12
2.1.3 Justificación	13
2.1.4 Alcance	13
Capítulo 3 Diseño De Entorno Virtual	15
3.1 Modelado en 2D y 3D	15
3.1.1 Discos	15
3.1.2 Base	16
3.2 Física del entorno virtual	17
3.2.1 Exportación a motor gráfico	17
3.2.2 Interacción entre objetos – Colliders – Sistema de Colisiones	19
3.2.3 Programación de movimientos Control y Teclado	20
3.2.4 Programación de movimientos LEAP Motion	22
3.2.5 Interfaz con el usuario	24
3.2.6 Iluminación y Ambiente	27
Capítulo 4 Experimentación Con Usuarios	29
4.1 Introducción / Protocolo de Pruebas	29
4.2 Aplicación de pruebas a distancia	29

4.2.1	Plataforma – Itch	29
4.2.2	Videoconferencias	31
4.3	Aplicación de pruebas presenciales	34
4.4	Características del Protocolo de Pruebas	36
4.4.1	Pasos del Protocolo de Pruebas	36
4.5	Lista de movimientos	38
4.5.1	Pasos para desplazar la Torre del poste central al poste derecho	38
4.5.2	Pasos para desplazar la Torre del poste central al poste izquierdo	38
Capítulo 5	Resultados	40
5.1	Automatización de Código en Python	40
5.2	Presentación de Resultados	40
5.2.1	Latencia de Movimientos	40
5.2.2	Cantidad Total de Movimientos	45
5.2.3	Rastreo de Movimiento (Tracker)	46
5.2.4	Comparativa de Posición en X vs Tiempo	47
5.2.5	Comparativa de Posición en Y vs Tiempo de cada controlador	55
5.2.6	Comparativa de Posición en X vs Y de cada controlador	63
5.3	Análisis de Resultados	71
5.3.1	Tiempo Total efectivo o Curva de Aprendizaje	71
5.3.2	Ancho de Banda	76
5.4	Tabla Relacional	80
Capítulo 6	Conclusiones	83
Capítulo 7	Trabajo a futuro	86
Referencias	87
Anexo I	89

Lista De Figuras

Figura 1.1 Sensorama, primer dispositivo inmersivo de Realidad Virtual [3]	1
Figura 1.2 Diagrama de Milgram continuo, relación entre ambientes virtuales y ambientes reales (Recreado por el autor) [4]	2
Figura 1.3 Controles de generaciones anteriores y actuales (Archivo Personal)	5
Figura 1.4 Teclados de generaciones anteriores y actuales (Archivo Personal)	5
Figura 1.5 Controles de Wii [5].....	6
Figura 1.6 Huesos y Grados de Libertad en una mano [6]	6
Figura 1.7 Meta Quest Pro [7]	7
Figura 1.8 Las Apple Vision Pro [9]	7
Figura 1.9 Control de Gestos LEAP Motion en su primera y segunda generación [9]	8
Figura 1.10 Pantalla de Visor de Realidad Virtual [11]	8
Figura 1.11 Guantes hápticos desarrollados por Meta. [12].....	9
Figura 1.12 Torre De Hanoi de 4 discos [14]	10
Figura 1.13 Representación gráfica de los estados de una Torre de Hanoi [14]	11
Figura 3.1 Discos de la Torre de Hanoi	16
Figura 3.2 Diseño Inicial de la base de la Torre de Hanoi	16
Figura 3.3 Diseño Secundario de la base de la Torre de Hanoi.....	17
Figura 3.4 Configuración de importación del modelo Hanoi	17
Figura 3.5 Modelos en carpeta principal	18
Figura 3.6 Características del Cuerpo Rígido del disco Azul	18
Figura 3.7 Disco Azul.....	20
Figura 3.8 Disco Verde.....	20
Figura 3.9 Disco Anaranjado.....	20
Figura 3.10 Disco Rojo.....	20
Figura 3.11 Base con colliders	20
Figura 3.12 Control y sus comandos	21
Figura 3.13 Teclado.....	22
Figura 3.14 Modelo de manos interactivas - Capsule hands, vista superior	22
Figura 3.15 Modelo de manos interactivas - Capsule hands, vista ISO	22
Figura 3.16 Mano Interactiva Izquierda	23
Figura 3.17 Mano Interactiva Derecha	23
Figura 3.18 Código Interactivo de Comportamiento.....	24
Figura 3.19 Rango de interacción. Vista lateral	24
Figura 3.20 Rango de interacción. Vista frontal.....	24
Figura 3.21 Rango interactivo. Vista Superior	24
Figura 3.22 Rango interactivo. Perspectiva.....	24
Figura 3.23 Escena inicial – Menú inicial	25
Figura 3.24 Menú de selección de controladores	25
Figura 3.25 Cronometro y contador de movimientos.....	26
Figura 3.26 Torre de Hanoi con interfaz de Teclado.....	26
Figura 3.27 Torre de Hanoi con interfaz de control	27
Figura 3.28 Torre de Hanoi con interfaz de gestos.....	27

Figura 3.29 Skybox Midnight, utilizado en la escena principal donde se desarrolló la prueba	28
Figura 3.30 Skybox Sunset, utilizado en el menú inicial	28
Figura 3.31 Skybox Daybreak, utilizado en el menú de selección de controlador.....	28
Figura 4.1 Cartel de Susana distancia [17]	29
Figura 4.2 Página de inicio de sesión	30
Figura 4.3 Página de inicio del proyecto	31
Figura 4.4 Plataforma de videoconferencia	32
Figura 4.5 Prueba 1 Abdiel S.	32
Figura 4.6 Prueba 2 Carlos L.....	32
Figura 4.7 Prueba 3 Edgar P.....	32
Figura 4.8 Prueba 4 Bidkar P.....	32
Figura 4.9 Prueba 5 Daniel M.	33
Figura 4.10 Prueba 7 Diego M.	33
Figura 4.11 Prueba 8 Rodrigo R.....	33
Figura 4.12 Prueba 9 Moisés O.	33
Figura 4.13 Prueba 10 Arnaud.....	33
Figura 4.14 Prueba 11 Salvador A.	33
Figura 4.15 Prueba 12 Joel A.	33
Figura 4.16 Prueba 13 Israel N.....	33
Figura 4.17 Prueba 14 Ivan L.	33
Figura 4.18 Prueba 15 Roy L.	34
Figura 4.19 Prueba 16 Daniel R.	34
Figura 4.20 Prueba 17 Diana L.....	34
Figura 4.21 Prueba 18 Santa.....	34
Figura 4.22 Prueba 19 Victor T.....	34
Figura 4.23 Prueba 20 Ernesto C.....	34
Figura 4.24 Prueba 21 Alejandro J.	35
Figura 4.25 Prueba 22 Araceli	35
Figura 4.26 Prueba 23 Eduardo	35
Figura 4.27 Prueba 24 Héctor.....	35
Figura 4.28 Prueba 25 Sabetahí.....	36
Figura 4.29 Menú inicial	37
Figura 4.30 Menú de controladores	37
Figura 4.31 Posición inicial de la Torre	38
Figura 4.32 Posición final de la Torre a la derecha	39
Figura 4.33 Posición final de la Torre a la izquierda.....	39
Figura 5.1 Delta de tiempo de una instrucción	41
Figura 5.2 Prueba 1 Delta de Tiempo.....	41
Figura 5.3 Prueba 2 Delta de Tiempo.....	41
Figura 5.4 Prueba 3 Delta de Tiempo.....	42
Figura 5.5 Prueba 4 Delta de Tiempo.....	42
Figura 5.6 Prueba 5 Delta de Tiempo.....	42
Figura 5.7 Prueba 7 Delta de Tiempo.....	42

Figura 5.8 Prueba 8 Delta de Tiempo.....	42
Figura 5.9 Prueba 9 Delta de Tiempo.....	42
Figura 5.10 Prueba 10 Delta de Tiempo.....	43
Figura 5.11 Prueba 11 Delta de Tiempo.....	43
Figura 5.12 Prueba 12 Delta de Tiempo.....	43
Figura 5.13 Prueba 13 Delta de Tiempo.....	43
Figura 5.14 Prueba 14 Delta de Tiempo.....	43
Figura 5.15 Prueba 15 Delta de Tiempo.....	43
Figura 5.16 Prueba 16 Delta de Tiempo.....	44
Figura 5.17 Prueba 17 Delta de Tiempo.....	44
Figura 5.18 Prueba 18 Delta de Tiempo.....	44
Figura 5.19 Prueba 19 Delta de Tiempo.....	44
Figura 5.20 Prueba 20 Delta de Tiempo.....	44
Figura 5.21 Prueba 21 Delta de Tiempo.....	45
Figura 5.22 Prueba 22 Delta de Tiempo.....	45
Figura 5.23 Prueba 23 Delta de Tiempo.....	45
Figura 5.24 Prueba 24 Delta de Tiempo.....	45
Figura 5.25 Prueba 25 Delta de Tiempo.....	45
Figura 5.26 Interfaz de Tracker	47
Figura 5.27 Prueba 1 Control en el eje X	49
Figura 5.28 Prueba 1 Teclado en el eje X	49
Figura 5.29 Prueba 2 Control en el eje X	49
Figura 5.30 Prueba 2 Teclado en el eje X	49
Figura 5.31 Prueba 3 Control en el eje X	49
Figura 5.32 Prueba 3 Teclado en el eje X	49
Figura 5.33 Prueba 4 Control en el eje X	50
Figura 5.34 Prueba 4 Teclado en el eje X	50
Figura 5.35 Prueba 5 Control en el eje X	50
Figura 5.36 Prueba 5 Teclado en el eje X	50
Figura 5.37 Prueba 8 Control en el eje X	50
Figura 5.38 Prueba 8 Teclado en el eje X	50
Figura 5.39 Prueba 9 Control en el eje X	51
Figura 5.40 Prueba 9 Teclado en el eje X	51
Figura 5.41 Prueba 10 Control en el eje X	51
Figura 5.42 Prueba 10 Control en el eje X	51
Figura 5.43 Prueba 11 Control en el eje X	51
Figura 5.44 Prueba 11 Teclado en el eje X.....	51
Figura 5.45 Prueba 12 Control en el eje X	52
Figura 5.46 Prueba 12 Teclado en el eje X.....	52
Figura 5.47 Prueba 13 Control en el eje X	52
Figura 5.48 Prueba 13 Teclado en el eje X.....	52
Figura 5.49 Prueba 14 Control en el eje X	52
Figura 5.50 Prueba 14 Teclado en el eje X.....	52
Figura 5.51 Prueba 15 Control en el eje X	53

Figura 5.52 Prueba 15 Teclado en el eje X.....	53
Figura 5.53 Prueba 16 Control en el eje X.....	53
Figura 5.54 Prueba 16 Teclado en el eje X.....	53
Figura 5.55 Prueba 17 Control en el eje X.....	53
Figura 5.56 Prueba 17 Teclado en el eje X.....	53
Figura 5.57 Prueba 18 Control en el eje X.....	54
Figura 5.58 Prueba 18 Teclado en el eje X.....	54
Figura 5.59 Prueba 19 Control en el eje X.....	54
Figura 5.60 Prueba 19 Teclado en el eje X.....	54
Figura 5.61 Prueba 20 Control en el eje X.....	54
Figura 5.62 Prueba 20 Teclado en el eje X.....	54
Figura 5.63 Prueba 21 Control en el eje X.....	55
Figura 5.64 Prueba 21 Teclado en el eje X.....	55
Figura 5.65 Prueba 21 LEAP en el eje X.....	55
Figura 5.66 Prueba 22 Control en el eje X.....	55
Figura 5.67 Prueba 22 Teclado en el eje X.....	55
Figura 5.68 Prueba 22 LEAP en el eje X.....	55
Figura 5.69 Prueba 23 Control en el eje X.....	55
Figura 5.70 Prueba 23 Teclado en el eje X.....	55
Figura 5.71 Prueba 23 LEAP en el eje X.....	55
Figura 5.72 Prueba 24 Control en el eje X.....	55
Figura 5.73 Prueba 24 Teclado en el eje X.....	55
Figura 5.74 Prueba 24 LEAP en el eje X.....	55
Figura 5.75 Prueba 25 Control en el eje X.....	55
Figura 5.76 Prueba 25 Teclado en el eje X.....	55
Figura 5.77 Prueba 25 LEAP en el eje X.....	55
Figura 5.78 Prueba 1 Control en el eje Y.....	56
Figura 5.79 Prueba 1 Teclado en el eje Y.....	56
Figura 5.80 Prueba 2 Control en el eje Y.....	57
Figura 5.81 Prueba 2 Teclado en el eje Y.....	57
Figura 5.82 Prueba 3 Control en el eje Y.....	57
Figura 5.83 Prueba 3 Teclado en el eje Y.....	57
Figura 5.84 Prueba 4 Control en el eje Y.....	57
Figura 5.85 Prueba 4 Teclado en el eje Y.....	57
Figura 5.86 Prueba 5 Control en el eje Y.....	58
Figura 5.87 Prueba 5 Teclado en el eje Y.....	58
Figura 5.88 Prueba 8 Control en el eje Y.....	58
Figura 5.89 Prueba 8 Teclado en el eje Y.....	58
Figura 5.90 Prueba 9 Control en el eje Y.....	58
Figura 5.91 Prueba 9 Teclado en el eje Y.....	58
Figura 5.92 Prueba 10 Control en el eje Y.....	59
Figura 5.93 Prueba 10 Teclado en el eje Y.....	59
Figura 5.94 Prueba 11 Control en el eje Y.....	59
Figura 5.95 Prueba 11 Teclado en el eje Y.....	59

Figura 5.96 Prueba 12 Control en el eje Y	59
Figura 5.97 Prueba 12 Teclado en el eje Y.....	59
Figura 5.98 Prueba 13 Control en el eje Y	60
Figura 5.99 Prueba 13 Teclado en el eje Y.....	60
Figura 5.100 Prueba 14 Control en el eje Y	60
Figura 5.101 Prueba 14 Teclado en el eje Y.....	60
Figura 5.102 Prueba 15 Control en el eje Y	60
Figura 5.103 Prueba 15 Teclado en el eje Y.....	60
Figura 5.104 Prueba 16 Control en el eje Y	61
Figura 5.105 Prueba 16 Teclado en el eje Y.....	61
Figura 5.106 Prueba 17 Control en el eje Y	61
Figura 5.107 Prueba 17 Teclado en el eje Y.....	61
Figura 5.108 Prueba 18 Control en el eje Y	61
Figura 5.109 Prueba 18 Teclado en el eje Y.....	61
Figura 5.110 Prueba 19 Control en el eje Y	62
Figura 5.111 Prueba 19 Teclado en el eje Y.....	62
Figura 5.112 Prueba 20 Control en el eje Y	62
Figura 5.113 Prueba 20 Teclado en el eje Y.....	62
Figura 5.114 Prueba 21 Control en el eje Y	62
Figura 5.115 Prueba 21 Teclado en el eje Y.....	62
Figura 5.116 Prueba 21 LEAP en el eje Y	62
Figura 5.117 Prueba 22 Control en el eje Y	63
Figura 5.118 Prueba 22 Teclado en el eje Y.....	63
Figura 5.119 Prueba 22 LEAP en el eje Y	63
Figura 5.120 Prueba 23 Control en el eje Y	63
Figura 5.121 Prueba 23 Teclado en el eje Y.....	63
Figura 5.122 Prueba 23 LEAP en el eje Y	63
Figura 5.123 Prueba 24 Control en el eje Y	63
Figura 5.124 Prueba 24 Teclado en el eje Y.....	63
Figura 5.125 Prueba 24 LEAP en el eje Y	63
Figura 5.126 Prueba 25 Control en el eje Y	63
Figura 5.127 Prueba 25 Teclado en el eje Y.....	63
Figura 5.128 Prueba 25 LEAP en el eje Y	63
Figura 5.129 Prueba 1 Control en XvsY	64
Figura 5.130 Prueba 1 Teclado en XvsY.....	64
Figura 5.131 Prueba 2 Control en XvsY	64
Figura 5.132 Prueba 2 Teclado en XvsY.....	64
Figura 5.133 Prueba 3 Control en XvsY	65
Figura 5.134 Prueba 3 Teclado en XvsY.....	65
Figura 5.135 Prueba 4 Control en XvsY	65
Figura 5.136 Prueba 4 Teclado en XvsY.....	65
Figura 5.137 Prueba 5 Control en XvsY	65
Figura 5.138 Prueba 5 Teclado en XvsY.....	65
Figura 5.139 Prueba 8 Control en XvsY	66

Figura 5.140 Prueba 8 Teclado en XvsY.....	66
Figura 5.141 Prueba 9 Control en XvsY	66
Figura 5.142 Prueba 9 Teclado en XvsY.....	66
Figura 5.143 Prueba 10 Control en XvsY	66
Figura 5.144 Prueba 10 Teclado en XvsY.....	66
Figura 5.145 Prueba 11 Control en XvsY	67
Figura 5.146 Prueba 11 Teclado en XvsY.....	67
Figura 5.147 Prueba 12 Control en XvsY	67
Figura 5.148 Prueba 12 Teclado en XvsY.....	67
Figura 5.149 Prueba 13 Control en XvsY	67
Figura 5.150 Prueba 13 Teclado en XvsY.....	67
Figura 5.151 Prueba 14 Control en XvsY	68
Figura 5.152 Prueba 14 Teclado en XvsY.....	68
Figura 5.153 Prueba 15 Control en XvsY	68
Figura 5.154 Prueba 15 Teclado en XvsY.....	68
Figura 5.155 Prueba 16 Control en XvsY	68
Figura 5.156 Prueba 16 Teclado en XvsY.....	68
Figura 5.157 Prueba 17 Control en XvsY	69
Figura 5.158 Prueba 17 Teclado en XvsY.....	69
Figura 5.159 Prueba 18 Control en XvsY	69
Figura 5.160 Prueba 18 Teclado en XvsY.....	69
Figura 5.161 Prueba 19 Control en XvsY	69
Figura 5.162 Prueba 19 Teclado en XvsY.....	69
Figura 5.163 Prueba 20 Control en XvsY	70
Figura 5.164 Prueba 20 Teclado en XvsY.....	70
Figura 5.165 Prueba 21 Control en XvsY	70
Figura 5.166 Prueba 21 Teclado en XvsY.....	70
Figura 5.167 Prueba 21 LEAP en XvsY	70
Figura 5.168 Prueba 22 Control en XvsY	70
Figura 5.169 Prueba 22 Teclado en XvsY.....	70
Figura 5.170 Prueba 22 LEAP en XvsY	70
Figura 5.171 Prueba 23 Control en XvsY	71
Figura 5.172 Prueba 23 Teclado en XvsY.....	71
Figura 5.173 Prueba 23 Control en XvsY	71
Figura 5.174 Prueba 24 Control en XvsY	71
Figura 5.175 Prueba 24 Teclado en XvsY.....	71
Figura 5.176 Prueba 24 Control en XvsY	71
Figura 5.177 Prueba 25 Control en XvsY	71
Figura 5.178 Prueba 25 Teclado en XvsY.....	71
Figura 5.179 Prueba 25 Control en XvsY	71
Figura 5.180 Curva de Aprendizaje.....	72
Figura 5.181 Prueba 1 Curva de Aprendizaje	72
Figura 5.182 Prueba 2 Curva de Aprendizaje	72
Figura 5.183 Prueba 3 Curva de Aprendizaje	72

Figura 5.184 Prueba 4 Curva de Aprendizaje	72
Figura 5.185 Prueba 5 Curva de Aprendizaje	73
Figura 5.186 Prueba 7 Curva de Aprendizaje	73
Figura 5.187 Prueba 8 Curva de Aprendizaje	73
Figura 5.188 Prueba 9 Curva de Aprendizaje	73
Figura 5.189 Prueba 10 Curva de Aprendizaje.....	73
Figura 5.190 Prueba 11 Curva de Aprendizaje.....	73
Figura 5.191 Prueba 12 Curva de Aprendizaje.....	74
Figura 5.192 Prueba 13 Curva de Aprendizaje.....	74
Figura 5.193 Prueba 14 Curva de Aprendizaje.....	74
Figura 5.194 Prueba 15 Curva de Aprendizaje.....	74
Figura 5.195 Prueba 16 Curva de Aprendizaje.....	74
Figura 5.196 Prueba 17 Curva de Aprendizaje.....	74
Figura 5.197 Prueba 18 Curva de Aprendizaje.....	75
Figura 5.198 Prueba 19 Curva de Aprendizaje.....	75
Figura 5.199 Prueba 20 Curva de Aprendizaje.....	75
Figura 5.200 Prueba 21 Curva de Aprendizaje.....	75
Figura 5.201 Prueba 22 Curva de Aprendizaje.....	75
Figura 5.202 Prueba 23 Curva de Aprendizaje.....	76
Figura 5.203 Prueba 24 Curva de Aprendizaje.....	76
Figura 5.204 Prueba 25 Curva de Aprendizaje.....	76
Figura 5.205 Prueba 1 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.206 Prueba 2 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.207 Prueba 3 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.208 Prueba 4 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.209 Prueba 5 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.210 Prueba 8 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.211 Prueba 9 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.212 Prueba 10 Delta de Ancho de Banda.....	77
Figura 5.213 Prueba 11 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.214 Prueba 12 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.215 Prueba 13 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.216 Prueba 14 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.217 Prueba 15 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.218 Prueba 16 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.219 Prueba 17 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.220 Prueba 18 Delta de Ancho de Banda.....	78
Figura 5.221 Prueba 19 Delta de Ancho de Banda.....	79
Figura 5.222 Prueba 20 Delta de Ancho de Banda.....	79
Figura 5.223 Prueba 21 Delta de Ancho de Banda.....	79
Figura 5.224 Prueba 22 Delta de Ancho de Banda.....	79
Figura 5.225 Prueba 23 Delta de Ancho de Banda.....	79
Figura 5.226 Prueba 24 Delta de Ancho de Banda.....	79
Figura 5.227 Prueba 25 Delta de Ancho de Banda.....	80

Lista De Tablas

Tabla 3.1 Medidas de discos.....	15
Tabla 3.2 Propiedades físicas del disco	19
Tabla 5.1 Número de movimientos de pruebas	46
Tabla 5.2 Comparativa de Controladores	81

Capítulo 1 Contexto Teórico

“... Pero ¿qué es la realidad? ... Todo es un sueño. Todo es una ilusión; Yo soy tu visión como tú eres la mía...” Stanley G. Weinbaum

Los primeros conceptos relacionados con entornos virtuales datan del siglo XVIII en donde diversos experimentos se realizaron para generar experiencias inmersivas, tales como la creación de salas en donde se intentaba recrear paisajes de lugares lejanos.

En 1932, el autor Aldous Huxley introdujo la idea de películas que pudieran provocar sensaciones o sentimientos en su novela “*Un Mundo Feliz*”. Tres años después, en 1935, el autor de ciencia ficción Stanley G. Weinbaum por primera vez describe el concepto de los entornos virtuales de manera moderna, en su cuento corto “*Las gafas de Pigmalión*”. [1] En este se presentó el concepto de experimentar, a través de los sentidos de la vista, gusto, tacto y olfato, un entorno virtual realista al colocarse unas gafas.

Mientras distintos autores desarrollaban el concepto de entornos virtuales, los ingenieros se planteaban cómo poder hacer viable técnicamente la experiencia de un entorno virtual. Así mismo, en el siglo XX se creaban las bases tecnológicas en las que los ambientes virtuales se desarrollarían para lograr lo que son hoy, y lo que serán en el futuro. Por ejemplo, se desarrollaron las primeras máquinas que permitían interactuar con ambientes virtuales, tanto inmersivos como no inmersivos. Se desarrolló software que permitía diseñar e interactuar con objetos en 3D.

En 1962, Morton Heilig desarrolló Sensorama, la primera máquina que permitía experimentar ambientes virtuales multisensoriales usando una pantalla montada en la cabeza que permitía una visión amplia, estereoscópica, y sonido estéreo. Su meta era “proveer un aparato que estimule una deseada experiencia al desarrollar sensaciones en una pluralidad de sentidos”. [2] En 1965, Iván Sutherland, hizo un ensayo acerca de la realidad virtual y aumentada, en el cuál propuso que la máquina final sería literalmente la entrada al país de las maravillas en la que Alicia entró.

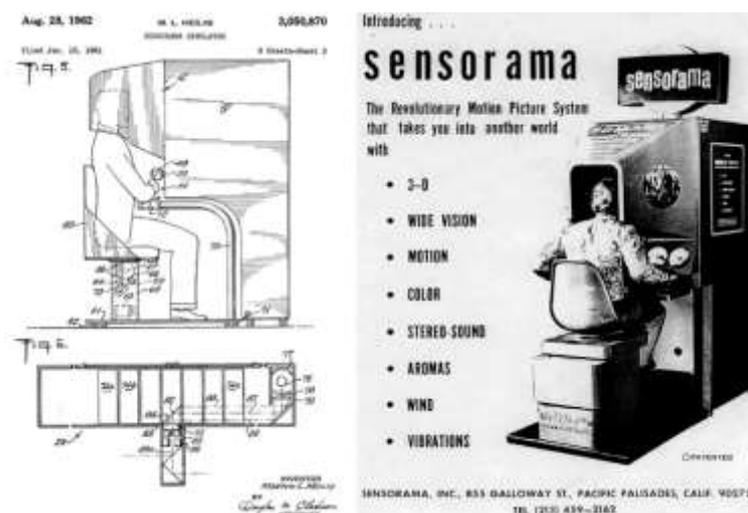


Figura 1.1 Sensorama, primer dispositivo inmersivo de Realidad Virtual [3]

Actualmente, los ambientes virtuales aparecen en juegos, en laboratorios de investigación, en diversas industrias, se interactúa con ellos a través de distintos dispositivos de salida como

pantallas; y de distintos dispositivos de entrada, como el uso de guantes hápticos y otras herramientas sensoriales para generar sensaciones ultra realísticas.

1.1 Ambientes Virtuales

Los ambientes virtuales, son posibles debido a los sistemas de cómputo que permiten, a través de sistemas digitales y de software, generar imágenes, sonidos, tacto (hápticos), sensaciones y sentimientos, que son perceptibles por los sentidos. En algunas ocasiones, logran alterar la manera en que percibimos y conocemos la realidad.

Los ambientes virtuales según sus características pueden clasificarse en:

- Realidad Aumentada, RA
- Realidad Virtual, RV
- La realidad mixta, (XR o MR)

La **realidad aumentada** (RA) es aquella que presenta mundos tridimensionales aparentemente reales, que permiten al individuo experimentar la posibilidad de tocar o mover a su alrededor objetos que siendo intangibles tienen una altura, anchura y profundidad, utilizando elementos del mundo real añadiendo elementos del mundo virtual para que coexistan en la experiencia del usuario.

Por su parte, la **realidad virtual** (RV) basa totalmente la experiencia del usuario en elementos de un mundo virtual estos pueden ser presentados utilizando medios no inmersivos, como los Paneles LCD o LED, donde sólo algunos sentidos del usuario son estimulados; espacios que combinan elementos físicos y virtuales en uno solo, como en algunos simuladores de vuelo.

Los ambientes virtuales también pueden presentarse utilizando simulaciones inmersivas que bloqueen el mundo físico, produciendo una sensación más realista, pues intentan conectar con más sentidos y de un mejor modo con los usuarios. Sin embargo, requieren hardware y software más especializado y sofisticado para producir imágenes de alta resolución.

El camino entre la realidad aumentada y la virtual se conoce como el espacio real-virtual continuo, (es representado por el diagrama Milgram continuo) y forma la realidad mixta (MR).

Es decir, la **realidad mixta** (XR o MR) es la conjunción de las dos, pues se alteran elementos del mundo físico, con características y mejoras virtuales. El diagrama de Pilgrim muestra la relación entre los ambientes virtuales y el ambiente real.

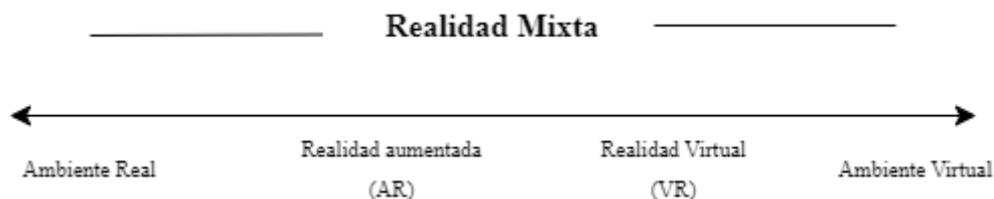


Figura 1.2 Diagrama de Milgram continuo, relación entre ambientes virtuales y ambientes reales (Recreado por el autor) [4]

En resumen, la realidad virtual (VR) basa totalmente la experiencia del usuario en elementos de un mundo virtual, mientras que, la realidad aumentada (AR) utiliza elementos del mundo real y añade elementos del mundo virtual para que coexistan en la experiencia del usuario. Entonces, cuando nos encontramos ante el espacio real- virtual continuo hablamos de la realidad mixta (MR). [3]

1.1.1 Usuarios de Ambientes Virtuales

Los usuarios son el objetivo central de los ambientes virtuales, pues los ambientes virtuales no intentan crear una simple ilusión cuyo propósito es engañar a los usuarios, sino que, buscan conectar con los usuarios y crear distintas experiencias en torno a ellos. Un ambiente virtual no tiene que ser lo suficientemente realista, sino que tiene que generar las emociones y sensaciones deseadas en el usuario para considerarse efectivo.

Asimismo, los ambientes virtuales buscan cambiar fundamentalmente actividades que realizamos hoy en día. Actividades que van desde como interactuamos con el ambiente virtual hasta la interacción entre personas, permitiendo conceptos como sentirse presente aun cuando físicamente se encuentre separado (telepresencia), y permitir estar en un lugar separado de su presencia física (teleasistencia).

Aún con las ventajas y beneficios que los ambientes virtuales ofrecen, distintas dificultades acompañan a los ambientes virtuales. Las más significativas son las sensaciones de desorientación. Estas se dan debido a que el entorno virtual se encuentra en movimiento y el usuario no se mueve, lo que provoca un conflicto viso-vestibular dado que el cerebro no registra y se manifiesta principalmente con náuseas y vómitos.

Este tipo de malestares se pueden reducir mediante la correcta implementación de una interfaz, la cual permite el enlace entre el usuario y el ambiente virtual.

1.1.2 Interfaz entre el Usuario y el Ambiente Virtual

La interfaz entre el usuario y el ambiente virtual permite la correcta percepción e interacción con objetos en el mundo virtual. Se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Interfaces Sensoriales

El objetivo de las interfaces sensoriales es lograr que el usuario perciba el ambiente virtual, y sea a través de su sentido de la vista, el oído, el tacto, el gusto.

Interfaces de movimiento

El objetivo de las interfaces de movimiento es lograr que el usuario interactúe con el ambiente virtual a través de distintos medios o de dispositivos de entrada.

Las interfaces tienen que ser intuitivas, mientras que los gráficos deben de ser lo suficientemente creíbles para que transmitan la información deseada. La evolución y desarrollo de los ambientes virtuales permite que las actividades involucradas en el ambiente virtual se vuelvan más complejas.

1.1.3 Actividades en un Mundo Virtual

Las actividades/acciones principales que los usuarios realizan en un ambiente virtual se dividen en tres acciones [6]:

- Selección
- Manipulación
- Locomoción

Selección

La selección consiste en indicarle al sistema qué objeto o elemento de la interfaz del usuario el usuario desea interactuar. Una vez que la selección es confirmada por el usuario, la entidad seleccionada se vuelve el foco de atención de las siguientes interacciones por el usuario.

Manipulación

Este tipo de interacción ocurre una vez que el objeto o elemento de la interfaz de usuario es seleccionado por el usuario, y consiste en que el usuario realice las acciones fundamentales de escalado, rotación y translación de un objeto seleccionado.

- **Escalado.** Esta interacción permite cambiar el tamaño del objeto.
- **Rotación.** Esta interacción permite cambiar la orientación del objeto con respecto a distintos ejes de referencia.
- **Translación.** Esta interacción permite cambiar la posición de un objeto respecto a un marco de referencia.

Locomoción

Este tipo de interacción permite al usuario tener movimiento adentro del mundo virtual, y consiste en que el usuario realice las acciones fundamentales de reposicionamiento y reorientación.

- **Reposicionamiento.** La reposición busca cambiar la posición del usuario respecto a un marco de referencia dentro del ambiente virtual.
- **Reorientación.** La reorientación consiste en el movimiento alrededor de distintos ejes de referencia. Los movimientos pueden ser de guiñada, cabeceo y alabeo.

1.1.4 Dispositivos de entrada para la interacción Mundos Virtuales

Una variedad de técnicas puede ser utilizadas para las acciones de selección, manipulación, y locomoción. El dispositivo de entrada empleado dependerá de las capacidades del dispositivo, el cuál puede ir desde el uso de controladores basados en el contacto físico como botones, joysticks, ratón, teclados, panel táctil, hasta controladores que no dependen del contacto físico como los controladores basados en voz, de reconocimiento facial, gestos con la mano, el brazo o de cuerpo completo. A continuación, se detallan los dispositivos de entrada más comunes y más innovadores en la interacción con ambientes virtuales.

Teclado y Control

Los dispositivos de entrada que han acompañado a los ambientes virtuales desde sus inicios son los teclados y los controles. Estos han ido variando en tamaño y forma hasta el día de hoy, donde su uso va desde el casual hasta el competitivo. Son las opciones más comunes que los usuarios de ambientes virtuales tienen.

En la imagen 1.3 se puede apreciar distintas generaciones de controles, como lo fue el controlador de *Game Cube*, hasta el control profesional *Xbox Elite Series 2*.



Figura 1.3 Controles de generaciones anteriores y actuales (Archivo Personal)

En la imagen 1.4 se puede apreciar distintas generaciones de teclados, como el teclado *Windows 95 de Microsoft* hasta el teclado mecánico *OMEN Sequencer de HP*.



Figura 1.4 Teclados de generaciones anteriores y actuales (Archivo Personal)

Alineamiento de controladores

Estos dispositivos de entrada basan sus interacciones con el mundo virtual a través de la interpretación correcta de giroscopios y acelerómetros. Un dispositivo que tuvo como principios principales el uso de giroscopios y acelerómetros tuvo gran popularidad en la década de los 2000s es el controlador de Wii, de Nintendo.



Figura 1.5 Controles de Wii [5]

Aunque un ejemplo más reciente de un controlador que ha implementado el uso de giroscopios y acelerómetros como parte de una funcionalidad adicional es el control de PS5 DualSense, lanzado el 7 de abril de 2020. Si bien este tipo de dispositivos presenta una gran dinámica a la interacción con ambientes virtuales, su principal desventaja es que son dispositivos hechos para ser compatibles con sistemas particulares, lo que limita su usabilidad ya que usuarios de entornos virtuales acceden desde distintas plataformas.

Control de Gestos

Estos dispositivos de entrada usan distintas herramientas de hardware y software sofisticado para recrear los gestos que los brazos, manos y muñecas realizan. Es necesario considerar que la mano humana tiene 27 huesos conectados por juntas, tendones, músculos y piel. Esta estructura fisiológica entrega una serie de 27 grados de libertad (DOF), permitiendo las acciones de presionar, agarrar, apretar, punzar y golpear objetos. En la siguiente imagen se pueden apreciar los distintos grados de libertad que tiene la mano.

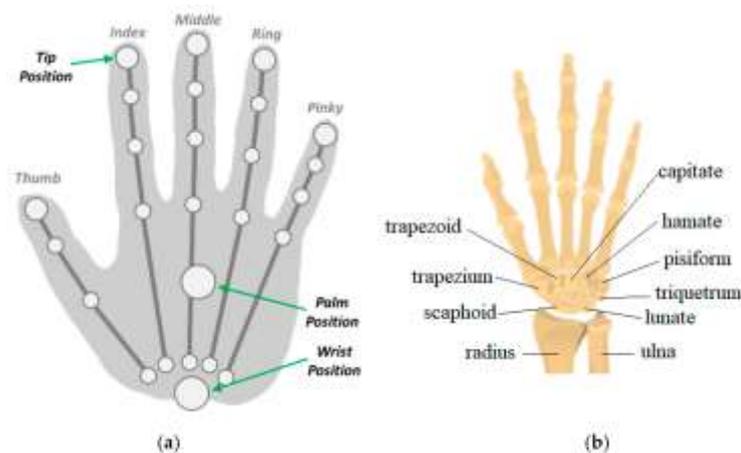


Figura 1.6 Huesos y Grados de Libertad en una mano [6]

Este tipo de controladores permiten la interacción del usuario de forma libre para presionar, agarrar y punzar objetos en el ambiente virtual. La disponibilidad de opciones en el mercado es variada y accesible ya que diversas compañías implementan el control de gestos en sus dispositivos de Realidad Virtual.

Un reciente ejemplo, los *Meta Quest Pro* de Meta, en la imagen 1.7, fueron lanzados en octubre del 2022 e implementan su sistema Direct Touch para interactuar directamente sin la necesidad de controladores, tecnología que será implementada también en sus *Meta Quest 3*, que fueron lanzados en octubre de 2023.



Figura 1.7 Meta Quest Pro [7]

Las *Apple Vision Pro*, fueron presentadas en junio de 2023 y se lanzan en febrero de 2024, en la imagen 1.8, presentan el control de gestos como una de sus principales formas de interacción con el usuario.



Figura 1.8 Las Apple Vision Pro [9]

Sin embargo, el control de gestos no es exclusivo de los visores de realidad virtual, pues la primera generación del sensor LEAP Motion permitía interactuar con ambientes virtuales desde el 2013, y ha sacado su segunda generación en agosto de 2023.



Figura 1.9 Control de Gestos LEAP Motion en su primera y segunda generación [9]

Seguimiento Ocular

Estos dispositivos de entrada basan la interacción con el mundo virtual a través del análisis facial y el seguimiento del movimiento ocular y consiste en que distintos movimientos oculares puedan asociarse a distintas acciones. [11] Diversos visores de realidad virtual recientemente han optado por dar más protagonismo a este método de entrada, como las Apple Vision Pro, que rastrean y seleccionan diversas aplicaciones con la mirada de sus usuarios. Sin embargo, el seguimiento ocular no es exclusivo de los visores de realidad virtual, pudiendo ejecutarse desde una cámara. Aun así, su dificultad con la compatibilidad en sistemas particulares y su implementación en entornos virtuales limita el alcance de usabilidad.

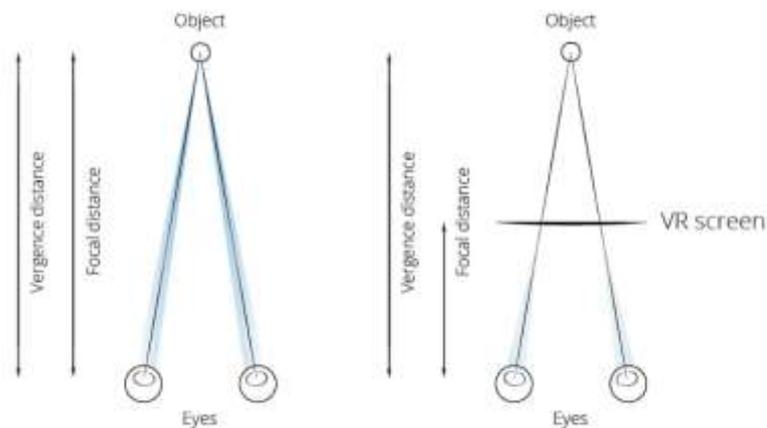


Figura 1.10 Pantalla de Visor de Realidad Virtual [11]

Sentidos hápticos

Los sistemas hápticos permiten sentir los ambientes virtuales a través de simular respuestas táctiles. Los usuarios recibirán información táctil a través de una parte de su cuerpo como resultado de la interacción con el mundo virtual. [12] La mayoría de los controladores implementan retroalimentación háptica usando el movimiento de motores que hacen que el dispositivo vibre, esto se ve reflejado en controladores que ya se mencionaron como el control de Xbox, de PS5, de los Meta Quest. Sin embargo, existen dispositivos que basan la interacción con los sistemas virtuales netamente en la interacción háptica, como un tipo de

guantes especiales, pues en las manos se encuentran las zonas con mayor cantidad de receptores táctiles en el cuerpo humano. Un ejemplo de ellos son los guantes que está desarrollando Meta, los cuales se muestran en la imagen 1.10.



Figura 1.11 Guantes hápticos desarrollados por Meta. [12]

No obstante, el posicionamiento de estos dispositivos aún no es amplio comercialmente por lo que solo se usan en aplicaciones específicas y aún no se tiene la posibilidad de llegar a un grupo poblacional extenso.

Los usuarios de entornos virtuales realizan una diversidad de tareas predeterminadas sin importar el controlador con el que interactúen, por lo que para comparar las posibilidades que los usuarios tienen, se tendría que utilizar una tarea específica para comparar al mismo nivel las opciones de interacción.

1.2 Torre De Hanoi

La Torre de Hanoi es un instrumento psicométrico estandarizado utilizado en la investigación psicológica desde los 1930 para evaluar la capacidad cognitiva. Fue creada como un acertijo matemático en 1883 por Édouard Lucas basado en un templo hindú con el objetivo de la estimulación de las capacidades de resolución de problemas.

1.2.1 Objetivo

El objetivo de la torre es determinar la capacidad cognitiva, habilidad y destreza ejecutiva de un usuario, en donde el razonamiento cognitivo es evaluado para la resolución de un problema. La resolución exige el desarrollo de una estrategia y planificación de los pasos a seguir para resolver la torre.

La torre de Hanoi está conformada por una base con tres postes, estacas o varillas, a las cuales se les puede denominar “A”, “B” y “C”, dentro de las cuales hay una serie de discos numerados y graduados, apilados de menor a mayor tamaño. La cantidad de discos “n” que conforman a la torre es variable según el grado de dificultad, mientras más discos, más aumenta la dificultad de la torre. La cantidad de pasos mínima para resolverla incrementa de forma exponencial, representado con la siguiente ecuación:

$$\text{Numero de movimientos minimos} = 2^n - 1$$

En la imagen 1.11 se puede apreciar la torre de Hanoi de 4 discos.

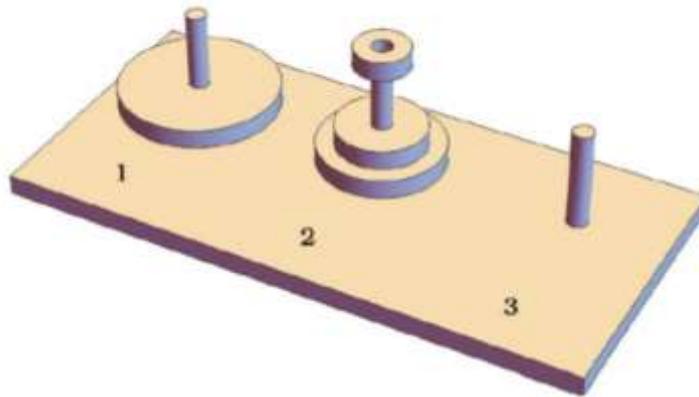


Figura 1.12 Torre De Hanoi de 4 discos [14]

1.2.2 Descripción de la Prueba y su algoritmo de resolución

La prueba consiste en desplazar la torre de discos desde uno de los postes como posición inicial, hasta una posición final en un poste distinto que es indicado por el evaluador. Los discos estarán ubicados por tamaño y en orden, el tercer poste cumplirá la función de apoyo, donde se pueden colocar los discos en una posición transitoria. Durante la prueba existen las siguientes restricciones:

1. No puede ser colocado un disco de mayor diámetro por encima de uno de menor diámetro.
2. Para el primer movimiento sólo se desplaza el primer disco.
3. Cuando no estén en uso, los discos deben estar siempre dentro de uno de los postes, por lo que no se puede colocarlos sobre otra superficie o manipular un disco mientras se esté manipulando otro disco.

Si una de estas restricciones es infringida se notificará inmediatamente al usuario y se buscará la corrección.

Cada posición que puede tomar cada disco, así como la serie de pasos para su resolución se puede representar de forma gráfica en un triángulo el cual tiene en cada extremo la torre acomodada en un poste distinto. A continuación, la representación de una torre de 4 discos, en la cual se puede apreciar el 1111 para la posición inicial y 3333 o 2222 para la posición final.

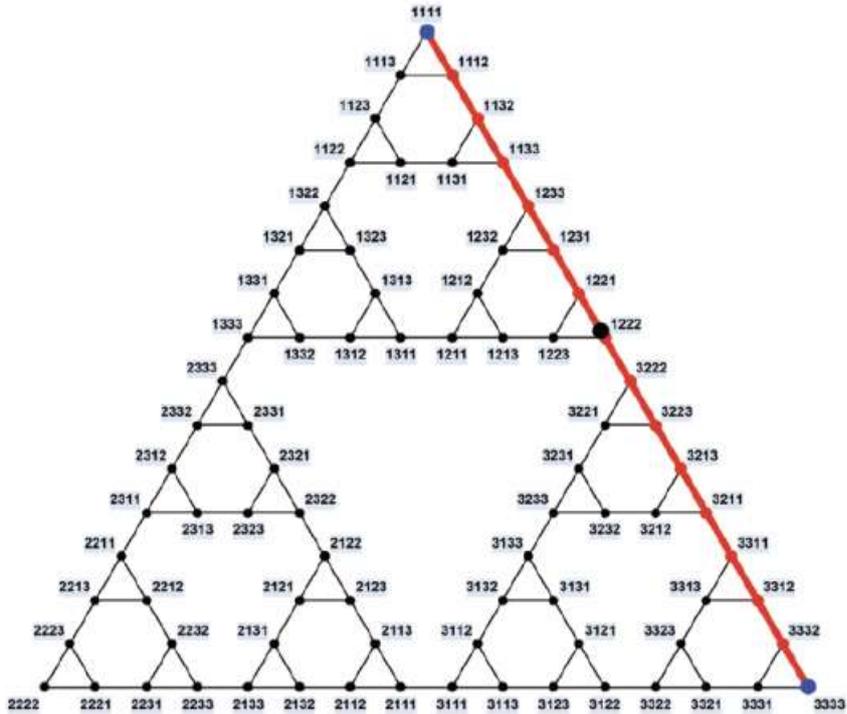


Figura 1.13 Representación gráfica de los estados de una Torre de Hanoi [14]

El algoritmo de resolución consiste en el camino más corto (en color rojo) que existe entre un vértice del triángulo al otro, siendo la línea recta que conecta los puntos el menor número de pasos.

Para mover los “n” discos del poste A al poste B auxiliados por el poste C, se utiliza la recursión, pues se comienza a mover el disco superior del poste A al poste B, el disco siguiente más grande se mueve al poste C, donde se colocará el disco menor, moviéndolo al poste C, dejando un poste disponible para el siguiente disco en el poste A.

La bibliografía refiere que la Torre de Hanoi se ha implementado en ambientes virtuales de manera masiva sin perder su efectividad como prueba psicológica.

Capítulo 2 Planteamiento Del Problema

“...Un ser todo poderoso podría engañarme completamente, al darme experiencias en un mundo que no existe. ¿cómo sé que esto no me está pasando a mí? ...” René Descartes

En este capítulo se presenta la problemática que los usuarios enfrentan al tener una amplia gama de opciones para interactuar con los ambientes virtuales. El mercado ofrece distintas alternativas que varían fundamentalmente en forma, función y en la experiencia que proporcionan al usuario.

Ante la evolución y la amplia gama de opciones que tiene a la vista el usuario, algunas de las siguientes cuestiones surgen: ¿Cuál alternativa puede interactuar con los sistemas virtuales con la mejor precisión?, ¿Cuál con la mejor exactitud?, ¿Cuál alternativa le permitiría realizar actividades con el menor esfuerzo posible?, ¿Cuál alternativa le ofrece la mejor experiencia?, y finalmente ¿Cuál alternativa escoger para realizar una acción en particular? Y con esta última pregunta, ¿Qué acción en particular sería la adecuada para comparar alternativas de interacción en mundos virtuales?

2.1 Objetivos

Cada una de las alternativas de interacción que existen en la actualidad representa para el usuario una curva de aprendizaje, tiempo de respuesta, precisión, exactitud, jugabilidad, esfuerzo físico y experiencia distinta, entre otras características. Considerando lo anterior, alguna opción de controlador presentará una ventaja frente a otra para el usuario, por lo que se hace importante poner a prueba las diferentes formas de interactuar dada una tarea determinada en el mundo virtual. En el presente trabajo, se utilizará la Torre de Hanoi como la tarea predeterminada para realizar dicha comparativa.

2.1.1 Objetivo General

Diseñar y desarrollar una Torre de Hanoi de cuatro discos, en un entorno virtual con la finalidad de hacer una comparativa que determinará cual es el controlador idóneo para resolverla.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar las interacciones más significativas entre el usuario y la Torre de Hanoi durante la solución de la prueba.
- Implementar acciones significativas identificadas previamente en el ambiente virtual para que el usuario las realice.
- Modelar los discos y la base de la Torre de Hanoi en 2D y 3D.
- Desarrollar la física, iluminación, ambiente e interfaz en el ambiente virtual.
- Programar el código necesario para controlar el movimiento de los discos con tres distintos controladores.
- Analizar el movimiento y trayectoria de los elementos a fin de identificar patrones.

- Automatizar la representación gráfica de los datos para su posterior interpretación durante el análisis de resultados.
- Hacer una comparativa con los controladores seleccionados a fin de encontrar cuál es el mejor para interactuar con el entorno virtual desarrollado.

2.1.3 Justificación

En la actualidad, una amplia gama de opciones brindadas por el mercado de controladores involucra un gasto de adquisición para el usuario que desea conocer y experimentar un nuevo controlador, lo cual le presenta la disyuntiva de si adquirirlo permanentemente, u optar por otra opción que se adecue a sus necesidades. Este trabajo presentará una comparativa directa entre controladores, por lo que el estudio permitiría identificar una primera recomendación general acerca de qué controlador puede permitir cuál serie de interacciones.

El presente trabajo caracterizará distintos controladores, determinará de entre ellos cuál es el mejor en eficacia al ejecutar la prueba conocida como Torre De Hanoi. La evaluación de basará en las principales interacciones entre el usuario y el controlador, midiendo el desempeño de cada controlador en las interacciones de un entorno virtual.

2.1.4 Alcance

Identificará las interacciones que realizan los usuarios en un entorno virtual, de las cuales se seleccionará algunas de ellas para implementarlas en un entorno virtual.

Se desarrollará la prueba de Torre de Hanoi en un ambiente virtual 3D funcional con el que el usuario probará interacciones a través de tres controladores distintos, buscando que la interacción suceda sin retraso notorio, es decir, en tiempo real.

Se recreará la Torre de Hanoi de 4 discos en un ambiente virtual con la física necesaria para que la prueba sea considerada efectiva, de tal modo que permita a los usuarios interactuar con ella en tiempo real. El usuario podrá seleccionar los discos de la Torre de Hanoi y manipular su traslación de manera directa y rotación de manera indirecta.

Se limitará la profundidad que los discos puedan alcanzar para que el movimiento de los discos solo sea en 2 ejes en un marco de referencia determinado. Los dispositivos de entrada con los que el usuario interactuará en el ambiente virtual son teclado y control, debido a su amplia disponibilidad; y un sistema de gestos dada su gran libertad para realizar distintas acciones de manera natural e intuitiva, usando las propias manos y brazos.

Se desarrollará el código necesario para integrar el funcionamiento de los controladores de manera equilibrada, es decir, sin buscar favorecer a una opción sobre otra.

Implementará una interfaz que permita al usuario conocer el funcionamiento de los controladores sobre la prueba, es decir, relacionará botones o teclas con discos y joysticks y teclas de dirección con movimientos, según sea necesario.

El presente trabajo también contempla ejecutar un protocolo de pruebas con usuarios, el cual se aplicará teniendo en cuenta que fue desarrollado durante la pandemia de COVID-19.

El protocolo indicará a los usuarios el camino más corto para resolver la prueba con el objetivo de medir cuantitativa y cualitativamente sus interacciones. La repetitividad exigida por la prueba ayudará para realizar una comparativa entre controladores en un entorno virtual, pues se realizará el mismo número de pasos en el mismo orden en donde solo varía el controlador de entrada de la prueba.

Con los datos obtenidos de estas pruebas se generarán los elementos de visualización más adecuados que permitan interpretar la información que permita determinar cuál es el mejor controlador.

Las características que se evaluarán son cuantitativas y cualitativas, permitirán conocer las interacciones entre el usuario y el controlador; entre las cuantitativas se encontrarán el tiempo de respuesta, la exactitud, precisión, y la curva de aprendizaje de cada controlador; entre las cualitativas se encuentra la experiencia proporcionada, la demanda de esfuerzo físico.

Capítulo 3 Diseño De Entorno Virtual

“El metaverso está aquí, y no solo está transformando cómo vemos el mundo, sino cómo participamos con él...” -Satya Nadella

El diseño del entorno virtual se enfocará en recrear la Torre de Hanoi de 4 discos considerando los elementos necesarios para que este sea fidedigno a la Torre de Hanoi real.

El desarrollo del entorno virtual se distribuyó en diversas etapas en donde se desarrollaron los siguientes aspectos:

- Modelado en 2D y 3D.
- Exportación a motor gráfico.
- Física del entorno virtual.
- Interacción entre objetos – Objetos colisionables - Colliders.
- Programación de movimientos con Control y Teclado.
- Programación de movimientos con gestos - LEAP Motion.
- Iluminación y Ambiente.
- Interfaz con el usuario.

3.1 Modelado en 2D y 3D

Para recrear la Torre de Hanoi en un ambiente virtual es necesario recrear todos los elementos que la conforman.

En primer lugar, se diseñó una base que fuera el sostén de los discos, en donde se tuvo la consideración que hubiera la distancia suficiente entre cada poste para que los discos de mayor tamaño puedan estar en cada poste sin que interfieran entre sí.

En segundo lugar, se diseñaron los discos considerando que tuvieran un radio ascendente, del menor al mayor, de 2 cm.

3.1.1 Discos

Las medidas de los discos utilizados se indican en la siguiente tabla

Tabla 3.1 Medidas de discos

Disco	Radio exterior (cm)	Radio interior (cm)	Altura (cm)
Disco Azul – E	4	2	2
Disco Verde – A	6	2	2
Disco Anaranjado – B	8	2	2
Disco Rojo – C	10	2	2

En la decisión de los colores para los discos, azul, verde, amarillo y rojo, se tomó como inspiración la paleta de colores que aparece en los controles de Xbox desde hace algunos años.

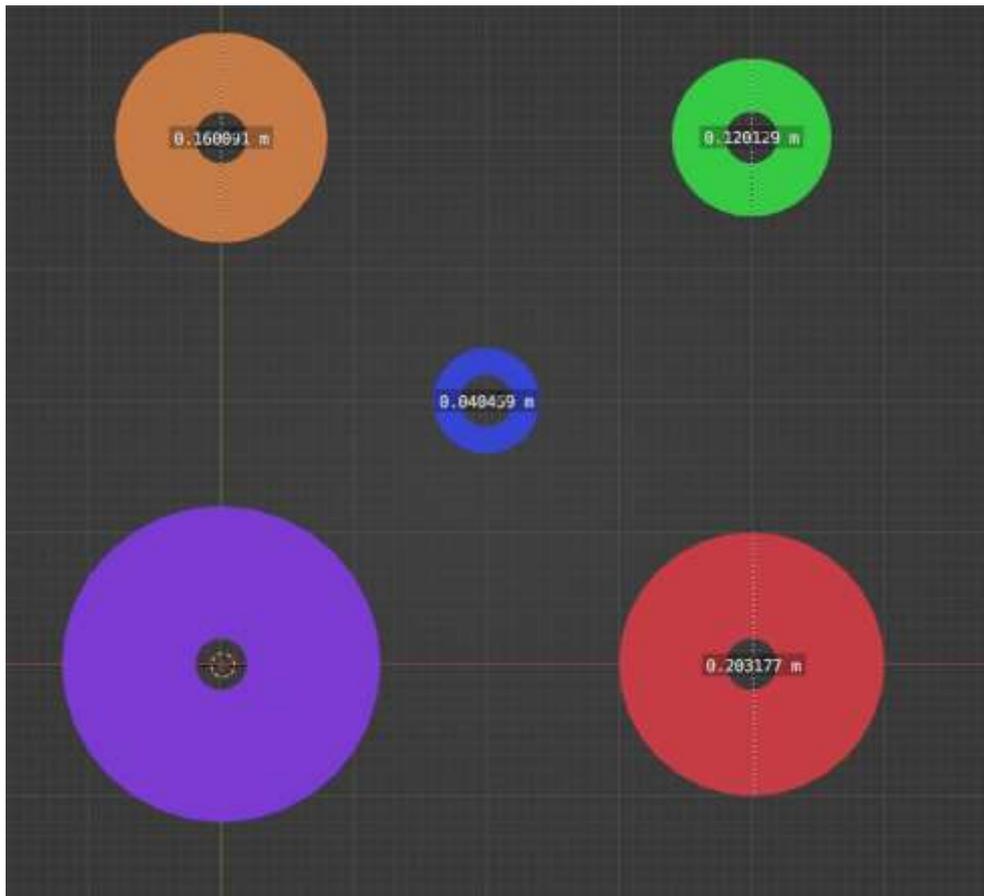


Figura 3.1 Discos de la Torre de Hanoi

3.1.2 Base

La base tuvo dos diseños inicialmente, de los cuales el primero consistía en una superficie cuadrada de 75 cm por cada lado. Cuenta, además, con tres postes insertados donde el poste central se encuentra ubicado en el centro de la base, cada uno a una distancia de 25 cm y con un diámetro de 2.5 cm. Esta distribución geométrica cumple con la capacidad de poder albergar los discos del máximo tamaño disponible sin que estos interfieran entre sí.

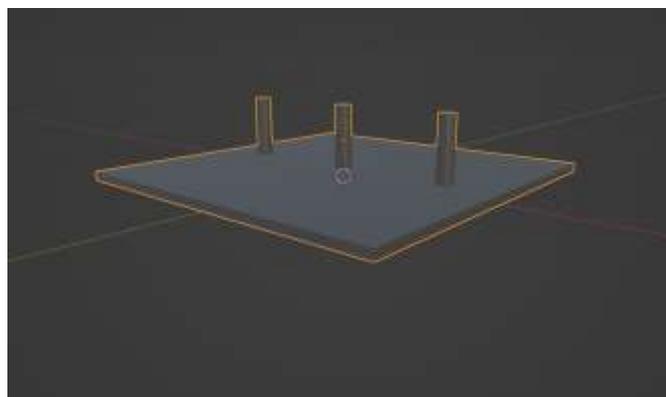


Figura 3.2 Diseño Inicial de la base de la Torre de Hanoi

El segundo diseño para la base respeta la distribución geométrica mencionada anteriormente, pero con la particularidad de que la profundidad/anchura de la plataforma ahora es de 25 cm. Esto se hizo debido a que la plataforma más grande ocupaba espacio visual.

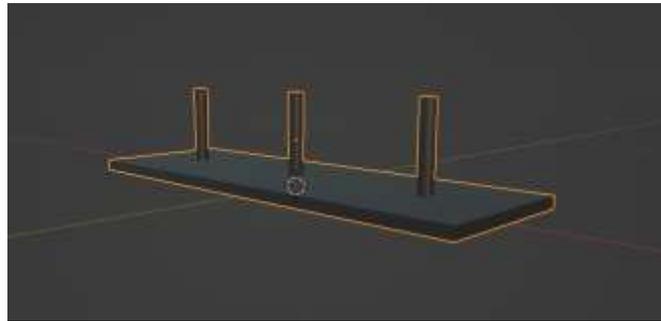


Figura 3.3 Diseño Secundario de la base de la Torre de Hanoi

3.2 Física del entorno virtual

Una vez que se cuenta con los modelos tridimensionales, se utilizó el motor gráfico Unity para implementar la física de la prueba virtual y la interacción con el usuario. La física de la prueba incluye determinar la masa, densidad, peso, sistema de colisiones y resistencia al aire. La interacción con el usuario incluye determinar con qué métodos de entrada el usuario podrá controlar la rotación y translación de los discos; establecer la perspectiva de la cámara, la cuál será la vista que el usuario tendrá durante la prueba; el diseño de una interfaz que auxilie/indique al usuario las actividades a realizar.

3.2.1 Exportación a motor gráfico

Una vez que se cuenta con los modelos en Blender, es posible exportar a Unity directamente, es decir, sin la necesidad de convertir el archivo a otra extensión. En Unity se permite modificar las características con las que se importa el objeto, las cuales son las siguientes:

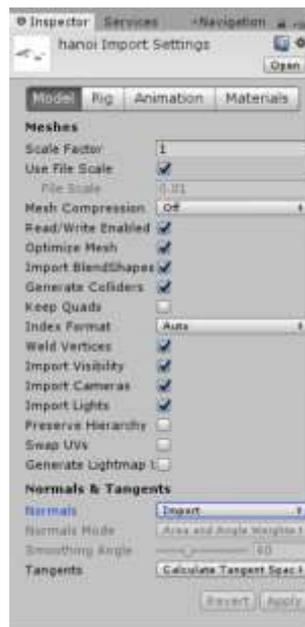


Figura 3.4 Configuración de importación del modelo Hanoi

En el caso de los modelos, las casillas que fue necesario marcar como activas fueron:

- Use File Scale (Usar escala del archivo) Permite que el archivo mantenga la escala.
- Read/write Enabled (Lectura/Escritura habilitadas) En caso de que un cambio sea requerido se habilita esta opción.
- Optimize Mesh (Optimizar malla) Optimiza la malla con la que están formados los modelos.
- Generate Colliders (Generar colisionadores) Genera los límites de colisión de manera automática.
- Weld Vertices (Unir Vértices) Permite unir los vértices.
- Import Visibility (Importar visibilidad) Importa la visibilidad.
- Import Cameras (Importar cámaras) Importa las cámaras, es prescindible.
- Import Lights (Importar luces) Importa las luces, es prescindible.

Y una vez que los modelos están en la interfaz de Unity, se pueden ver en la carpeta principal como se muestra a continuación:

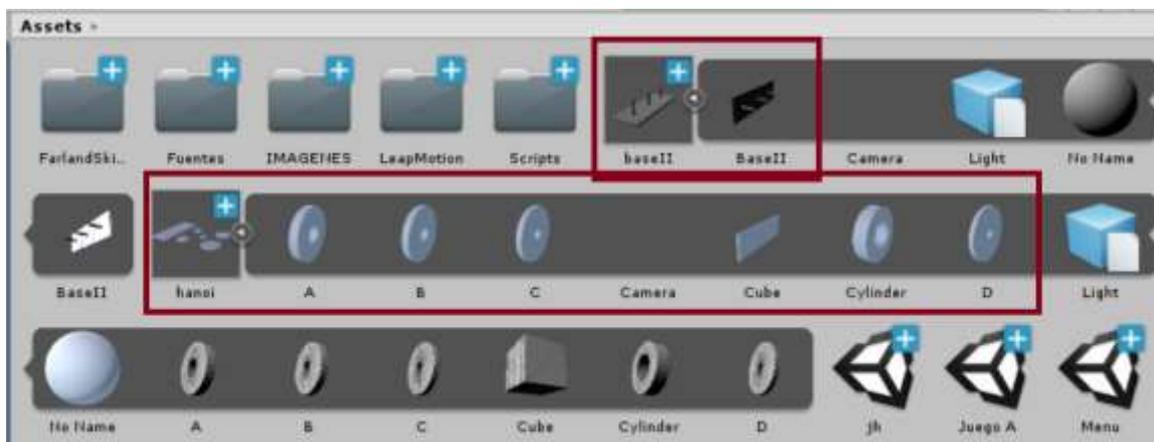


Figura 3.5 Modelos en carpeta principal

Una vez que los discos están en la escena de Unity, a cada uno se le añadió el componente Cuerpo Rígido.

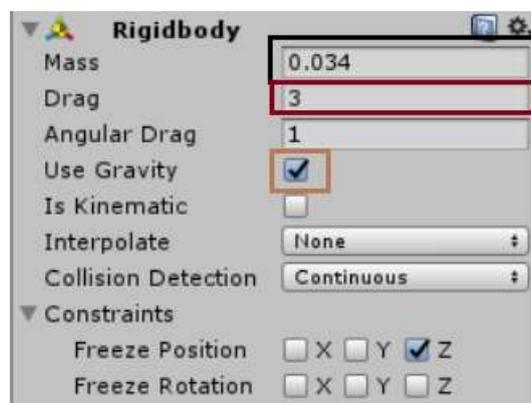


Figura 3.6 Características del Cuerpo Rígido del disco Azul

Las siguientes características físicas son las que se marcaron/seleccionaron para este componente:

- La masa
- La resistencia al aire
- La gravedad afecta al objeto
- Tipo de detección de colisiones
- Restricción en el eje Z

La masa se declara en la casilla marcada en el recuadro negro en la figura anterior. La masa de cada disco se calculó usando el volumen de cada disco y la densidad de la madera, siendo este el material más usado/común en la Torre De Hanoi. La densidad de la madera que se utilizó como referencia es la siguiente: 0.65 g/cm^3 [15]

Por lo tanto, la masa de los discos se indica en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Propiedades físicas del disco

Disco	Radio exterior [cm]	Radio interior [cm]	Altura [cm]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Masa [g]
Disco azul	4	2	2	75.39822369	0.65	49.00
Disco verde	6	2	2	201.0619298	0.65	130.69
Disco naranja	8	2	2	376.9911184	0.65	245.04
Disco rojo	10	2	2	603.1857895	0.65	392.07

La resistencia al aire se declara para frenar al objeto. Para mover cada objeto, este recibe una fuerza proporcional a la señal recibida por el dispositivo de entrada, y cuando esta deja de aplicarse al objeto, (se detuvo la señal de entrada) la resistencia al aire frena al objeto.

Se seleccionó la casilla que indica que el objeto se ve afectado por la gravedad.

La detección de colisiones se marcó como discreta, pues esa opción permite la detección de colisiones con los demás objetos colisionables definidos en la escena.

La restricción sobre la coordenada z se hace con la finalidad de limitar la profundidad que el objeto puede tener.

3.2.2 Interacción entre objetos – Colliders – Sistema de Colisiones

El sistema de colisiones permite detectar los límites de los objetos y cuando estos tienen interacción entre ellos. En la prueba, los discos tienen impenetrabilidad, es decir, no se permite la mutua existencia en el mismo espacio de dos discos o más. Cada objeto tiene límites definidos por una geometría que puede o no seguir la forma de malla del objeto que representa. Esto se debe a que, para simplificar los cálculos, los límites del objeto colisionable pueden aproximarse con figuras geométricas más simples, como prismas, cilindros o esferas.

En el caso de los discos, los límites del objeto de colisión se realizaron combinando diversos prismas rectangulares como se muestra en los siguientes recuadros:

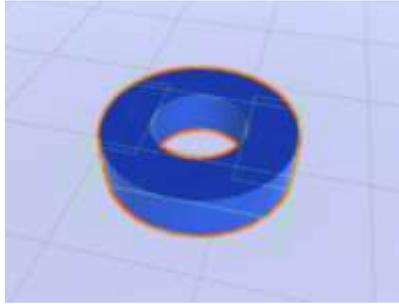


Figura 3.7 Disco Azul

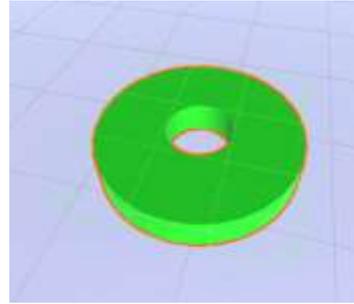


Figura 3.8 Disco Verde

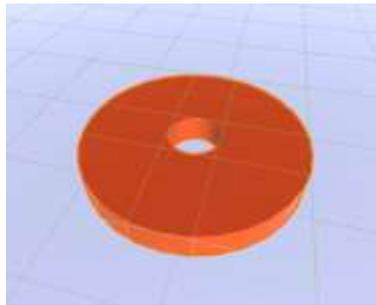


Figura 3.9 Disco Anaranjado

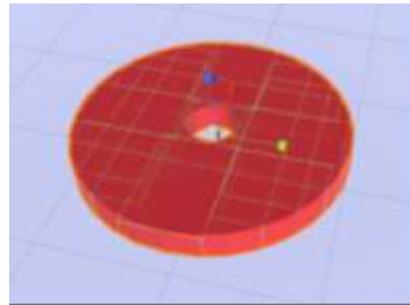


Figura 3.10 Disco Rojo

Para el Disco Azul se utilizaron 4 colliders que aproximan la geometría del disco.
Para el Disco Verde se utilizaron 4 colliders que aproximan la geometría del disco.
Para el Disco Anaranjado se utilizaron 4 colliders que aproximan la geometría del disco.
Para el Disco Rojo se utilizaron 10 colliders que aproximan la geometría del disco.

Para la base se utilizaron la combinación de dos tipos de colliders distintos: el collider de caja para la base y el collider de cápsula para los postes como se muestra a continuación:



Figura 3.11 Base con colliders

Además, a todos los discos se les asignó la capa “Interacción” para que interactúen entre sí y con los demás objetos en esa capa.

3.2.3 Programación de movimientos Control y Teclado

La lógica del movimiento es la misma para el control y el teclado, solo cambian las señales de salida que se están leyendo desde el dispositivo de entrada. El programa se adjuntará en el Apéndice A. En esta sección, cuando se mencione *botones* corresponderá al control y cuando se mencione *teclas* se hará referencia al teclado. Los valores de dirección

serán dados por el joystick izquierdo en el caso del control y las teclas de dirección en el caso del teclado (\uparrow \downarrow \rightarrow \leftarrow).

El movimiento de los discos se controlará mediante una fuerza, distinta para cada disco, cuando se detecta que ciertas teclas o botones son presionados. Cuando se aplique la fuerza, el objeto dejará de ser sujeto a la gravedad en este ambiente virtual.

La fuerza que se aplica tendrá la dirección que indiquen los valores de dirección en el eje X y el eje Y. El eje Z se verá limitado para evitar que el disco salga del área de la prueba.

Una vez que deja de presionar la tecla o botón, el objeto seleccionado deja de estar sujetado por el usuario y vuelve a ser sujeto por la gravedad.

La siguiente es la configuración de dispositivos de entrada:

La letra Z y el botón X estarán asignados al Disco Azul.

La letra X y el botón A estarán asignados al Disco Verde.

La letra C y el botón Y estarán asignados al Disco Anaranjado.

La letra V y el botón B estarán asignados al Disco Rojo.

El joystick izquierdo en su eje X+ y la tecla direccional derecha (\rightarrow) controlará la dirección hacia la derecha.

El joystick izquierdo en su eje X- y la tecla direccional izquierda (\leftarrow) controlará la dirección hacia la izquierda.

El joystick izquierdo en su eje Y+ y la tecla direccional arriba (\uparrow) controlará la dirección hacia arriba.

El joystick izquierdo en su eje Y- y la tecla direccional derecha (\downarrow) controlará la dirección hacia abajo.



Figura 3.12 Control y sus comandos



Figura 3.13 Teclado

3.2.4 Programación de movimientos LEAP Motion

Para la programación del control de gestos se utilizó el dispositivo conocido como LEAP Motion, el cual tiene un sistema de cámaras infrarrojas que permiten determinar la distancia del dispositivo hacia las manos y su orientación, pudiendo mapear la posición real en un entorno virtual tridimensional.

Para implementar LEAP Motion en Unity se utilizó el Kit de Desarrollo de Software (SDK por sus siglas en inglés, Software Developer Kit) *LEAPDeveloperKit_4.1.0+52211_win*, y los controladores para el sensor *Orion V4 Tracking Software*.

Una vez que todas las bibliotecas están en Unity, se tienen que importar a la escena los modelos de manos que vienen con la biblioteca, en este caso se utilizaron los modelos Capsule Hands (Desktop) Incluidos en *LEAPMotion* → *Core* → *Examples*.

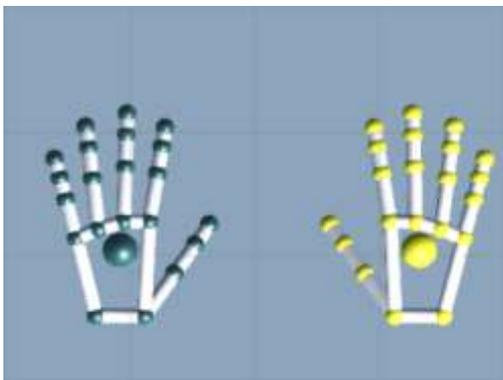


Figura 3.14 Modelo de manos interactivas - Capsule hands, vista superior

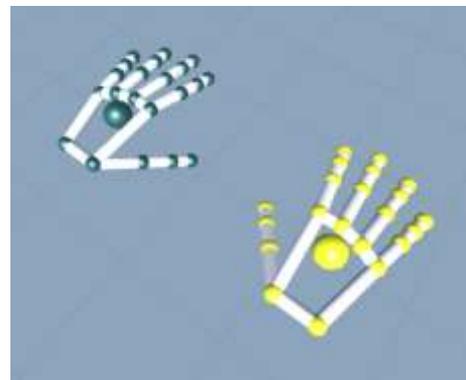


Figura 3.15 Modelo de manos interactivas - Capsule hands, vista ISO

Para que los modelos de las manos se conecten con el sensor LEAP Motion, es necesario añadir el código (script) *Interaction Manager* que contiene dos manos interactivas que reciban las señales del sensor (provider) con las que se puede interpretar la entrada captada por el sensor.



Figura 3.16 Mano Interactiva Izquierda



Figura 3.17 Mano Interactiva Derecha

Para configurar las manos interactivas se hicieron las siguientes modificaciones:

- En la opción de proveedor, se le asignó el *LEAP Motion Controller*.
- Se indicó que cada falange de la mano podrá interactuar.
- Se habilitó que las manos podrán tocar a los objetos.
- Se habilitó que las manos podrán agarrar a los objetos.

Por su parte, a los discos se les añadió un código de comportamiento interactivo (*Interaction Behaviour Script*) en donde se hicieron las siguientes modificaciones:

- Se desactivó cualquier opción que ignore la interacción con las manos.
- Se declaró al objeto como un objeto en la configuración de contacto.
- Se permitió sujetar al objeto con múltiple agarre, es decir, se puede agarrar a los discos con ambas manos.
- Se detectó cuando un objeto fue agarrado y se incrementó el contador de movimientos.



Figura 3.18 Código Interactivo de Comportamiento

El *LEAP Motion Controller* tiene un rango de interacción que se ve claramente delimitado cuando se le selecciona. A prueba y error, se posicionó el controlador en la mejor ubicación para colocar el rango de interacción que cubra todo el espacio en donde la prueba se ejecuta.

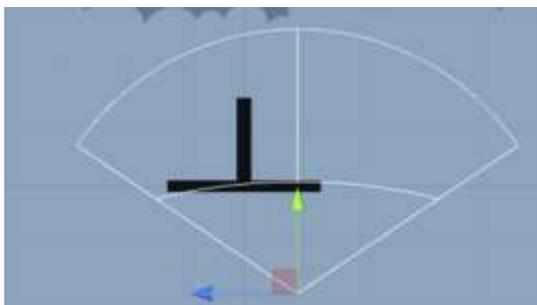


Figura 3.19 Rango de interacción. Vista lateral

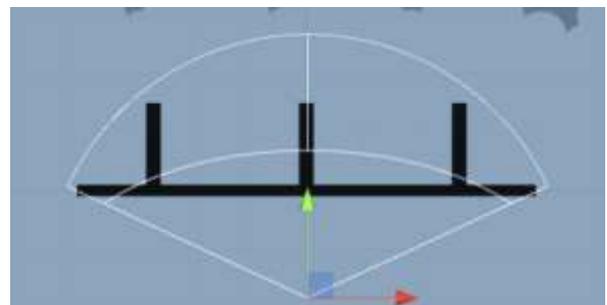


Figura 3.20 Rango de interacción. Vista frontal

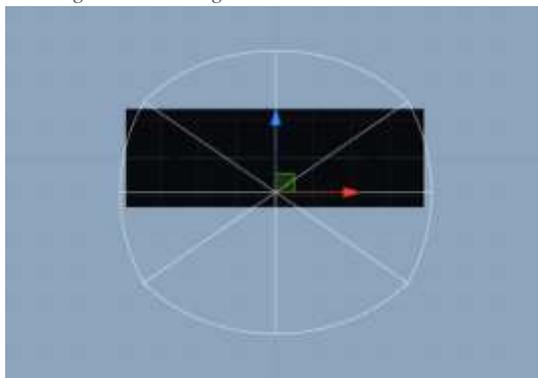


Figura 3.21 Rango interactivo. Vista Superior

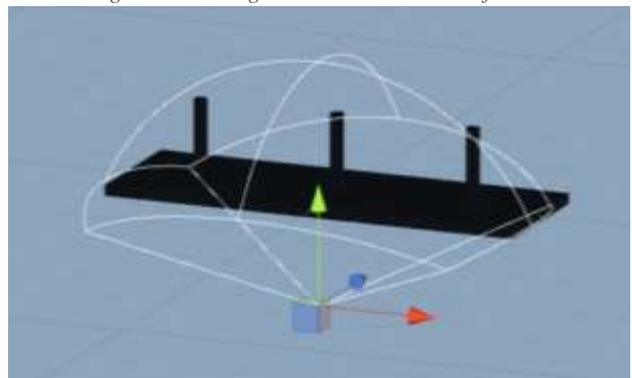


Figura 3.22 Rango interactivo. Perspectiva

3.2.5 Interfaz con el usuario

Una vez que la dinámica del juego está lista, es necesario diseñar la interfaz del usuario, pues esta le guiará al resolver la prueba. Una interfaz de usuario tiene que ser simple y su propósito será conectar con el usuario de tal modo que permita facilitar las tareas

realizadas, a la vez que no entorpezca la dinámica del ambiente virtual. En esta prueba, la interfaz del usuario se diseñó con tres escenas, la escena de presentación, la selección de controladores y la Torre de Hanoi.

La escena de presentación consiste en un menú que proporciona información acerca del propósito de la prueba. En ella se indicó que la prueba es parte de la tesis presente, se indicó el nombre de la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería, al asesor de la tesis M.A. Luis Yair Bautista Blanco y al presente expositor.



Figura 3.23 Escena inicial – Menú inicial

Como parte de la retroalimentación que la interfaz proporciona al usuario, se remarcaba la opción seleccionada con un color diferente al fondo de la pantalla.

La escena de selección de controlador permite al usuario escoger entre las tres distintas opciones de controladores que se emplearon para esta prueba y llevarán a la escena que tenga la interfaz de cada controlador.



Figura 3.24 Menú de selección de controladores

La escena de la Torre de Hanoi tendrá 3 distintas interfaces para cada escena, una para cada controlador, funcionando estos como guía en la dinámica del juego.

En la interfaz se agregó un cronómetro en la esquina superior derecha. El cronómetro permitirá conocer la primera métrica de la prueba, el tiempo. Servirá tanto al usuario como al evaluador de la prueba. Se inicia automáticamente al primer movimiento y se detiene manualmente con la tecla indicada, siendo este el botón START para detenerlo en el control y la tecla Q en el teclado.

En la interfaz también se añadió un contador de movimientos en la esquina superior derecha, debajo del cronómetro. El contador de movimientos es la segunda métrica de la prueba, es una guía para saber cómo se ha ejecutado la misma, y sobre todo sirve como comparativa contra los movimientos mínimos en los que se puede resolver la Torre.



Figura 3.25 Cronometro y contador de movimientos

Para las interfaces del control y el teclado, se indican en un lienzo las teclas y botones que están asociados a cada disco.

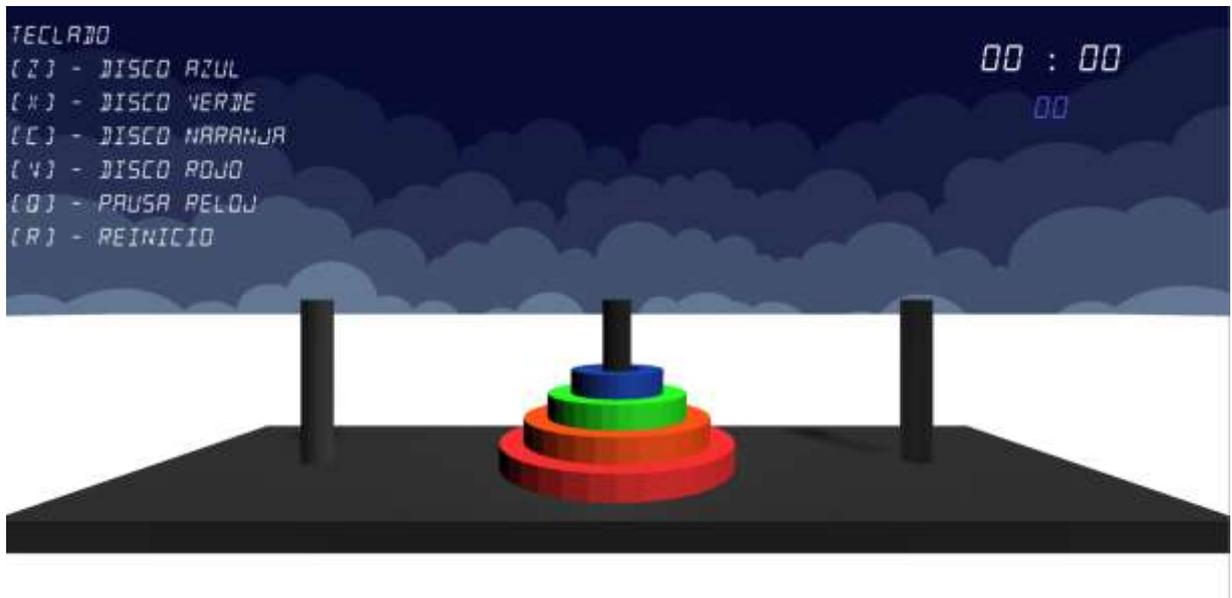


Figura 3.26 Torre de Hanoi con interfaz de Teclado

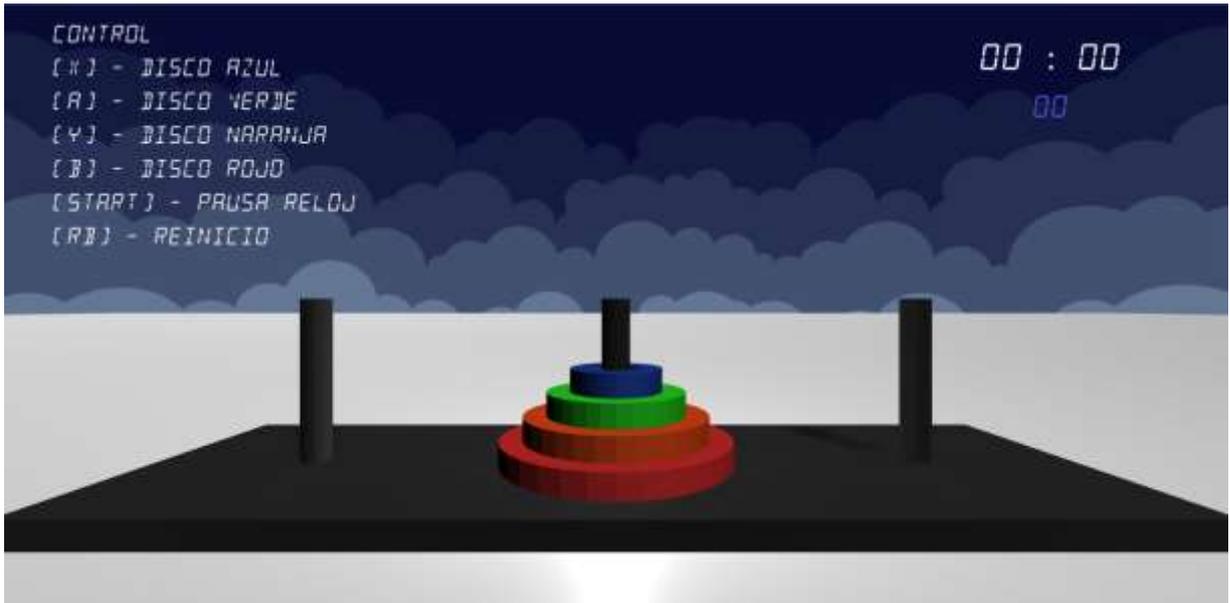


Figura 3.27 Torre de Hanoi con interfaz de control

En el caso de la interfaz control de gestos, se agregaron tres botones, el primero para empezar el conteo, el segundo para detener el conteo, y el tercero para reiniciar el reloj. En este caso no se incluyó algún lienzo, pues los mandos son las manos.

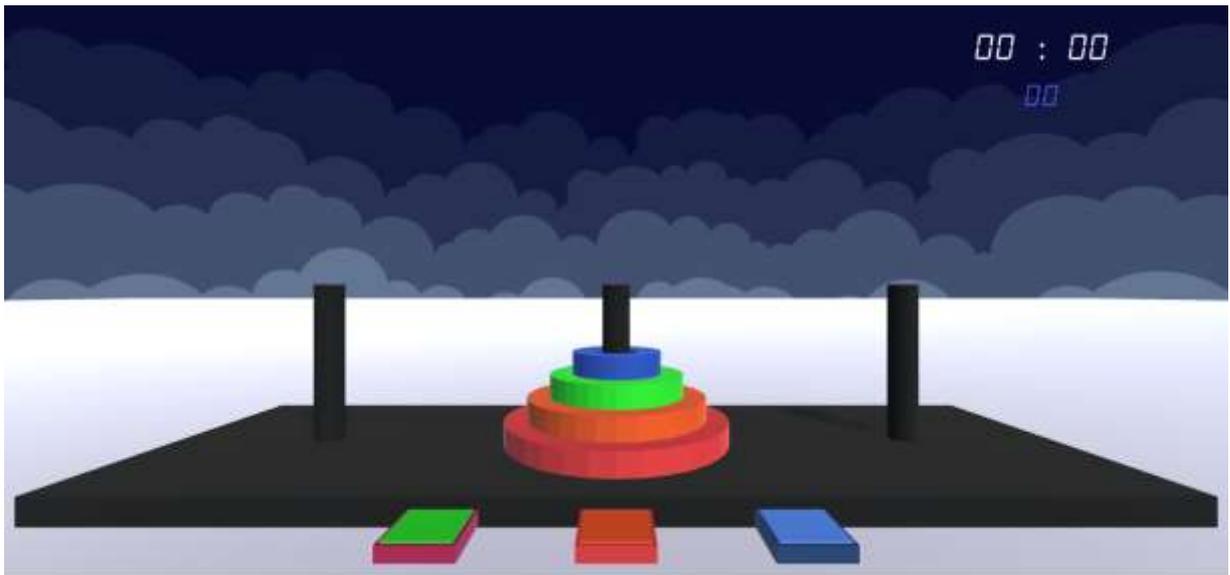


Figura 3.28 Torre de Hanoi con interfaz de gestos

Las características que se evaluarán son cuantitativas y cualitativas, y permitirán conocer las interacciones entre el usuario y el controlador; entre las cuantitativas se encontrarán el tiempo de respuesta, la exactitud y precisión, junto con cada curva de aprendizaje; entre las cualitativas se encuentra la experiencia proporcionada y la demanda de esfuerzo físico.)

3.2.6 Iluminación y Ambiente

A la escena de Unity se necesita importar una luz direccional que permita iluminar a los objetos tal y como se verían en un ambiente real. Esta luz permitirá que se proyecten sombras y contrastes en los objetos.

Para el ambiente se utilizaron *Skyboxes*, que son los fondos que se perciben en la escena. Para las diversas escenas que tuvo la prueba, se utilizó una biblioteca gratuita y de licencia libre [16] que contaba con los 3 distintos fondos que se muestran a continuación.

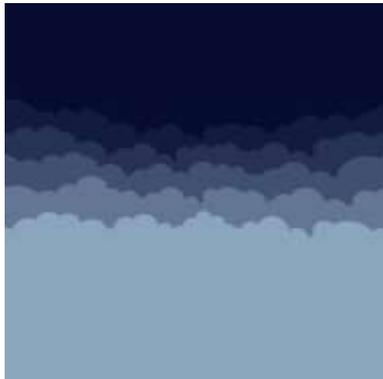


Figura 3.29 Skybox Midnight, utilizado en la escena principal donde se desarrolló la prueba



Figura 3.30 Skybox Sunset, utilizado en el menú inicial



Figura 3.31 Skybox Daybreak, utilizado en el menú de selección de controlador

Una vez que se cuenta con la Torre de Hanoi en un entorno virtual con los tres controladores seleccionados se aplicará la prueba a una muestra de distintos usuarios. Cada uno participará en un protocolo de pruebas en donde participará de una comparativa entre los controladores con los que se resuelva la misma.

Capítulo 4 Experimentación Con Usuarios

4.1 Introducción / Protocolo de Pruebas

El protocolo de prueba se estableció para tener una forma homologada de aplicar la prueba, esto es con la finalidad de que no cambie ninguna variable más allá del dispositivo de entrada con la que el usuario resuelve la torre de Hanoi.

Se reunirá un grupo de 25 personas que participarán en las pruebas del entorno virtual. Cada una de estas personas será entrevistada individualmente y resolverá la Torre de Hanoi de cuatro discos. 20 de estas pruebas usarán dos controladores diferentes, teclado y control; y 5 usarán los tres controladores diferentes: Teclado, Control y LEAP Motion.

4.2 Aplicación de pruebas a distancia

La aplicación de las pruebas a distancia enfrentó las dificultades que la pandemia imponía, siendo la principal de las medidas la sana distancia. Considerando la sana distancia se buscó hacer las pruebas con usuarios a distancia, siendo la solución desarrollada la implementación del entorno virtual en una plataforma en línea.



Figura 4.1 Cartel de Sana distancia [17]

4.2.1 Plataforma – Itch

Como se ha comentado, la pandemia por COVID-19 se presentó en el desarrollo de esta Tesis, por lo que se buscó hacer las pruebas con usuarios a distancia, esto requirió de la implementación del juego en una plataforma en línea. De entre las plataformas de juegos independientes en línea que existen, se seleccionó la plataforma itch.io debido a las facilidades que ofrece para crear una cuenta, poder subir entornos virtuales y juegos con extensiones de archivo distintas y poder interactuar con los mismos en línea sin retrasos considerables.

Se creó una cuenta en itch.io usando el nombre de usuario RusetoP132 que es el nombre de usuario que comúnmente el presentante de esta tesis utiliza al interactuar en ambientes virtuales.

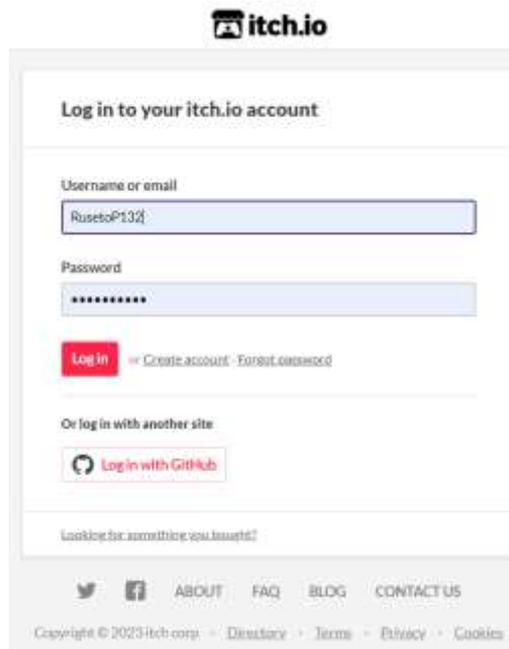


Figura 4.2 Página de inicio de sesión

El subir un proyecto a itch.io requiere de la siguiente información:

Título del proyecto

El título del proyecto identifica al proyecto dentro de la plataforma, la misma confirmará si el nombre del proyecto está disponible. Se utilizó el nombre “Torre de Hanoi” para que fuera fácilmente encontrado y asociable a la prueba.

URL host

Esta URL está conformada por el nombre de usuario, el nombre de la plataforma *itch.io* y la cadena de caracteres que se desee, de manera predeterminada se utiliza el nombre de proyecto. El proyecto se encuentra alojado en la siguiente página: <https://rusetop132.itch.io/torre-de-hanoi>

Clasificación

Esta es la clasificación del entorno virtual, cuyas opciones son las siguientes:

- Juegos – Una pieza de software que puedes jugar, se seleccionó esta opción como la indicada para el Entorno Virtual.
- Modos de Juego – Una alteración al contenido de un juego.
- Physical Games – Un juego que se puede utilizar sin dispositivos externos.
- Albums y Soundtracks – Una colección de música y sonidos.
- Tools – Herramientas para crear elementos de otros videojuegos.
- Comics – Contar historias de manera gráfica.
- Libros – Contar historias con palabras.
- Otros – Una categoría más abierta para proyectos entusiastas.

Tipo de proyecto

El tipo de proyecto tiene 5 opciones distintas que se presentan a continuación:

- Descargable – El contenido solo cuenta con contenido descargable.
- HTML – El contenido se encuentra comprimido en una carpeta ZIP o un archivo HTML que será ejecutado en el navegador. Esta fue la opción seleccionada, pues la exportación del entorno virtual a un archivo ZIP con todo lo requerido para que se ejecute en el navegador era la opción más sencilla.
- Flash - El contenido se encuentra comprimido en un archivo SWF que será ejecutado en el navegador.
- Java – El contenido está en un archivo JAR que será ejecutado el navegador.
- Unity =< 5.3 Si se cuenta con un archivo de Unity3d menor o hasta la versión indicada será ejecutado en el navegador.

Precio

Una forma de impulsar a los desarrolladores de entornos virtuales es asignarle precio o una donación al uso de los productos desarrollados. En este caso, no existió algún precio requerido o donativo sugerido, el propósito era llegar a la mayor cantidad posible de usuarios que visitaran la plataforma.

El archivo ZIP se obtuvo de Unity con la ayuda del módulo WebGL. La siguiente es la página de inicio del proyecto y está alojado en la siguiente dirección <https://rusetop132.itch.io/torre-de-hanoi>



Figura 4.3 Página de inicio del proyecto

4.2.2 Videoconferencias

Las pruebas a distancia harán uso de una herramienta que se popularizó durante la pandemia, “las videoconferencias”. Estas permitían una comunicación con el usuario cámara a cámara y de un modo imitaban la interacción cara a cara que la aplicación de las pruebas exigía. Se entrevistará a los usuarios utilizando la modalidad de videoconferencia, con la finalidad de poder observar al usuario, sus reacciones y movimientos. Para ello, se le pedirá al usuario que encienda su cámara y comparta su pantalla. Además, se conseguirá el

consentimiento explícito del usuario de grabar la sesión con el fin de poder analizar a detalle el desarrollo de la prueba en el análisis de resultados.

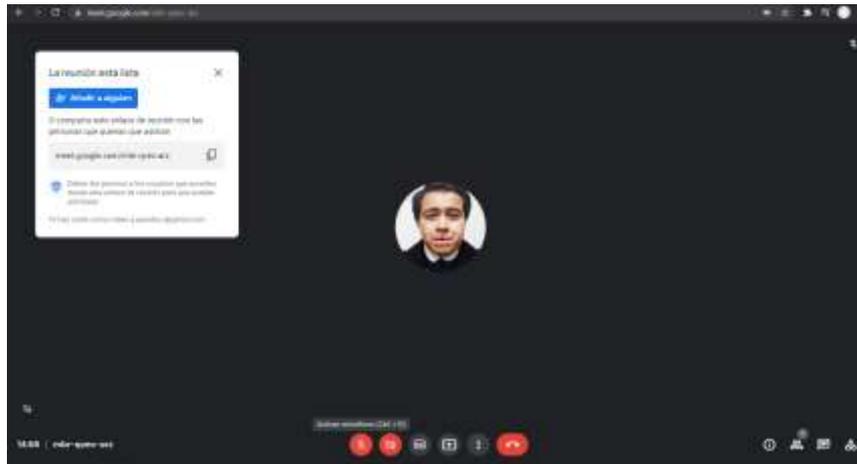


Figura 4.4 Plataforma de videoconferencia

Se utilizaron las siguientes plataformas de videoconferencias:

- Meet de Google
- Messenger de Meta



Figura 4.5 Prueba 1 Abdiel S.

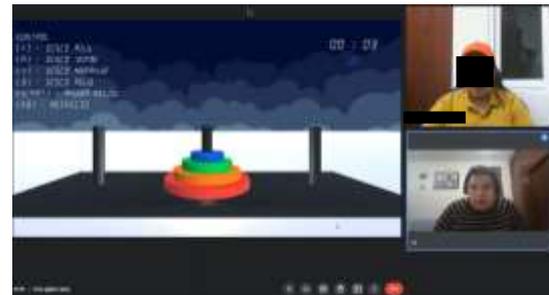


Figura 4.6 Prueba 2 Carlos L.

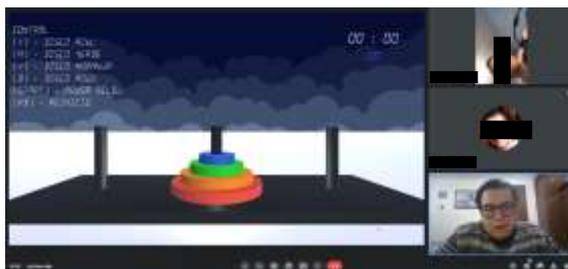


Figura 4.7 Prueba 3 Edgar P.



Figura 4.8 Prueba 4 Bidkar P.



Figura 4.9 Prueba 5 Daniel M.



Figura 4.10 Prueba 7 Diego M.



Figura 4.11 Prueba 8 Rodrigo R.



Figura 4.12 Prueba 9 Moisés O.



Figura 4.13 Prueba 10 Arnaud



Figura 4.14 Prueba 11 Salvador A.

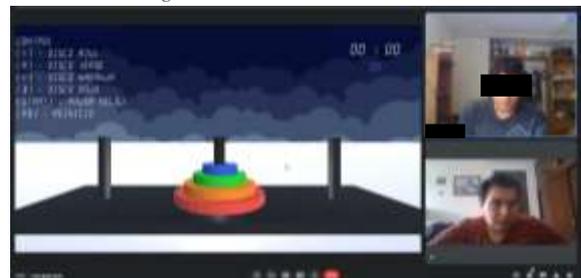


Figura 4.15 Prueba 12 Joel A.

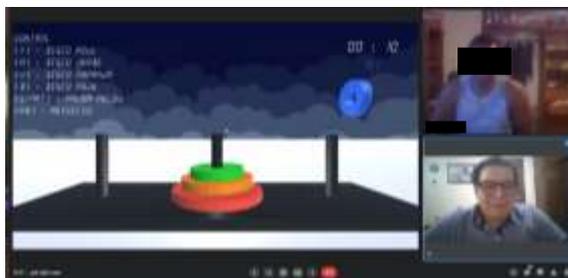


Figura 4.16 Prueba 13 Israel N.

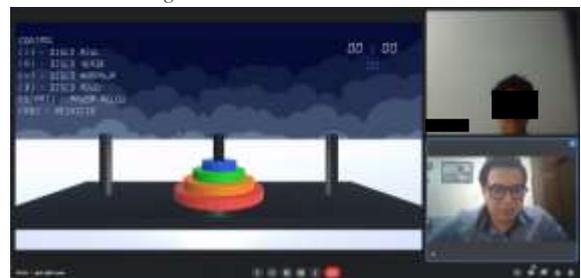


Figura 4.17 Prueba 14 Iván L.



Figura 4.18 Prueba 15 Roy L.



Figura 4.19 Prueba 16 Daniel R.



Figura 4.20 Prueba 17 Diana L.



Figura 4.21 Prueba 18 Santa.



Figura 4.22 Prueba 19 Victor T.



Figura 4.23 Prueba 20 Ernesto C.

4.3 Aplicación de pruebas presenciales

Afortunadamente, conforme las medidas sanitarias fueron relajándose, se aplicaron pruebas presenciales que siguieron el protocolo de pruebas, pero añadiendo algunas medidas de seguridad sanitaria, intentando reducir el contacto con el usuario. Las siguientes fueron las medidas implementadas:

- Uso de cubrebocas por parte del usuario y el aplicador.
- Uso de gel antibacterial antes de cada prueba, entre cada prueba y al finalizar la prueba.
- Sanitizar/limpiar el control con toallas desinfectantes.
- Sanitizar/limpiar el teclado con toallas desinfectantes.

Las pruebas presenciales fueron utilizadas para aplicar las pruebas que incluyen los tres controladores diferentes, ya que el controlador LEAP Motion no es tan ampliamente utilizado.

Se utilizó el programa OBS para grabar las pruebas presenciales, siendo el principal plano de vista el ambiente virtual y la cámara, colocada en la esquina inferior izquierda, en segundo plano.

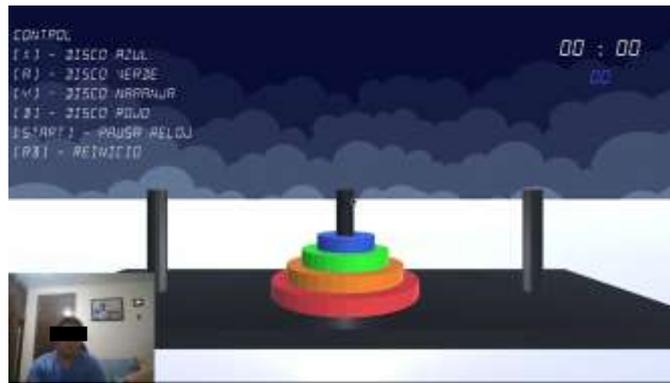


Figura 4.24 Prueba 21 Alejandro J.



Figura 4.25 Prueba 22 Araceli



Figura 4.26 Prueba 23 Eduardo

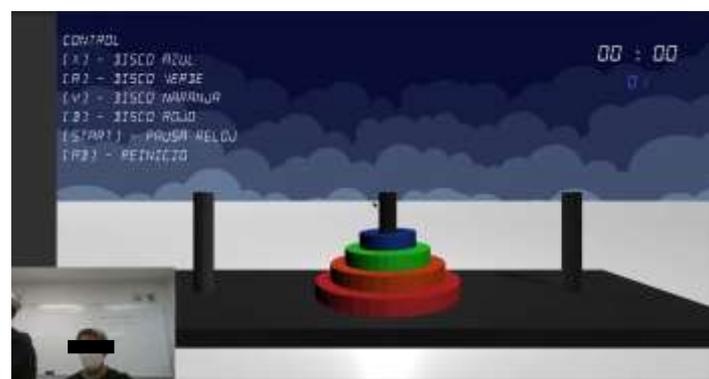


Figura 4.27 Prueba 24 Héctor



Figura 4.28 Prueba 25 Sabetahí

4.4 Características del Protocolo de Pruebas

El protocolo contará con las siguientes características:

Se seguirá el mismo número de pasos para resolver la Torre de Hanoi en el Control, Teclado y LEAP Motion.

El orden de cada prueba será de manera aleatoria, buscando que la resolución de la primera prueba no influya en la segunda prueba, o en su caso, en la tercera.

Se moverá la torre hacia la izquierda y hacia la derecha, de manera alternada en cada prueba con la finalidad de que el usuario no espere el mismo movimiento que la prueba pasada, y su desempeño en la prueba no se vea influenciado.

Se obtendrá el consentimiento explícito y se recolectará material audiovisual de los usuarios realizando las pruebas con el objetivo de analizar a detalle.

Las siguientes métricas se obtendrán de cada prueba:

- Latencia de movimientos, es decir, el tiempo en el que se realiza cada movimiento
- Tiempo total en el que se resuelve la Torre de Hanoi
- Posición en el eje X y el eje Y de los cuatro discos a lo largo de la prueba

4.4.1 Pasos del Protocolo de Pruebas

En el protocolo de pruebas existirán dos roles:

El instructor dará las instrucciones al usuario acerca de las actividades que realizará en la prueba. En este caso, el instructor será el sustentante de la tesis.

El usuario recibirá y seguirá las instrucciones del instructor acerca de las actividades que realizará en la prueba.

En primer lugar, se mostrará un menú en el cual se dará brevemente la información acerca de la Tesis y el entorno virtual. El instructor platicará con el usuario acerca del entorno virtual y su propósito, describirá las instrucciones que se realizarán a lo largo de la prueba.



Figura 4.29 Menú inicial

En segundo lugar, se mostrará un menú en donde se podrá seleccionar el controlador con el que se realizará la prueba. Una vez seleccionada la opción de controlador indicada, aparecerá un Canvas que indicará las teclas necesarias para manipular a los discos.



Figura 4.30 Menú de controladores

El tiempo empezará a contar a partir de que el usuario mueva el primer disco, es decir, el disco azul. A partir de ello, el programa deberá de contar el número de movimientos a partir de que el disco sea soltado.

Mientras se mantenga presionada la tecla asociada al disco, este se podrá mover a la posición deseada con las teclas de dirección (arriba abajo, izquierda, derecha).

Cuando el usuario haya resuelto la Torre de Hanoi, deberá de presionar la tecla de pausa de reloj. Hasta aquí se considerará finalizado el intento.

Se observará si el usuario presenta alguna dificultad en la manipulación de la torre, confusión de teclas o las preguntas relevantes que puedan surgir a lo largo de la prueba.

4.5 Lista de movimientos

4.5.1 Pasos para desplazar la Torre del poste central al poste derecho

1. Disco azul al poste izquierdo.
2. Disco verde al poste derecho.
3. Disco azul al poste derecho.
4. Disco naranja al poste izquierdo.
5. Disco azul al poste central.
6. Disco verde al poste izquierdo.
7. Disco azul al poste izquierdo.
8. Disco rojo al poste derecho.
9. Disco azul al poste derecho.
10. Disco verde al poste central.
11. Disco azul al poste central.
12. Disco naranja al poste derecho.
13. Disco azul al poste izquierdo.
14. Disco verde al poste derecho.
15. Disco azul al poste derecho.

4.5.2 Pasos para desplazar la Torre del poste central al poste izquierdo

1. Disco azul al poste derecho.
2. Disco verde al poste izquierdo.
3. Disco azul al poste izquierdo.
4. Disco naranja al poste derecho.
5. Disco azul al poste central.
6. Disco verde al poste derecho.
7. Disco azul al poste derecho.
8. Disco rojo al poste izquierdo.
9. Disco azul al poste izquierdo.
10. Disco verde al poste central.
11. Disco azul al poste central.
12. Disco naranja al poste izquierdo.
13. Disco azul al poste derecho.
14. Disco verde al poste izquierdo.
15. Disco azul al poste izquierdo.



Figura 4.31 Posición inicial de la Torre



Figura 4.32 Posición final de la Torre a la derecha



Figura 4.33 Posición final de la Torre a la izquierda

Habiendo realizado las pruebas, se generó una base de datos con la cual se evaluó el desempeño de cada usuario en el ambiente virtual. De ello tratará el siguiente capítulo.

Capítulo 5 Resultados

“Si he logrado ver más lejos ha sido porque he subido a hombros de gigantes” – Issac Newton

5.1 Automatización de Código en Python

Una vez que se han aplicado las pruebas, se puede analizar el desempeño de los participantes usando el material audiovisual recolectado durante las pruebas. Durante el análisis de las pruebas se obtuvieron alrededor de 865,000 puntos de información obtenidos del programa Tracker y alrededor de 3,000 puntos de mediciones manuales en las pruebas. Por lo que, el tratamiento de la información requirió el uso de programas de cómputo para diversas operaciones no limitadas a obtener datos, ordenarlos, interpolación lineal y graficar. Las gráficas que se presentan en el presente capítulo son el resultado de dicho código. El código utilizó la biblioteca **pandas**, de código abierto [20] con licencia BSD (Berkeley Software Distribution); la biblioteca de **Matplotlib** de código abierto [21] con licencia BSD junto con el módulo de Matplotlib, **pyplotlib**; y la biblioteca **numpy** [22].

El primer código que se utilizó fue para obtener la información de los datos obtenidos por Tracker, estos datos contienen el tiempo, la posición del centro de masa en X y Y de cada disco, tal y como el software lo calculó.

Para ello, de pandas se utilizó el método *dataframe*. Una vez obtenidos los datos, se utilizó la función de interpolación lineal, *interpolate*, para rellenar la información faltante cada que Tracker no encontró la posición. Después, se utilizó *pyplot* para graficar la información deseada utilizando funciones particulares para X vs Y , X vsTiempo y Y vsTiempo. Además, se añadió una función para conocer los valores máximos del movimiento en X y en Y de los discos.

El segundo código que se utilizó fue para graficar los datos que se obtuvieron de manera manual, es decir, directamente del video y ya tabulados en Excel, se utilizó de la biblioteca *pandas* el método *dataframe* para obtener los datos. Después, se utilizó de la biblioteca de *matplotlib* se utilizó el método *pyplot* para graficar la información deseada utilizando funciones particulares para los deltas de tiempo, curvas de aprendizaje y los anchos de banda. Los códigos serán adjuntados en el Anexo 1.

5.2 Presentación de Resultados

De las pruebas a distancia y presenciales, las siguientes métricas fueron obtenidas:

- Latencia de movimientos, es decir, el tiempo en el que se realiza cada movimiento
- Cantidad de movimientos
- Posición en el eje X y el eje Y de los cuatro discos a lo largo de la prueba

5.2.1 Latencia de Movimientos

La latencia, según la RAE [18], se define como el tiempo que transcurre entre un estímulo y la respuesta que produce. En este caso se consideró como latencia el tiempo que ocurría desde que el usuario escucha la instrucción completa y el momento en que el usuario coloca el disco en la posición indicada, la delta de tiempo.

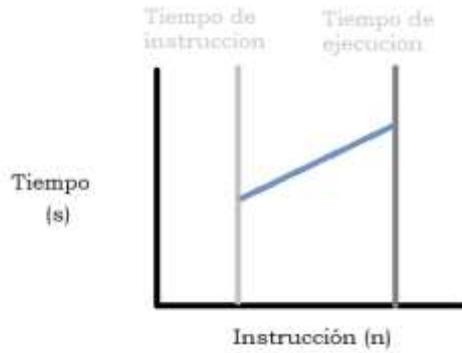


Figura 5.1 Delta de tiempo de una instrucción

Así, se pudo obtener una gráfica de las deltas de tiempo que tomaban mover los discos durante las pruebas. Las siguientes gráficas corresponden a las deltas de tiempo de las 19 pruebas a distancia que se analizaron, cada gráfica contiene la información del Teclado y el Control de cada prueba. El eje X de la gráfica corresponderá al número de instrucción y el eje Y corresponderá al tiempo de cada instrucción.

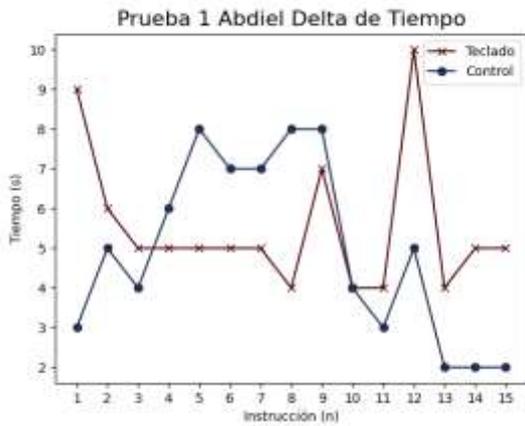


Figura 5.2 Prueba 1 Delta de Tiempo

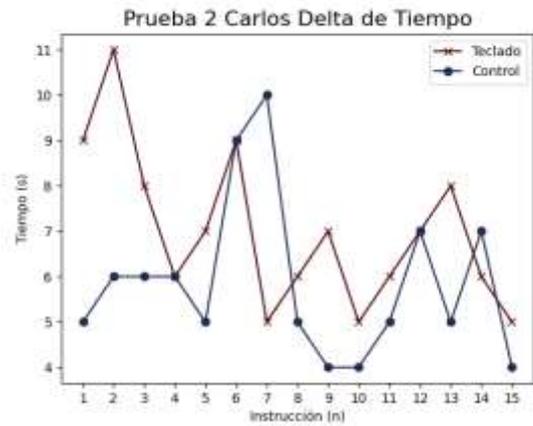


Figura 5.3 Prueba 2 Delta de Tiempo



Figura 5.4 Prueba 3 Delta de Tiempo

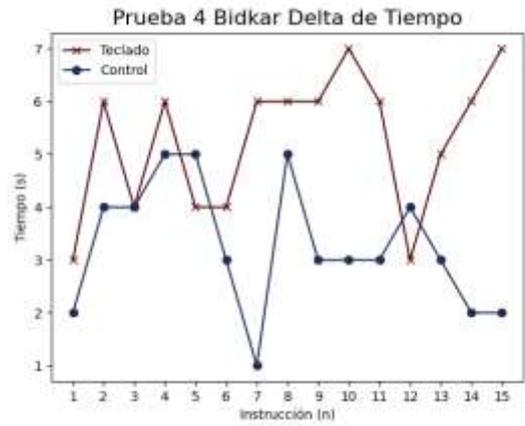


Figura 5.5 Prueba 4 Delta de Tiempo

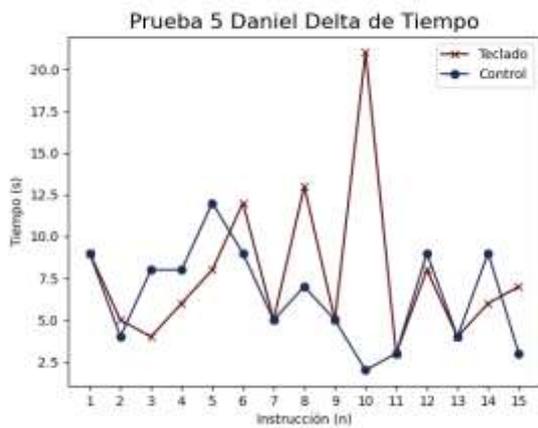


Figura 5.6 Prueba 5 Delta de Tiempo

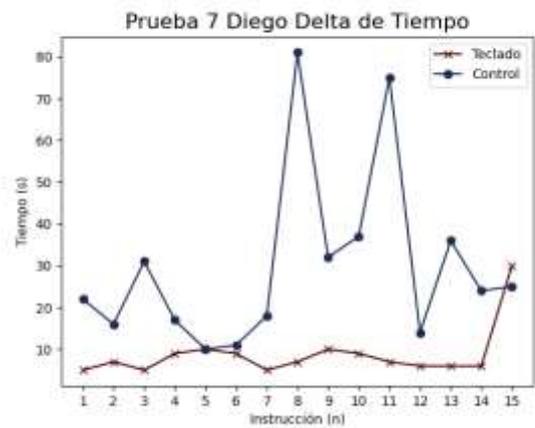


Figura 5.7 Prueba 7 Delta de Tiempo

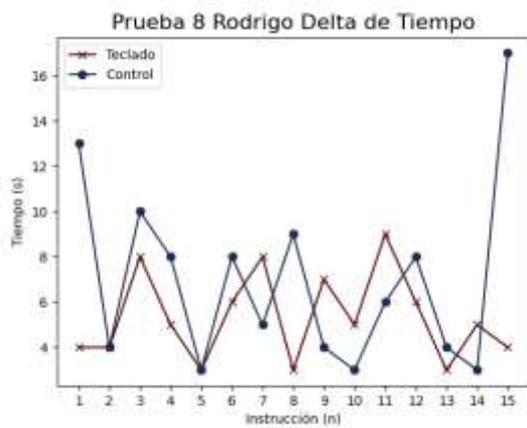


Figura 5.8 Prueba 8 Delta de Tiempo

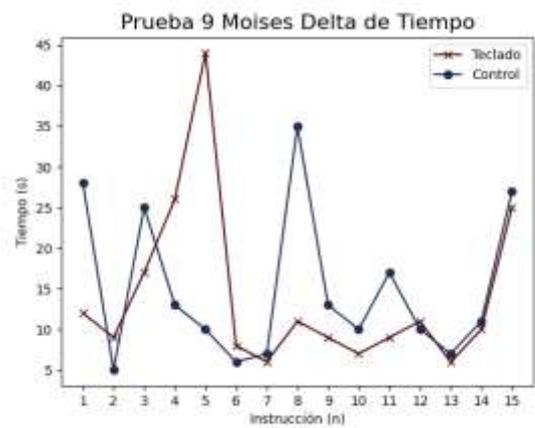


Figura 5.9 Prueba 9 Delta de Tiempo

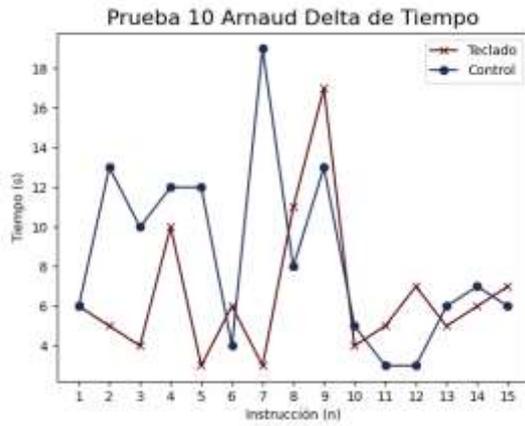


Figura 5.10 Prueba 10 Delta de Tiempo

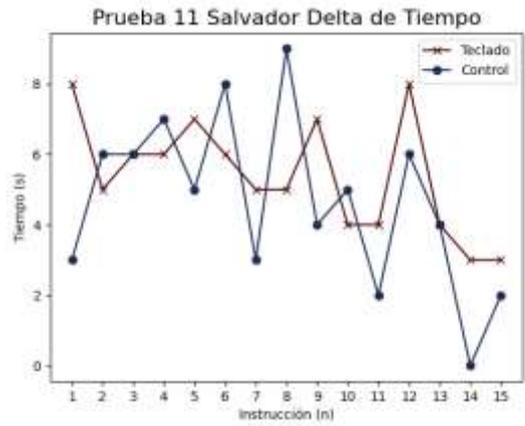


Figura 5.11 Prueba 11 Delta de Tiempo

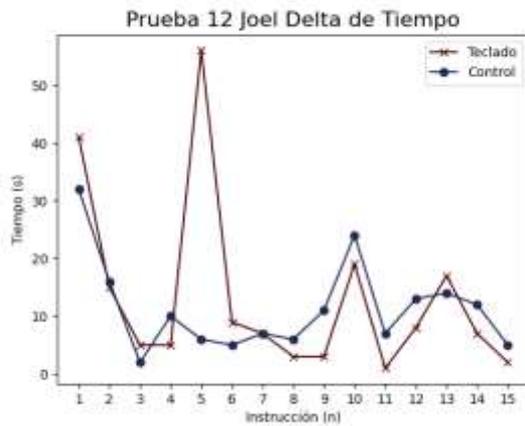


Figura 5.12 Prueba 12 Delta de Tiempo

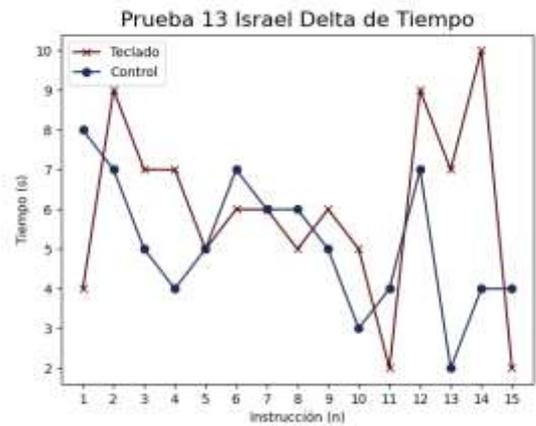


Figura 5.13 Prueba 13 Delta de Tiempo

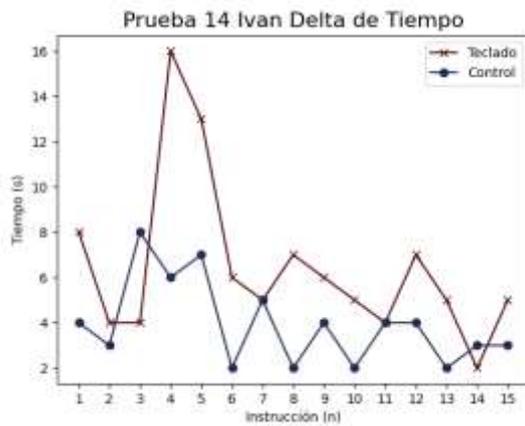


Figura 5.14 Prueba 14 Delta de Tiempo

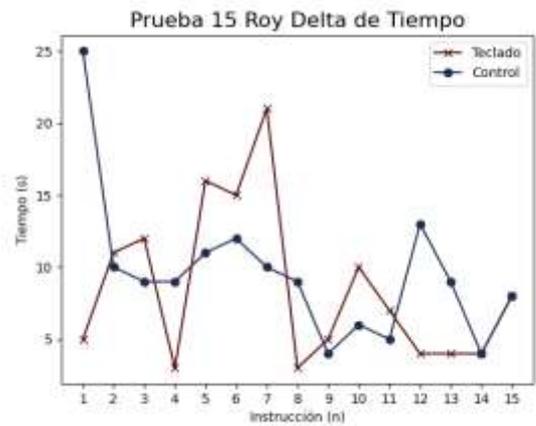


Figura 5.15 Prueba 15 Delta de Tiempo

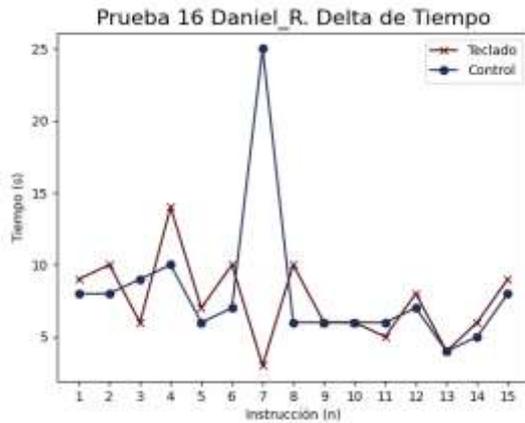


Figura 5.16 Prueba 16 Delta de Tiempo

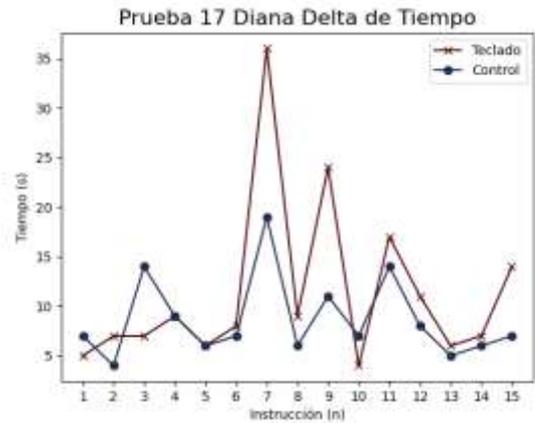


Figura 5.17 Prueba 17 Delta de Tiempo

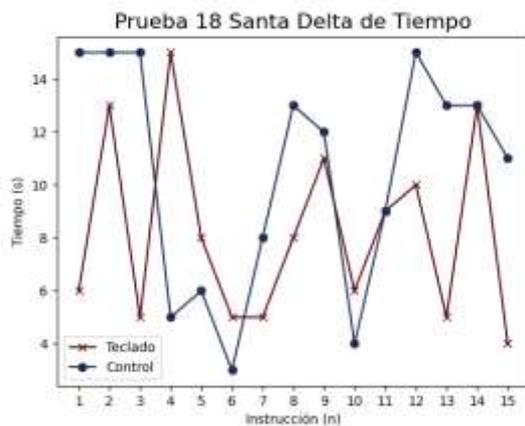


Figura 5.18 Prueba 18 Delta de Tiempo

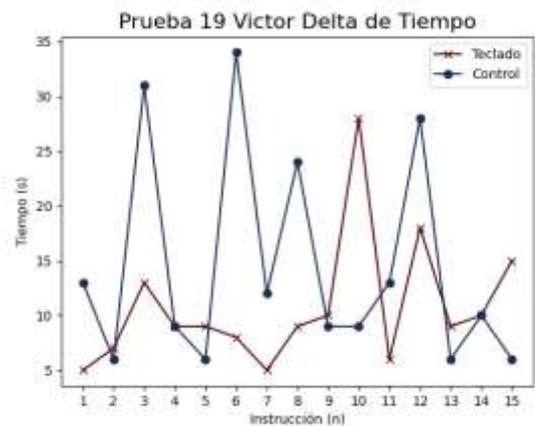


Figura 5.19 Prueba 19 Delta de Tiempo

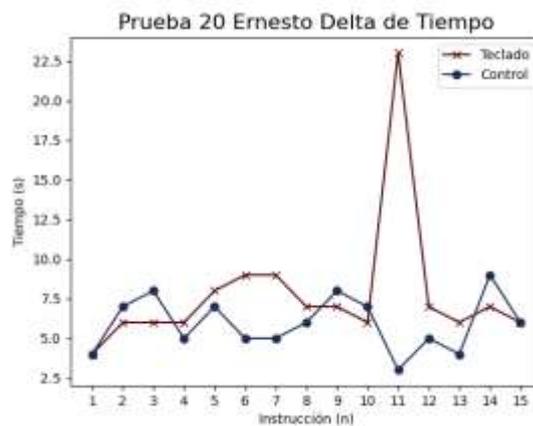


Figura 5.20 Prueba 20 Delta de Tiempo

Las siguientes gráficas corresponden a las deltas de tiempo de las 5 pruebas presenciales que se analizaron, cada gráfica contiene la información del Teclado, el Control, y el control de gestos, LEAP Motion, de cada prueba.

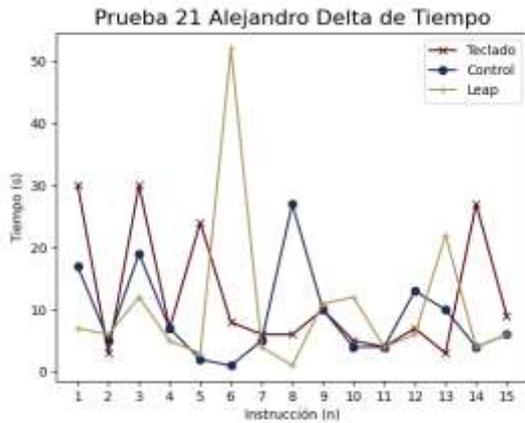


Figura 5.21 Prueba 21 Delta de Tiempo

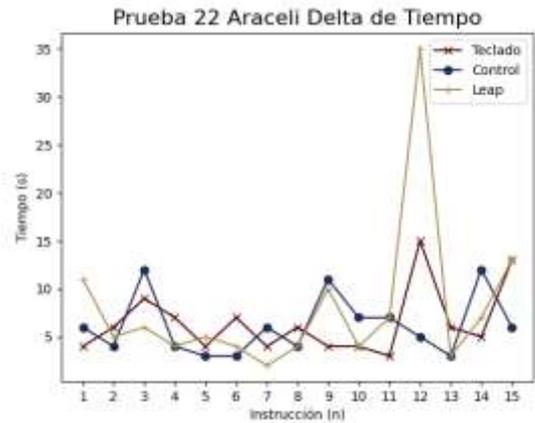


Figura 5.22 Prueba 22 Delta de Tiempo

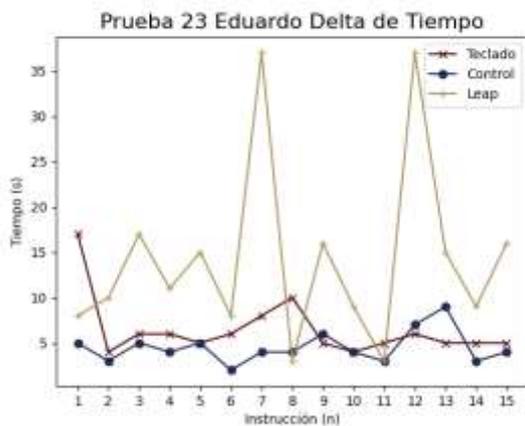


Figura 5.23 Prueba 23 Delta de Tiempo

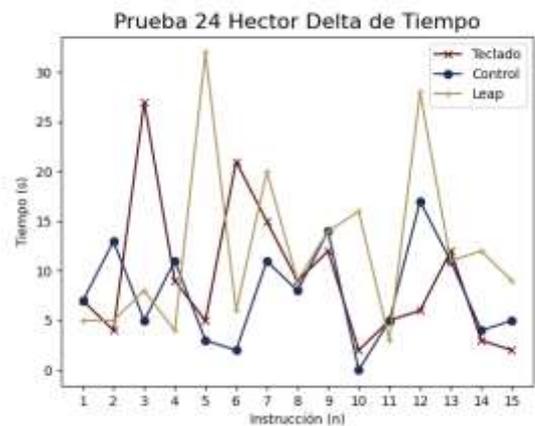


Figura 5.24 Prueba 24 Delta de Tiempo

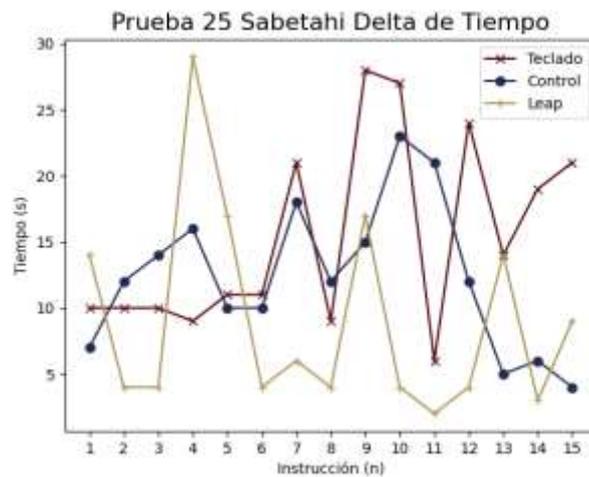


Figura 5.25 Prueba 25 Delta de Tiempo

5.2.2 Cantidad Total de Movimientos

La cantidad de movimientos se obtiene directamente del contador de movimientos que está programado en el ambiente virtual, respecto a esta medida, dado que se le indica al usuario la manera en cómo resolver la Torre de Hanoi, idealmente serían 15 movimientos los detectados por el programa. Sin embargo, en la aplicación de las pruebas se detectó que existen ocasiones en las que el usuario, suelta y agarra el disco, dado que se va adaptando al

controlador que está usando, por lo que se va incrementando el número de movimientos realizados para completar la prueba.

Tabla 5.1 Número de movimientos de pruebas

Numero Prueba	Nombre	Entrada	Número de Movimientos	N Prueba	Nombre	Entrada	Número de Movimientos
1	Abdiel S.	Teclado	15	15	Roy L.	Teclado	135
		Control	16			Control	162
2	Carlos L.	Teclado	28	16	Daniel R.	Teclado	22
		Control	19			Control	16
3	Edgar P.	Teclado	17	17	Diana S.	Teclado	30
		Control	92			Control	19
4	Bidkar P.	Teclado	16	18	Cristian S.	Teclado	136
		Control	15			Control	132
5	Daniel M.	Teclado	15	19	Víctor C.	Teclado	25
		Control	19			Control	30
7	Diego M.	Teclado	16	20	Ernesto C.	Teclado	23
		Control	20			Control	22
8	Rodrigo R.	Teclado	19	21	Alejandro J.	Teclado	28
		Control	29			Control	22
9	Moisés O.	Teclado	42	22	Araceli N.	LEAP	55
		Control	19			Teclado	24
10	Arnaud	Teclado	19	23	Eduardo N.	Control	26
		Control	37			LEAP	34
11	Salvador A.	Teclado	16	24	Héctor N.	Teclado	29
		Control	17			Control	17
12	Joel L.	Teclado	167	25	Sabetahí R.	LEAP	74
		Control	174			Teclado	128
13	Israel A.	Teclado	15	24	Héctor N.	Control	163
		Control	15			LEAP	61
14	Iván L.	Teclado	23	25	Sabetahí R.	Teclado	20
		Control	18			Control	23
						LEAP	29

El controlador que tiene el menor número de movimientos se considera la mejor opción para resolver la prueba bajo este criterio.

5.2.3 Rastreo de Movimiento (Tracker)

Se rastreó el movimiento de los discos usando el programa de código abierto Tracker [19]. El programa realiza el rastreo de la posición de un centro de masa alrededor de un origen y un sistema de coordenadas. Para esto, se utilizó una barra de calibración (en azul en la imagen 5.26) que permitirá estimar las distancias; un sistema coordinado para referir la posición de los objetos a un punto determinado en el entorno virtual (en rosa mexicano en la siguiente imagen), y cuatro centros de masas del color correspondiente al disco del que rastreó la posición.

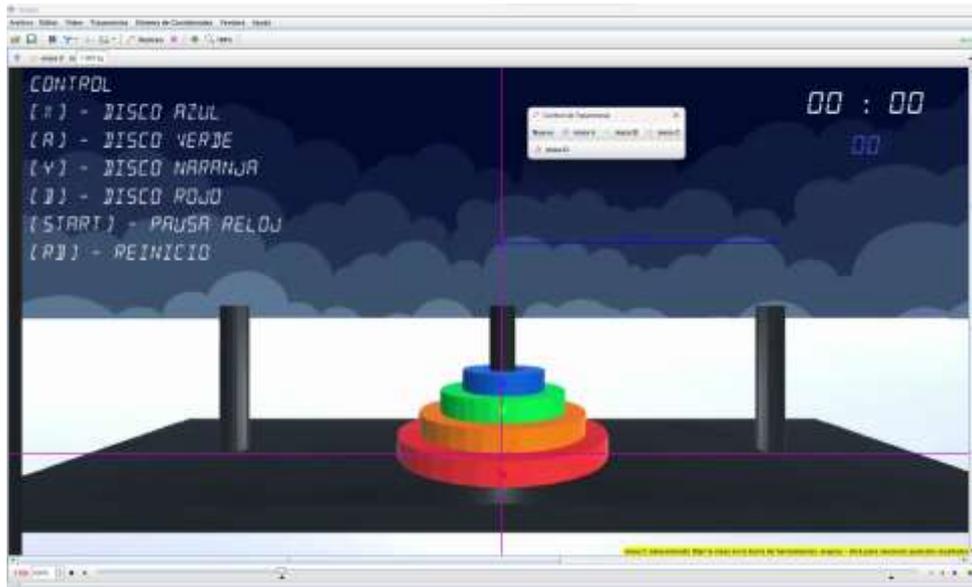


Figura 5.26 Interfaz de Tracker

El programa rastrea la posición, en el eje X y el eje Y , 5 veces por cada segundo durante la prueba hasta que el disco toma su posición final, siendo el disco azul el ultimo rastreado. Dicha información permitirá tener más métricas con las cuales hacer la comparativa entre los controladores. La prueba 6 se canceló y la prueba 7 no se pudo analizar con el software *Tracker* debido a que el tiempo de la prueba excedía las capacidades de procesamiento del software. Las gráficas que provengan de datos adquiridos por *Tracker* no tendrán la prueba 6 ni la 7.

5.2.4 Comparativa de Posición en X vs Tiempo

Los datos que *Tracker* recolectó fueron utilizados para graficar la posición en X contra el tiempo de cada prueba. En estas gráficas, se puede apreciar el comportamiento del movimiento de los discos en el eje X durante en prueba en los distintos controladores.

Primeramente, se observa que los discos se mueven de manera alternada entre los distintos postes, donde permanecen hasta su siguiente movimiento, el número de movimientos es inversamente proporcional al tamaño del disco, siendo los discos de menor tamaño los que se mueven más y por lo tanto los que se aprecian con mayor frecuencia y número de movimientos.

Además, esta gráfica permite observar con precisión la recurrencia del método de resolución, ya que, se observa el patrón del número de pasos para el movimiento de los discos azul, verde, naranja y rojo.

El primer disco, el azul, tiene su primer movimiento hacia el poste auxiliar, su segundo movimiento es hacia el poste destino, y en su tercer movimiento regresa hacia el poste central, en donde estaba originalmente. Completa dos veces este patrón de movimiento, y realiza dos pasos de este patrón para llegar al poste destino.

El segundo disco, el verde, tiene su primer movimiento hacia el poste destino, su segundo movimiento es hacia el poste auxiliar, y en su tercer movimiento regresa hacia el poste

central, en donde estaba originalmente. Completa una vez este patrón de movimiento para después con otro movimiento ir hacia el poste destino. Este patrón es el inverso del primer patrón observado en el disco azul.

El tercer disco, el naranja, tiene su primer movimiento hacia el poste auxiliar, y su segundo movimiento es hacia el poste destino, movimiento con el cuál, llega a su posición final. Completa dos pasos del patrón visto en el disco azul.

El cuarto disco, el rojo, tiene su primer movimiento hacia el poste auxiliar, su segundo movimiento hacia el poste destino, y en su tercer movimiento regresa hacia el poste central, en donde estaba originalmente. Completa dos pasos del patrón visto en el disco verde.

Estas gráficas también permiten observar que en la mayoría de las pruebas se movió la torre de manera opuesta para el controlador y para el teclado, esto es comentado en el capítulo anterior y fue para que no se esperaran el siguiente movimiento, teniendo que repetir en una ocasión la serie de pasos para el control de gestos con LEAP Motion.

Las siguientes gráficas corresponden a las 18 pruebas presenciales que se analizaron, se presenta en un mismo renglón cada prueba con fines comparativos, en la primera columna se encuentra la prueba con control y en la segunda columna la prueba del teclado.

El eje *Y* de la gráfica representa la posición en el eje *X* del centro de masa del disco, la parte positiva del eje representa la derecha del poste central, y la parte negativa del eje representa la izquierda del poste central; mientras que el eje *X* de la gráfica es ocupado por el tiempo.

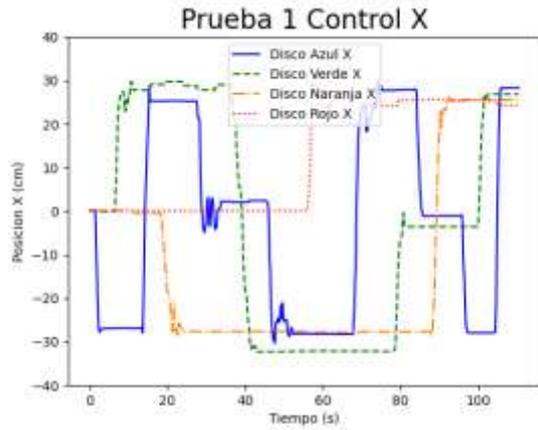


Figura 5.27 Prueba 1 Control en el eje X

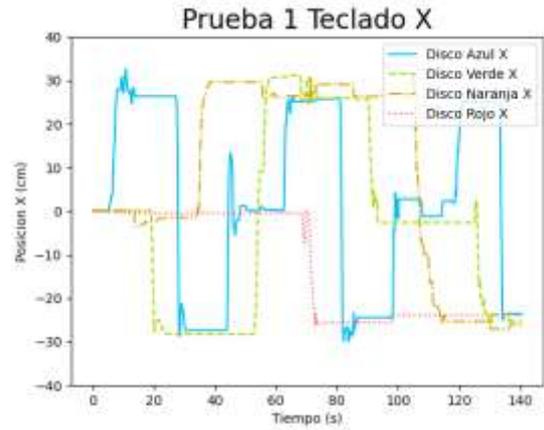


Figura 5.28 Prueba 1 Teclado en el eje X

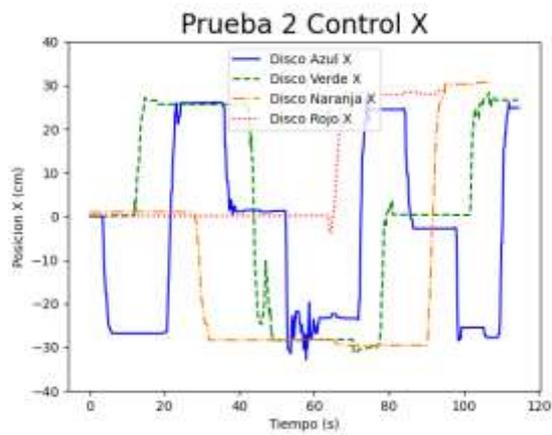


Figura 5.29 Prueba 2 Control en el eje X

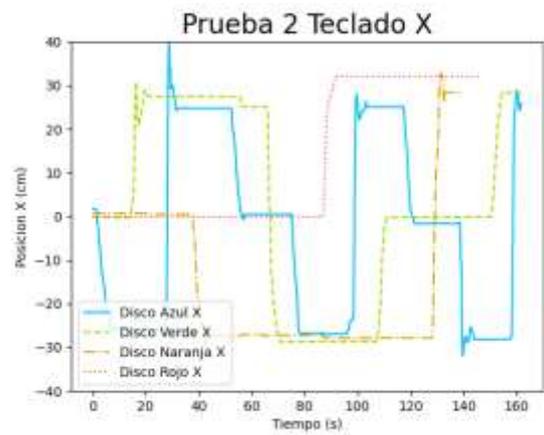


Figura 5.30 Prueba 2 Teclado en el eje X

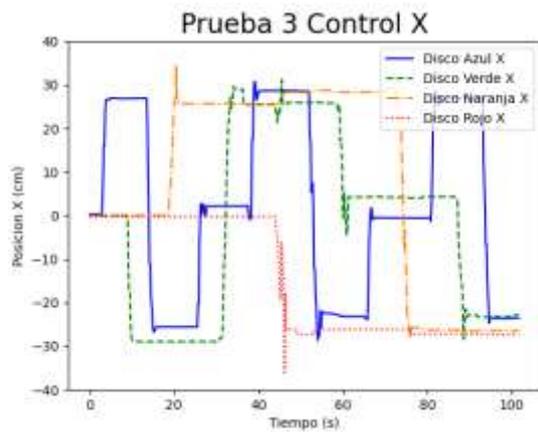


Figura 5.31 Prueba 3 Control en el eje X

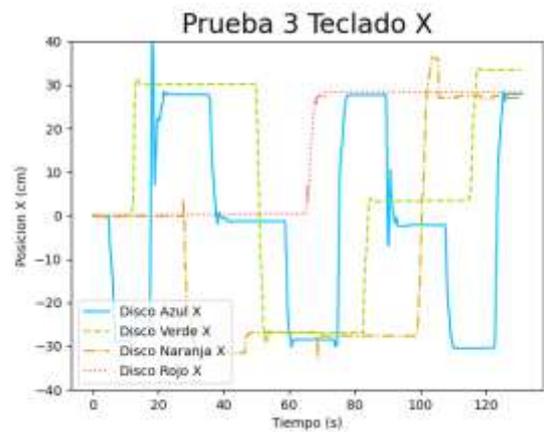


Figura 5.32 Prueba 3 Teclado en el eje X

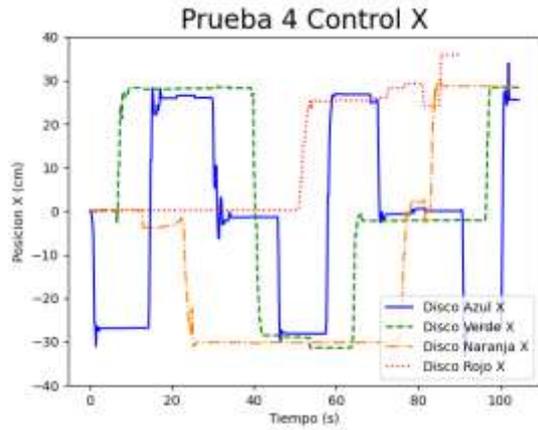


Figura 5.33 Prueba 4 Control en el eje X

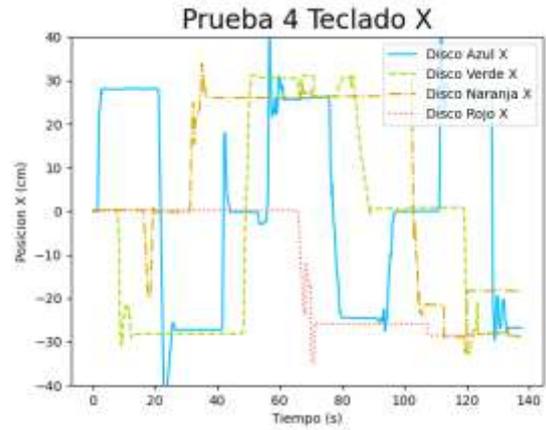


Figura 5.34 Prueba 4 Teclado en el eje X

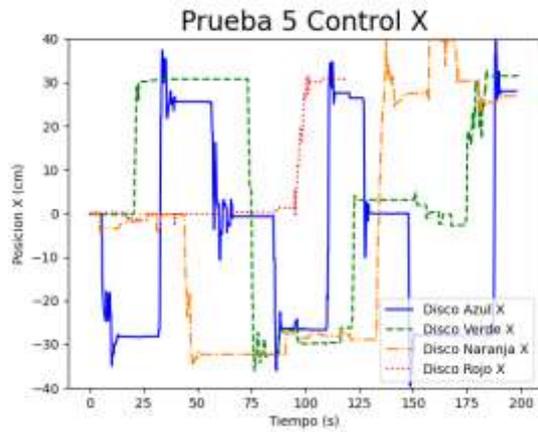


Figura 5.35 Prueba 5 Control en el eje X

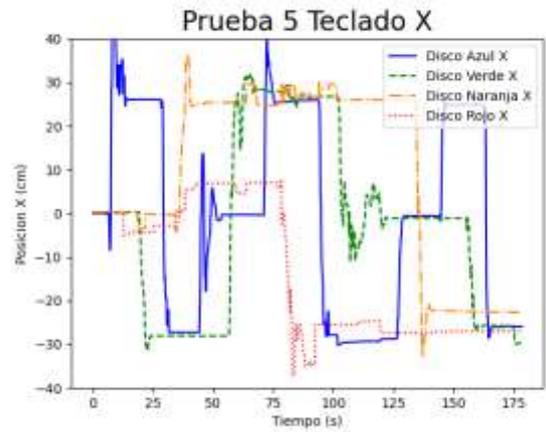


Figura 5.36 Prueba 5 Teclado en el eje X

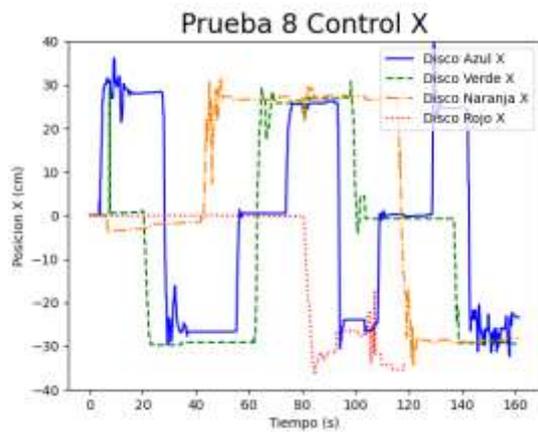


Figura 5.37 Prueba 8 Control en el eje X

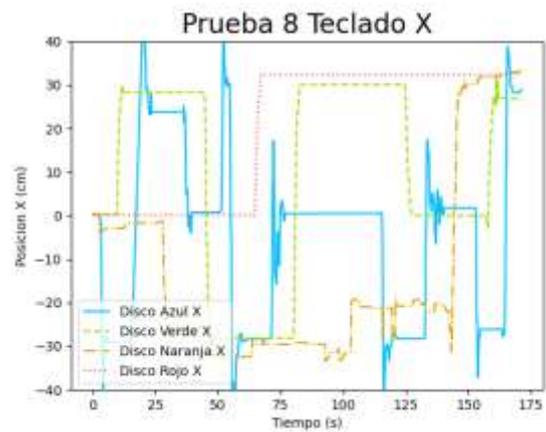


Figura 5.38 Prueba 8 Teclado en el eje X

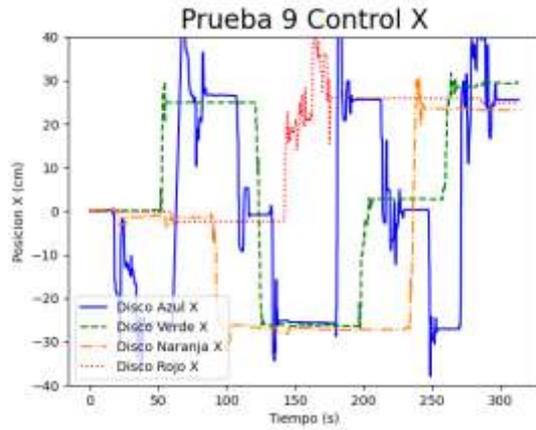


Figura 5.39 Prueba 9 Control en el eje X

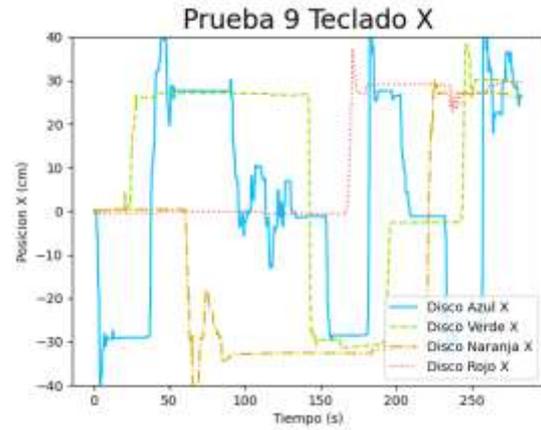


Figura 5.40 Prueba 9 Teclado en el eje X

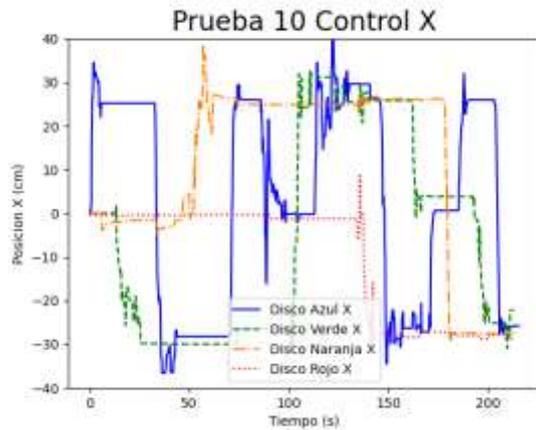


Figura 5.41 Prueba 10 Control en el eje X

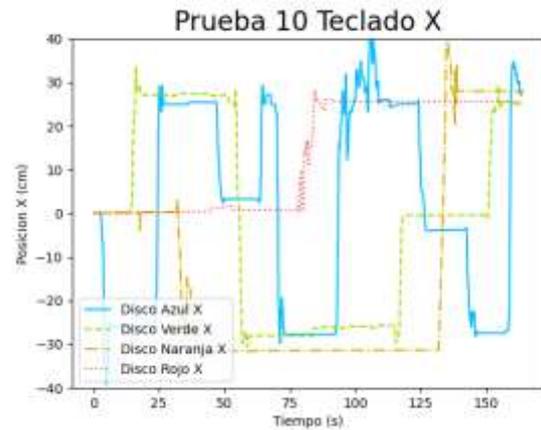


Figura 5.42 Prueba 10 Control en el eje X

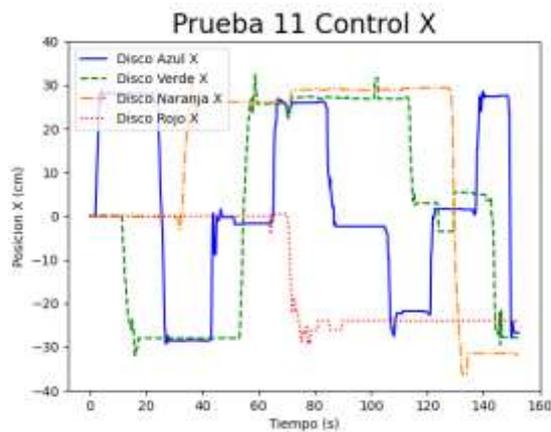


Figura 5.43 Prueba 11 Control en el eje X

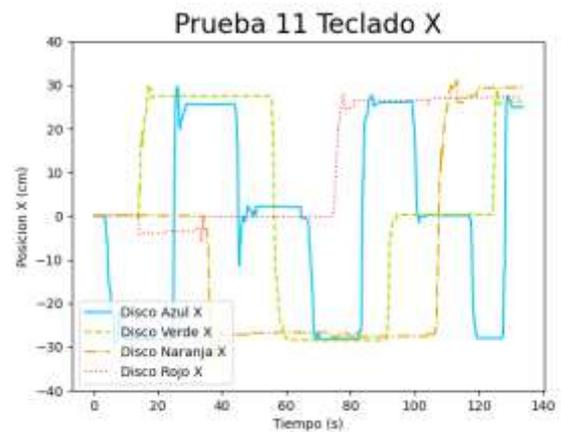


Figura 5.44 Prueba 11 Teclado en el eje X

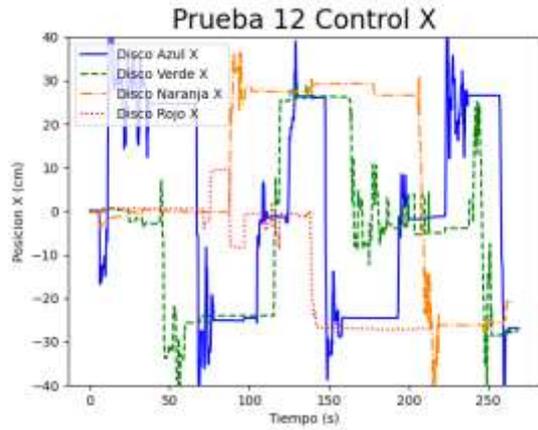


Figura 5.45 Prueba 12 Control en el eje X

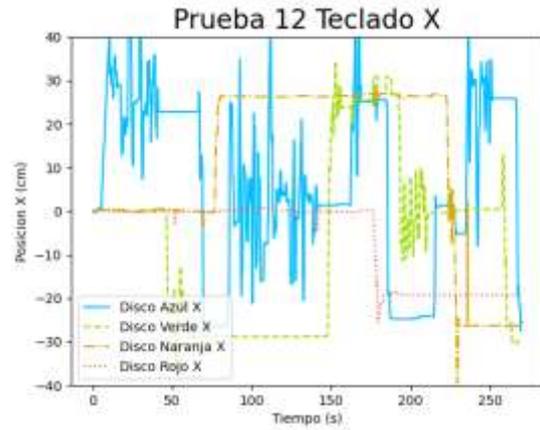


Figura 5.46 Prueba 12 Teclado en el eje X

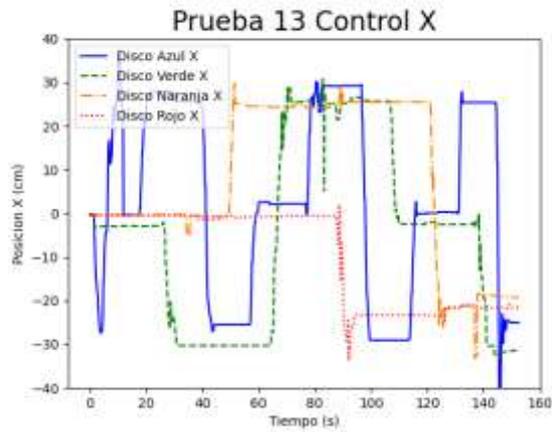


Figura 5.47 Prueba 13 Control en el eje X

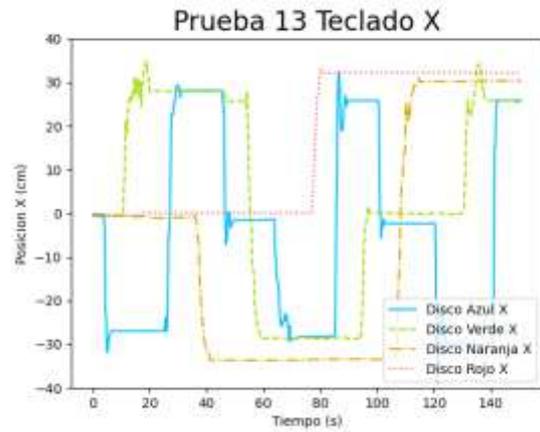


Figura 5.48 Prueba 13 Teclado en el eje X

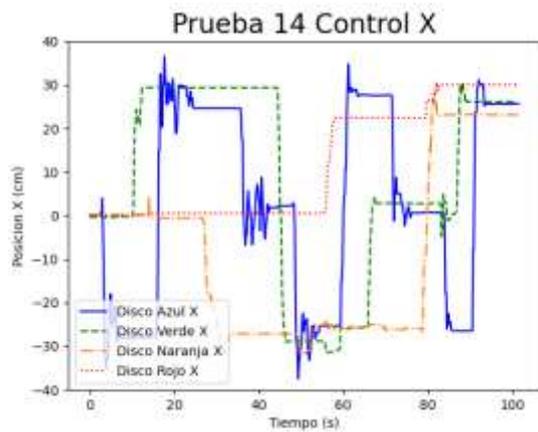


Figura 5.49 Prueba 14 Control en el eje X

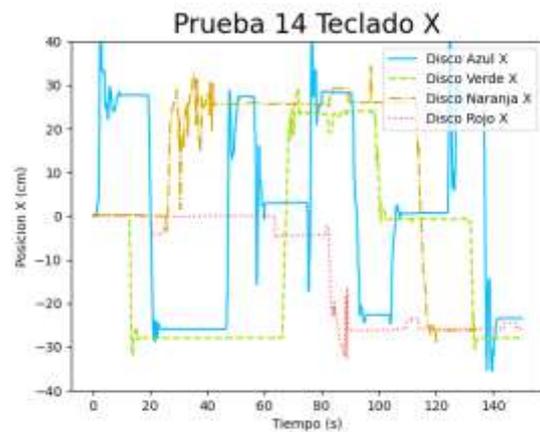


Figura 5.50 Prueba 14 Teclado en el eje X

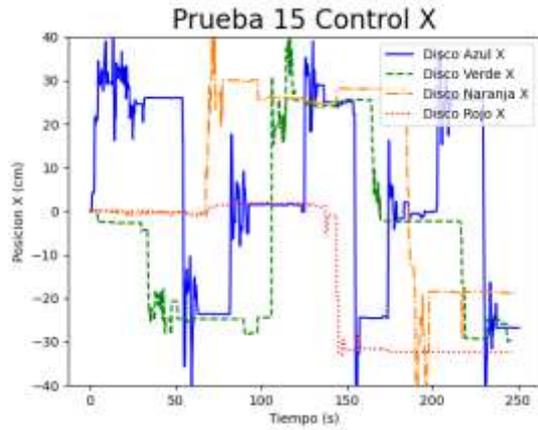


Figura 5.51 Prueba 15 Control en el eje X

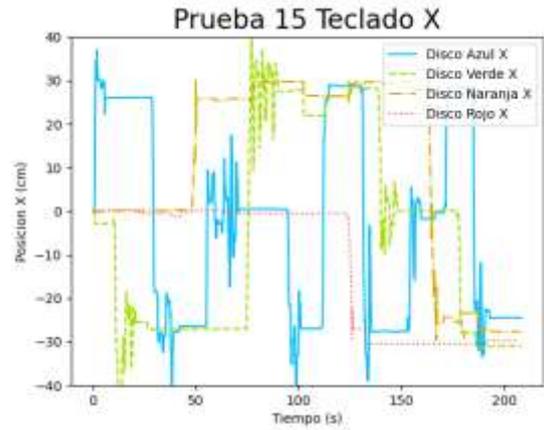


Figura 5.52 Prueba 15 Teclado en el eje X

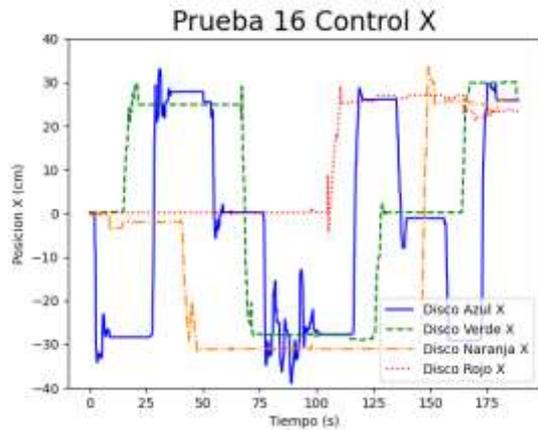


Figura 5.53 Prueba 16 Control en el eje X

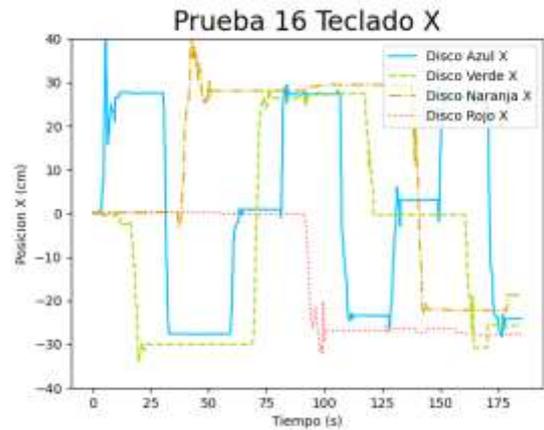


Figura 5.54 Prueba 16 Teclado en el eje X

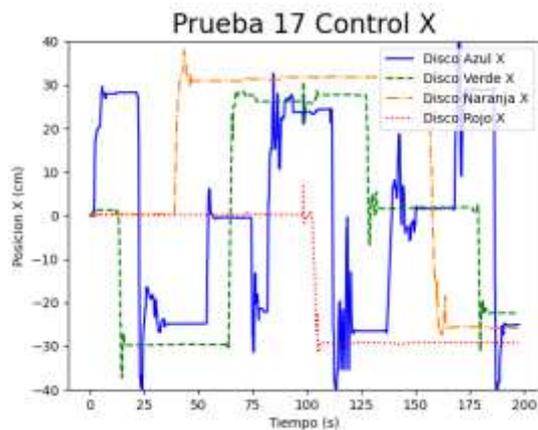


Figura 5.55 Prueba 17 Control en el eje X

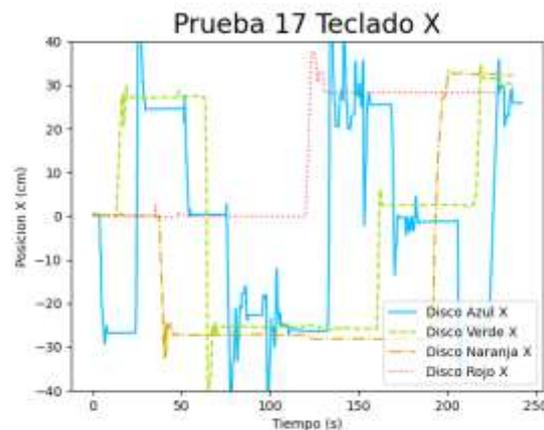


Figura 5.56 Prueba 17 Teclado en el eje X

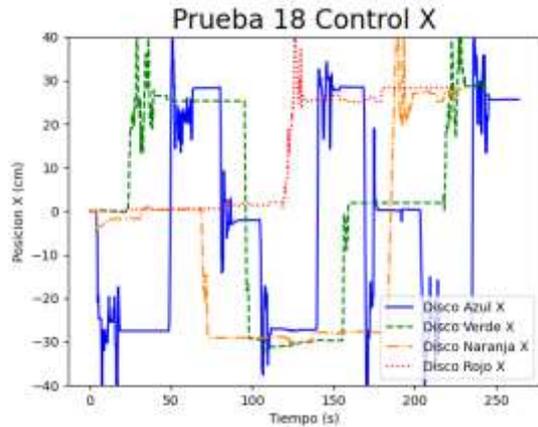


Figura 5.57 Prueba 18 Control en el eje X

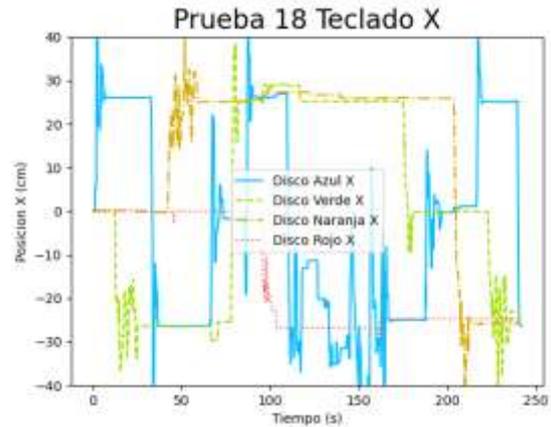


Figura 5.58 Prueba 18 Teclado en el eje X

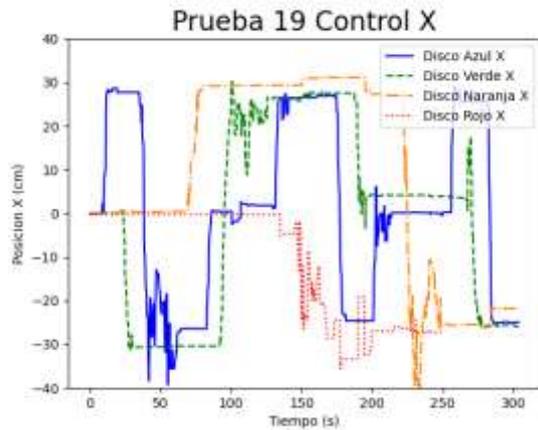


Figura 5.59 Prueba 19 Control en el eje X

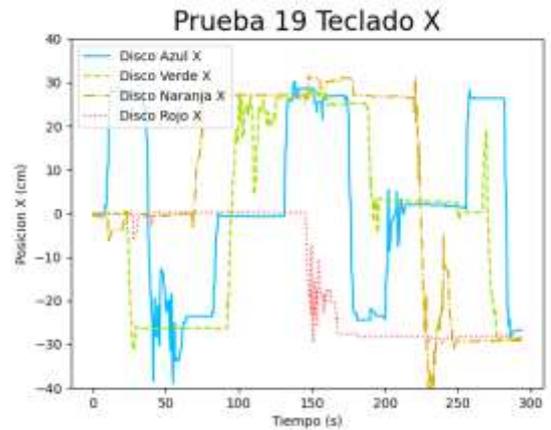


Figura 5.60 Prueba 19 Teclado en el eje X

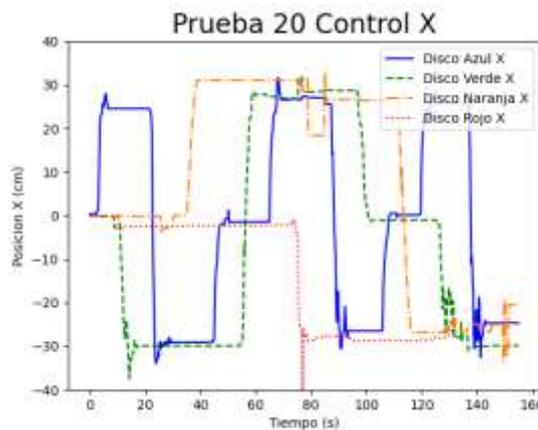


Figura 5.61 Prueba 20 Control en el eje X

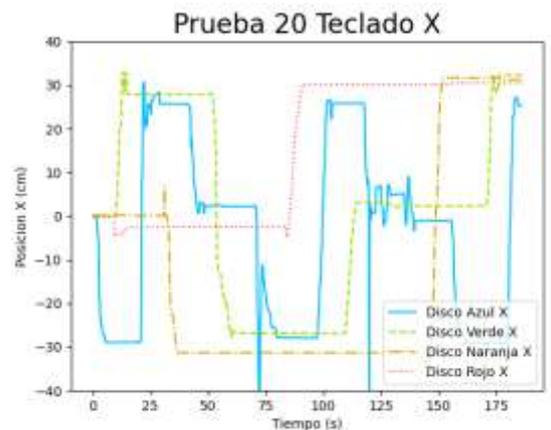


Figura 5.62 Prueba 20 Teclado en el eje X

Las siguientes gráficas corresponden a las 5 pruebas presenciales que se realizaron, se presenta en un mismo renglón cada prueba con fines comparativos, en la primera columna se encuentra la prueba con control, en la segunda columna la prueba del teclado, y en la tercera columna se encuentra el control de gestos, LEAP.

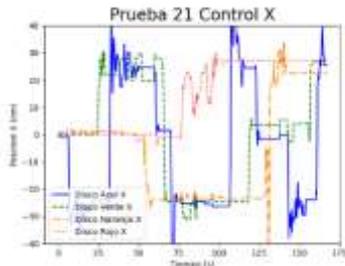


Figura 5.63 Prueba 21 Control en el eje X

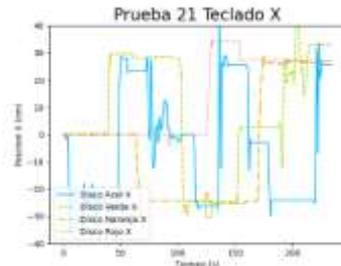


Figura 5.64 Prueba 21 Teclado en el eje X

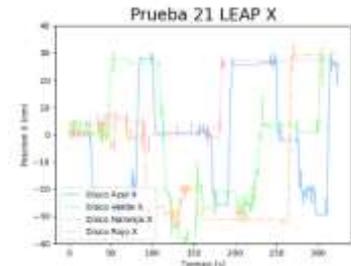


Figura 5.65 Prueba 21 LEAP en el eje X

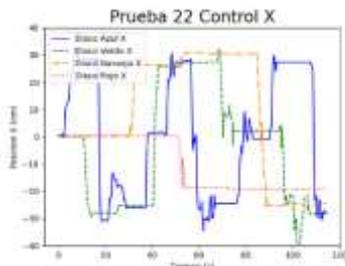


Figura 5.66 Prueba 22 Control en el eje X

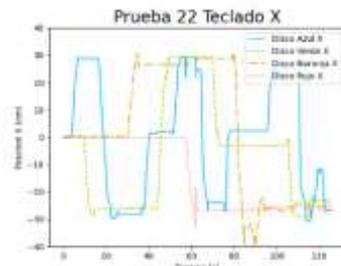


Figura 5.67 Prueba 22 Teclado en el eje X

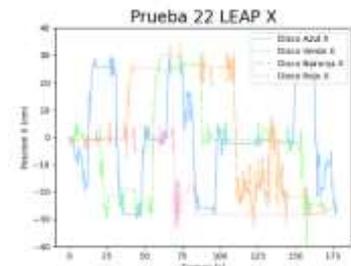


Figura 5.68 Prueba 22 LEAP en el eje X

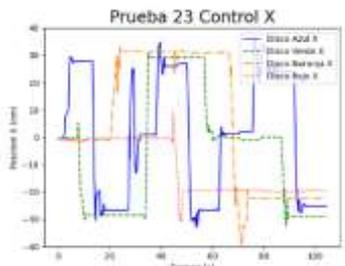


Figura 5.69 Prueba 23 Control en el eje X

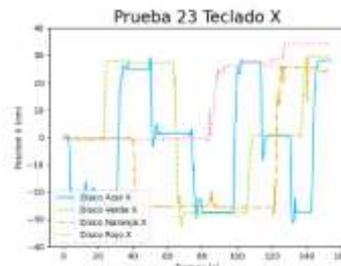


Figura 5.70 Prueba 23 Teclado en el eje X

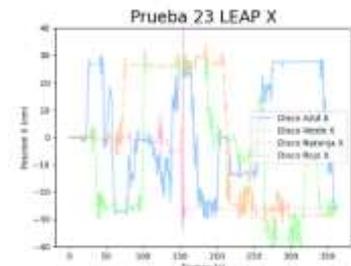


Figura 5.71 Prueba 23 LEAP en el eje X

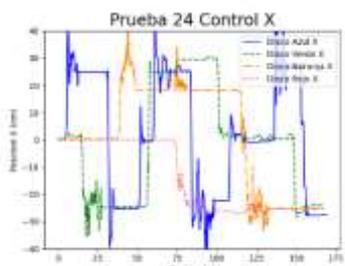


Figura 5.72 Prueba 24 Control en el eje X

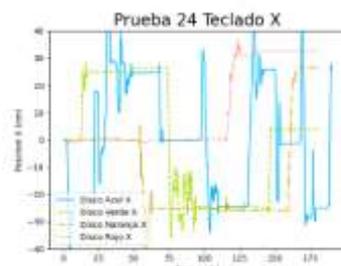


Figura 5.73 Prueba 24 Teclado en el eje X

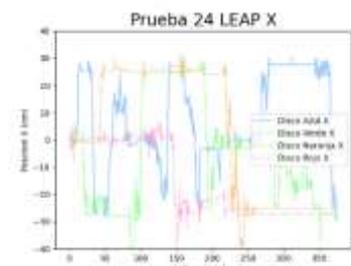


Figura 5.74 Prueba 24 LEAP en el eje X

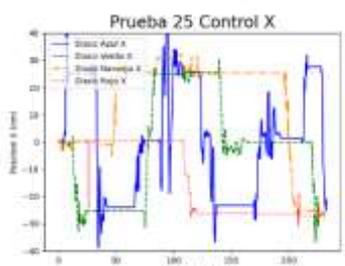


Figura 5.75 Prueba 25 Control en el eje X

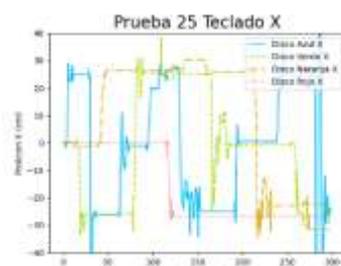


Figura 5.76 Prueba 25 Teclado en el eje X

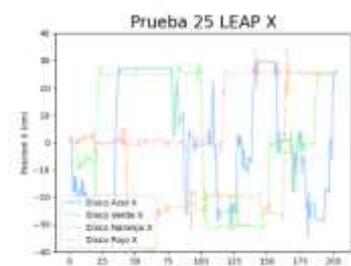


Figura 5.77 Prueba 25 LEAP en el eje X

5.2.5 Comparativa de Posición en Y vs Tiempo de cada controlador

Los datos que Tracker recolectó fueron utilizados para graficar la posición en Y contra el tiempo de cada prueba con los distintos controladores, donde se podrán apreciar el

comportamiento del movimiento de los discos en el eje Y en los distintos controladores durante la prueba.

Primeramente, se nota que la posición inicial en el eje Y de los discos es distinta para cada disco e irá cambiando cuando estos se mueven a otros postes.

Además, se llega a apreciar que la altura de los discos presenta un movimiento oscilante, asciende y desciende, mientras el usuario se va adaptando a los controladores. Además, se puede apreciar que los discos toman alturas temporales mientras están en los postes hasta que estos regresan a la altura inicial en la posición final. El controlador que tiene las menos oscilaciones y no se sale del juego se considera la mejor opción para resolver la prueba usando este criterio.

El número de movimientos es inversamente proporcional al tamaño del disco, siendo los discos de menor tamaño los que se mueven más y por lo tanto los que se aprecian con mayor número de movimientos. Además, el movimiento oscilante aumenta su frecuencia cuando el usuario no está controlando adecuadamente la posición de disco. Este criterio será recopilado y tabulado para evaluar el mejor controlador.

Las siguientes gráficas corresponden a las 18 pruebas presenciales que se analizaron, se presenta en un mismo renglón cada prueba con fines comparativos, en la primera columna se encuentra la prueba con control y en la segunda columna la prueba del teclado. La prueba 6 se canceló y la prueba 7 no pudo ser analizada por Tracker.

El eje Y de la gráfica representa la posición en el eje Y del centro de masa del disco; mientras que el eje X de la gráfica es ocupado por el tiempo.

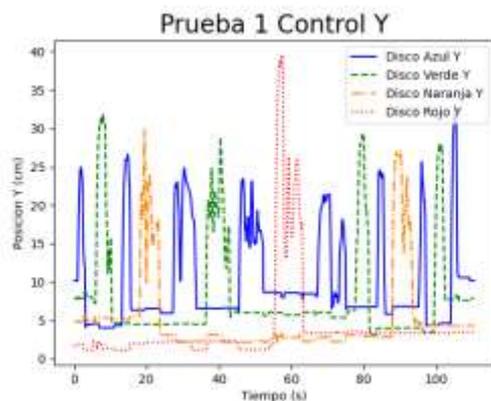


Figura 5.78 Prueba 1 Control en el eje Y

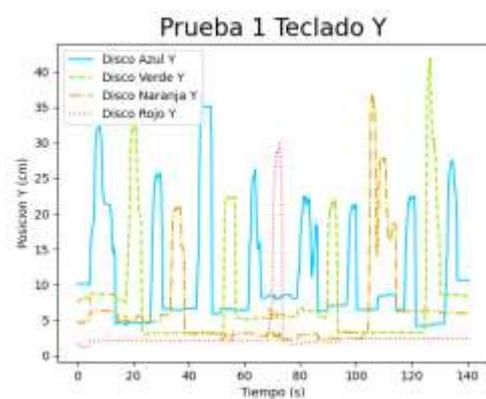


Figura 5.79 Prueba 1 Teclado en el eje Y

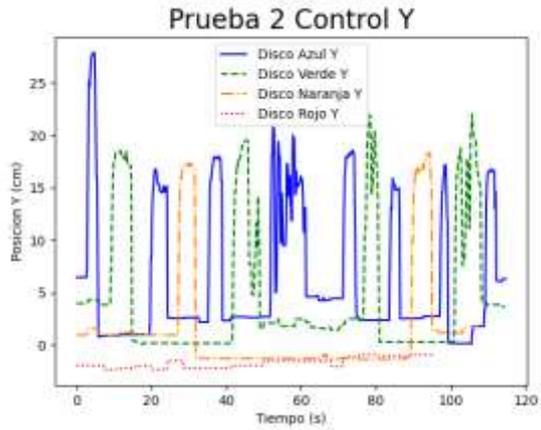


Figura 5.80 Prueba 2 Control en el eje Y

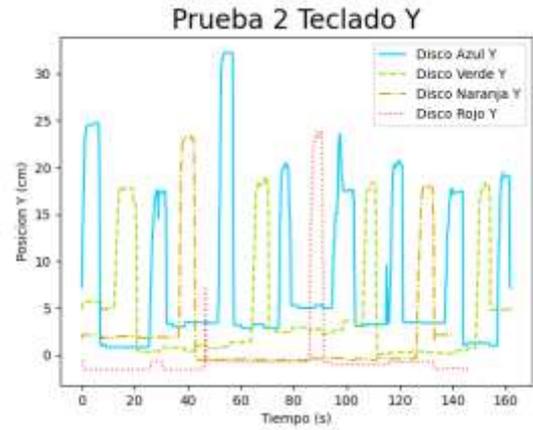


Figura 5.81 Prueba 2 Teclado en el eje Y

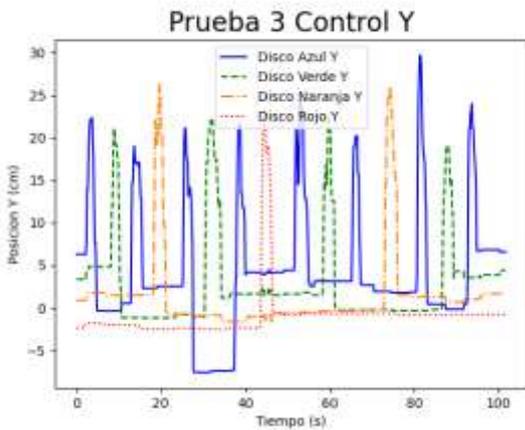


Figura 5.82 Prueba 3 Control en el eje Y

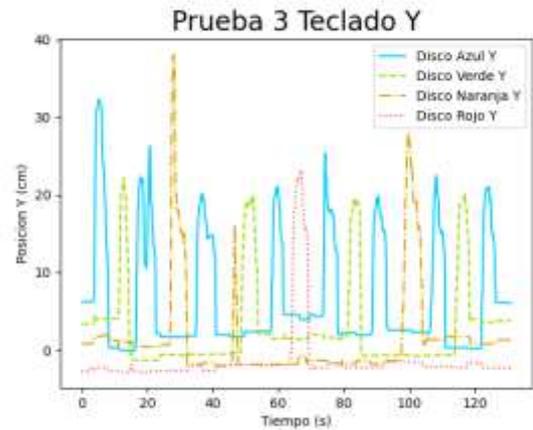


Figura 5.83 Prueba 3 Teclado en el eje Y

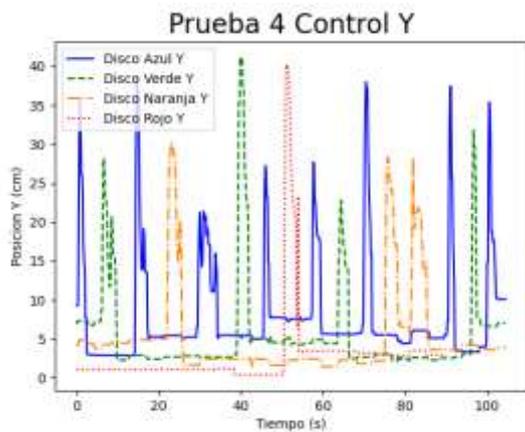


Figura 5.84 Prueba 4 Control en el eje Y

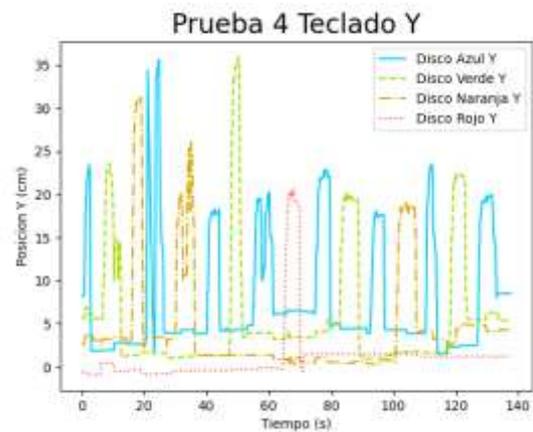


Figura 5.85 Prueba 4 Teclado en el eje Y

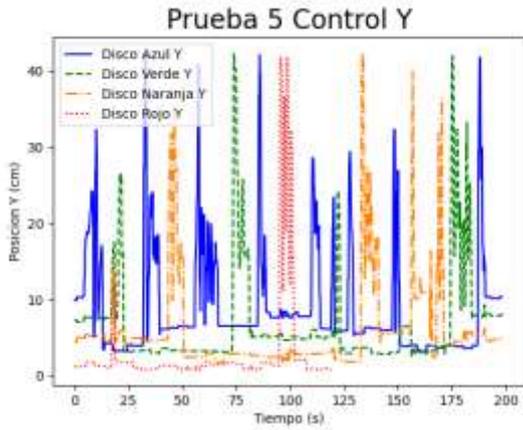


Figura 5.86 Prueba 5 Control en el eje Y

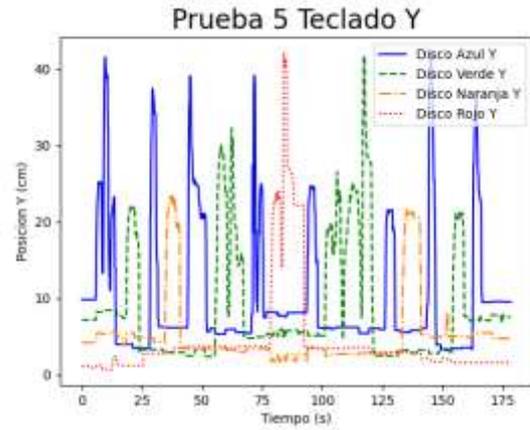


Figura 5.87 Prueba 5 Teclado en el eje Y

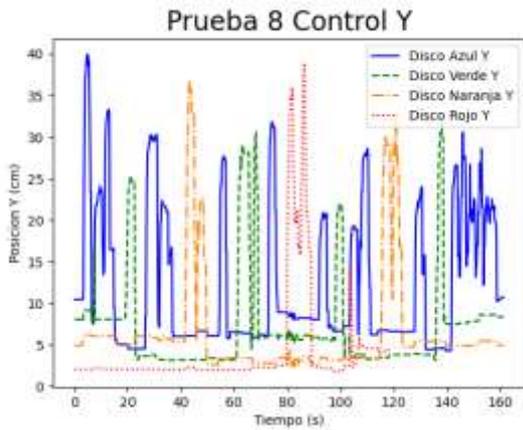


Figura 5.88 Prueba 8 Control en el eje Y

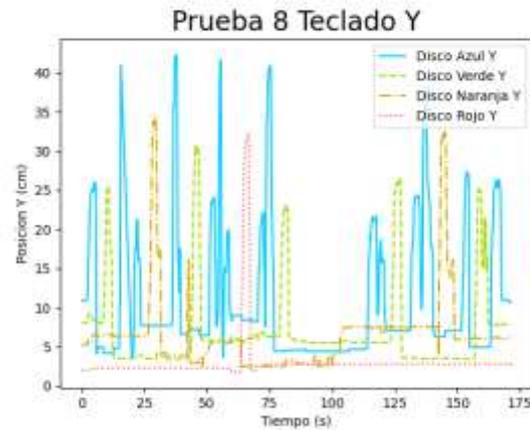


Figura 5.89 Prueba 8 Teclado en el eje Y

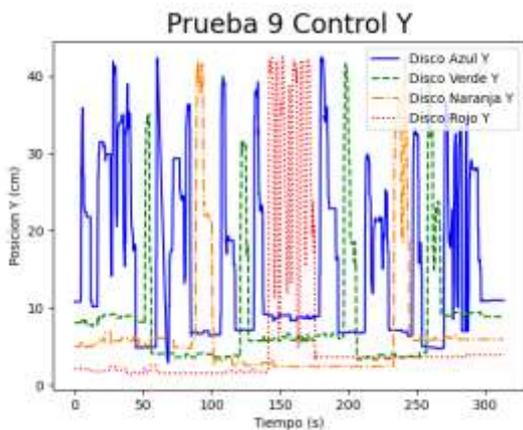


Figura 5.90 Prueba 9 Control en el eje Y

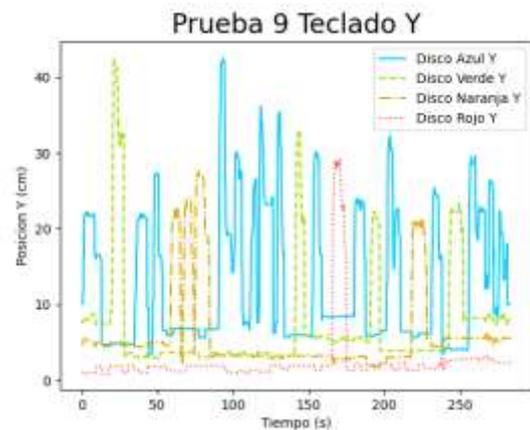


Figura 5.91 Prueba 9 Teclado en el eje Y

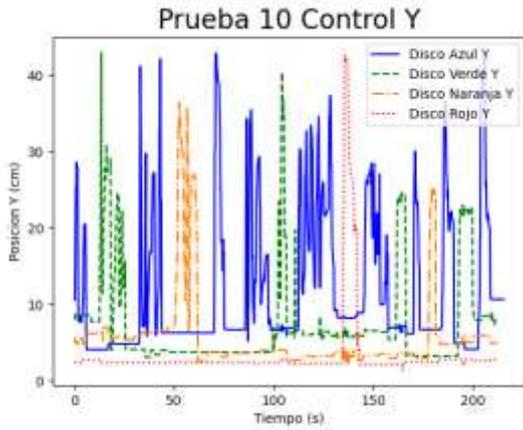


Figura 5.92 Prueba 10 Control en el eje Y

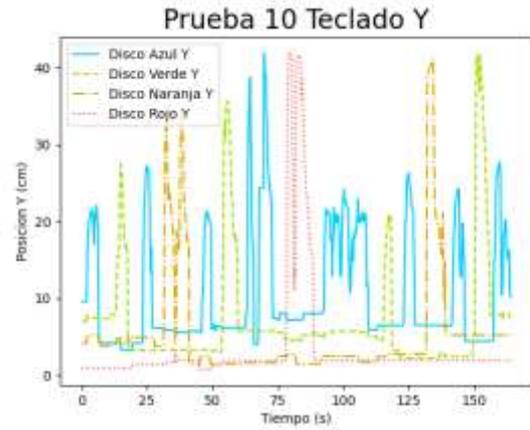


Figura 5.93 Prueba 10 Teclado en el eje Y

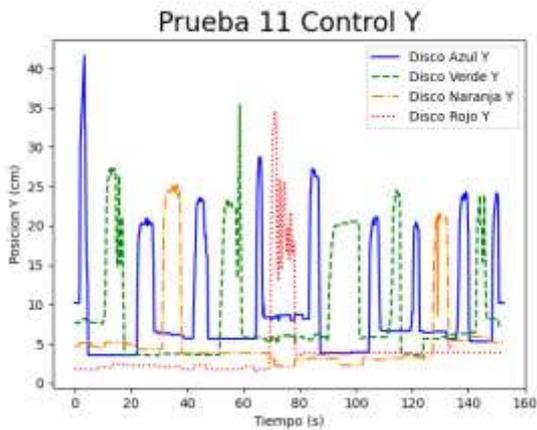


Figura 5.94 Prueba 11 Control en el eje Y

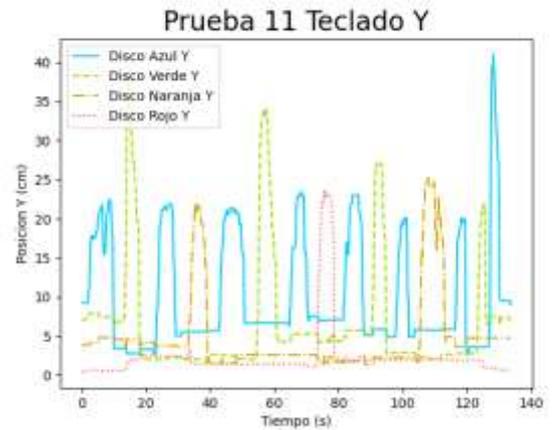


Figura 5.95 Prueba 11 Teclado en el eje Y

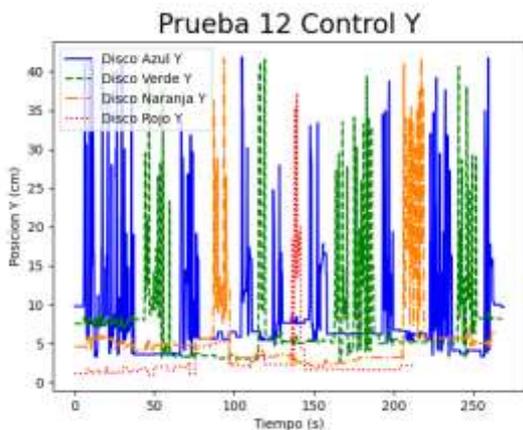


Figura 5.96 Prueba 12 Control en el eje Y

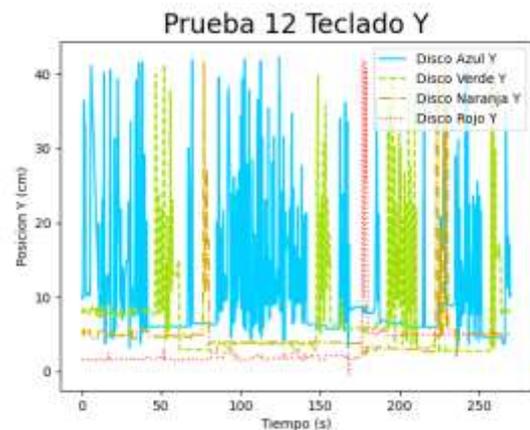


Figura 5.97 Prueba 12 Teclado en el eje Y

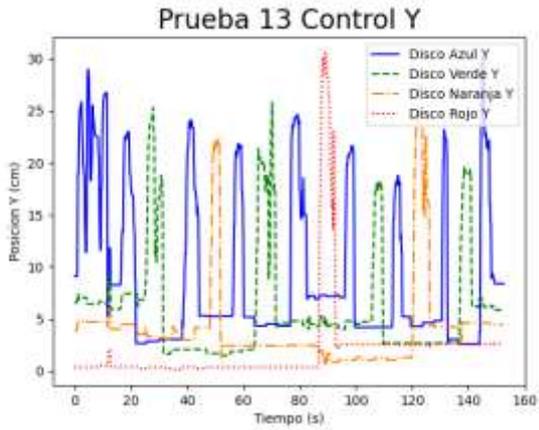


Figura 5.98 Prueba 13 Control en el eje Y

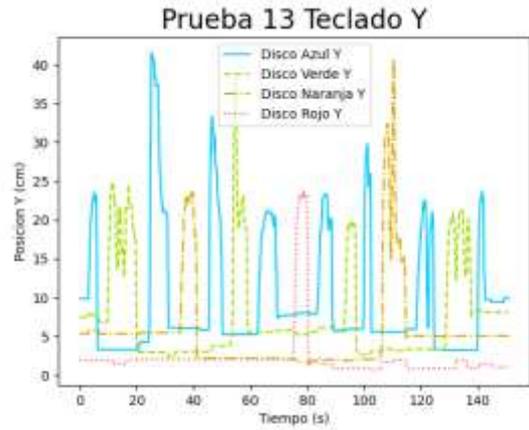


Figura 5.99 Prueba 13 Teclado en el eje Y

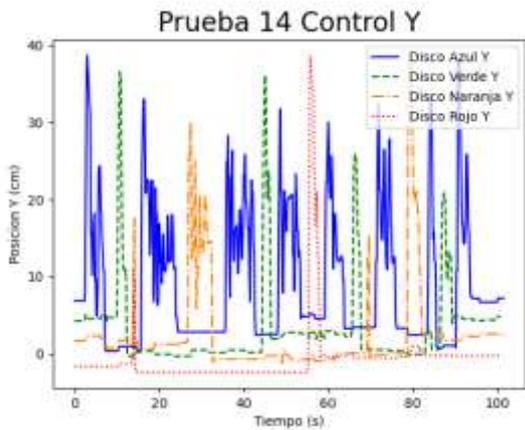


Figura 5.100 Prueba 14 Control en el eje Y

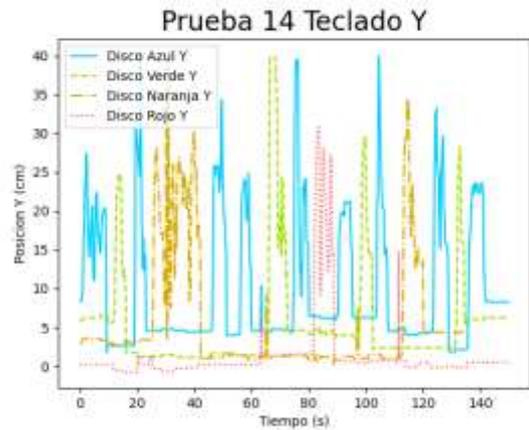


Figura 5.101 Prueba 14 Teclado en el eje Y

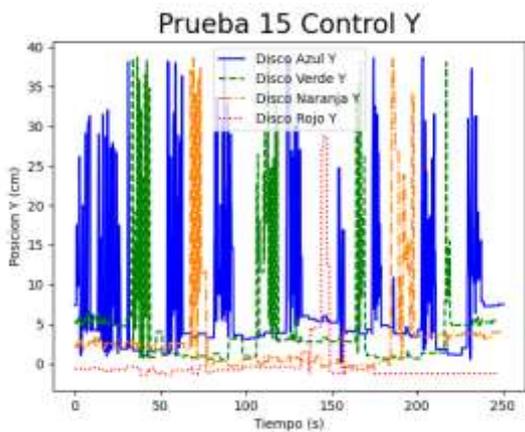


Figura 5.102 Prueba 15 Control en el eje Y

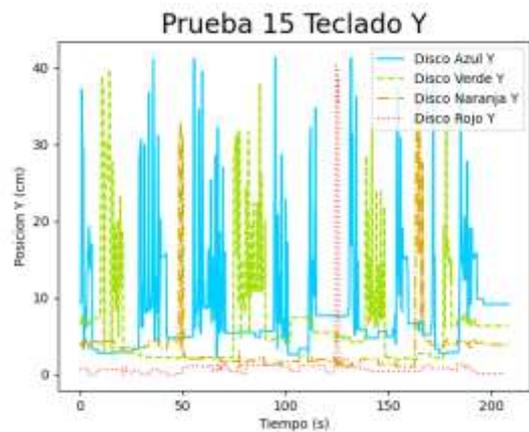


Figura 5.103 Prueba 15 Teclado en el eje Y

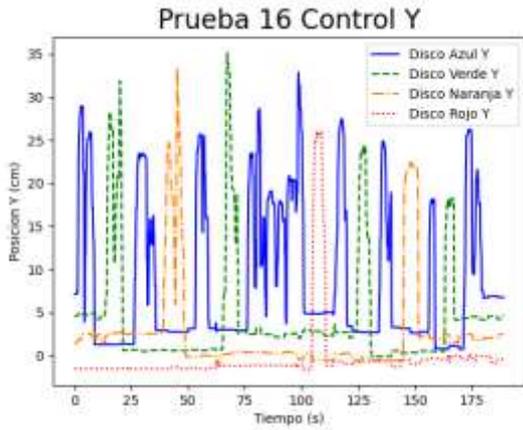


Figura 5.104 Prueba 16 Control en el eje Y

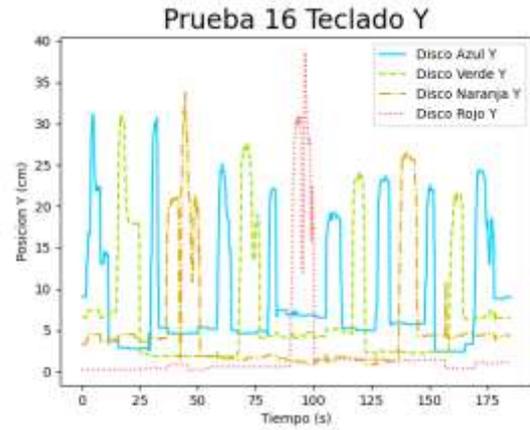


Figura 5.105 Prueba 16 Teclado en el eje Y

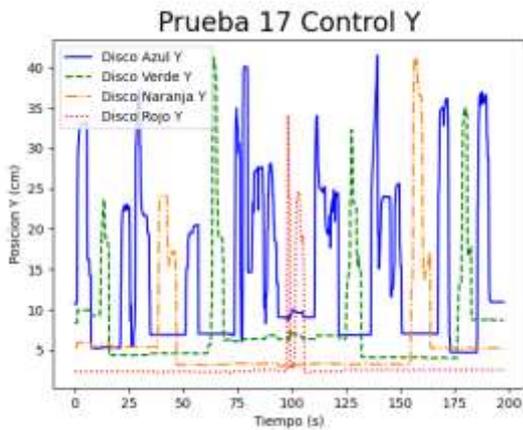


Figura 5.106 Prueba 17 Control en el eje Y

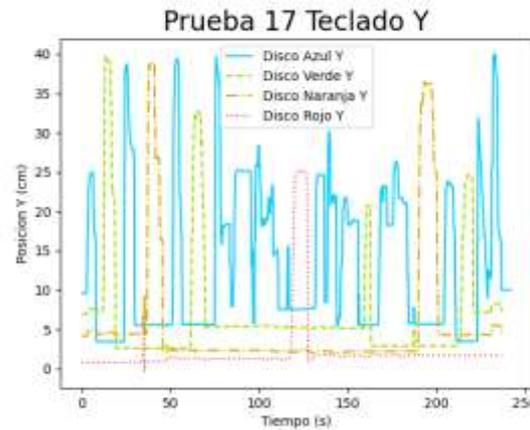


Figura 5.107 Prueba 17 Teclado en el eje Y

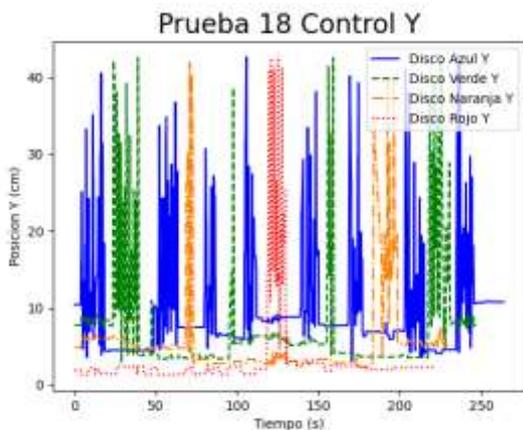


Figura 5.108 Prueba 18 Control en el eje Y

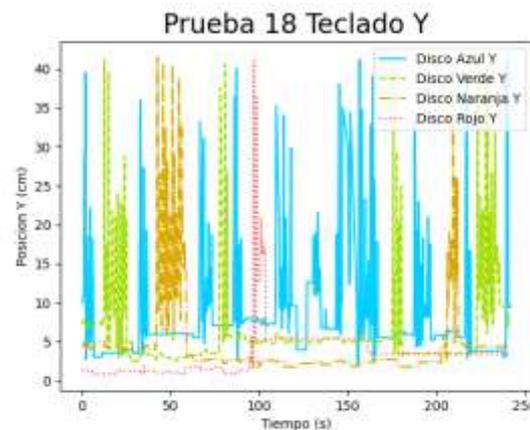


Figura 5.109 Prueba 18 Teclado en el eje Y

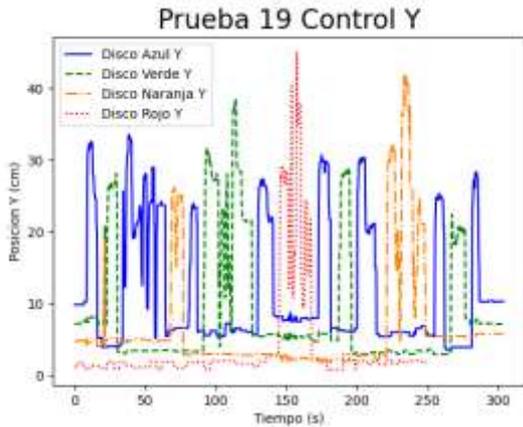


Figura 5.110 Prueba 19 Control en el eje Y

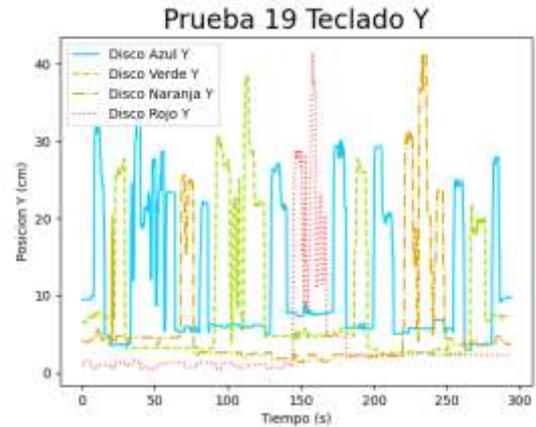


Figura 5.111 Prueba 19 Teclado en el eje Y

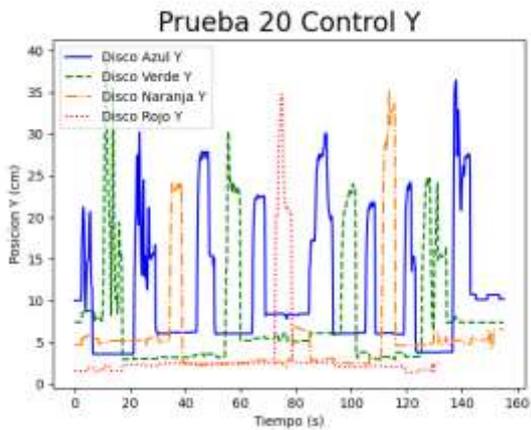


Figura 5.112 Prueba 20 Control en el eje Y

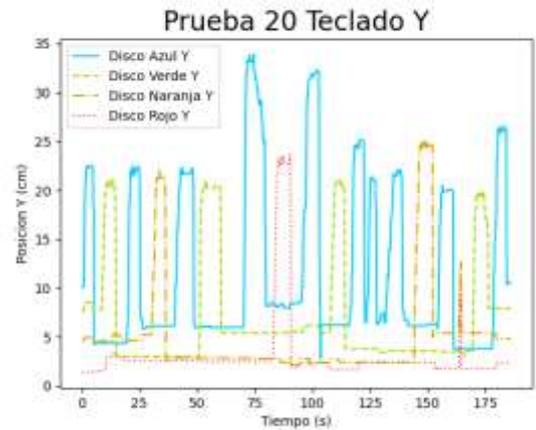


Figura 5.113 Prueba 20 Teclado en el eje Y

Las siguientes gráficas corresponden a las 5 pruebas presenciales que se realizaron, se presenta en un mismo renglón cada prueba con fines comparativos, la primera columna muestra la prueba con control, en la segunda columna la prueba del teclado, y en la tercera columna el control de gestos, LEAP.

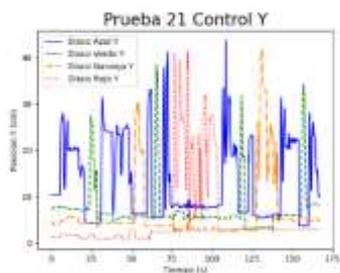


Figura 5.114 Prueba 21 Control en el eje Y

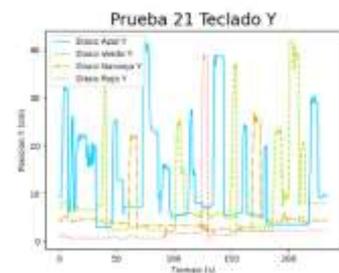


Figura 5.115 Prueba 21 Teclado en el eje Y

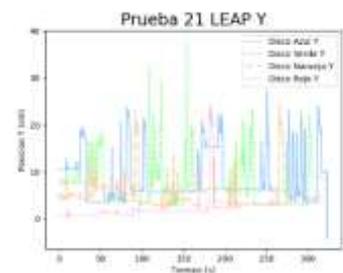


Figura 5.116 Prueba 21 LEAP en el eje Y

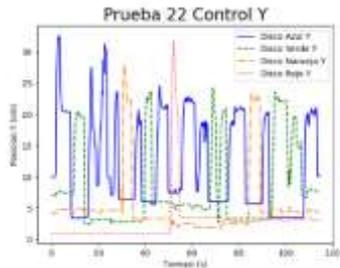


Figura 5.117 Prueba 22 Control en el eje Y

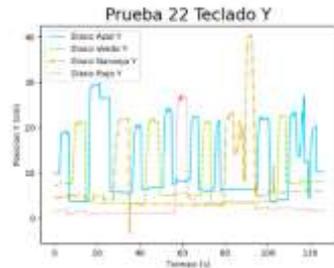


Figura 5.118 Prueba 22 Teclado en el eje Y

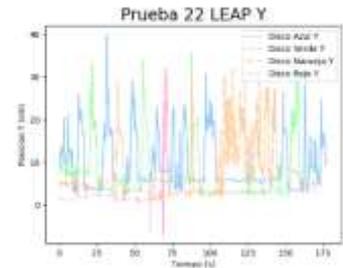


Figura 5.119 Prueba 22 LEAP en el eje Y

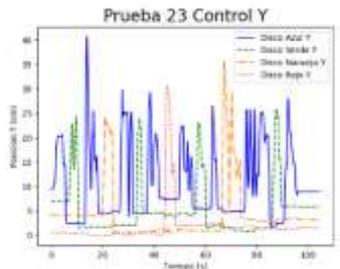


Figura 5.120 Prueba 23 Control en el eje Y

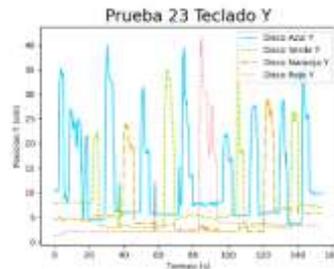


Figura 5.121 Prueba 23 Teclado en el eje Y

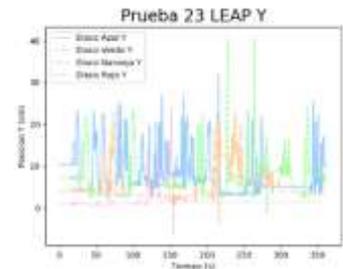


Figura 5.122 Prueba 23 LEAP en el eje Y

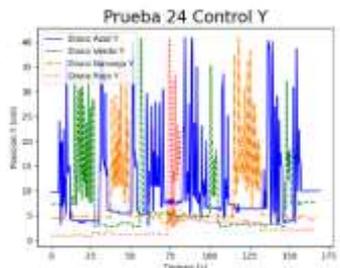


Figura 5.123 Prueba 24 Control en el eje Y

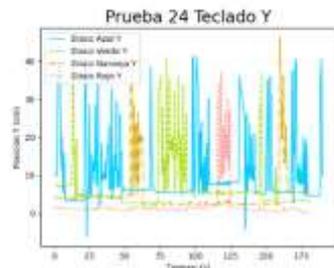


Figura 5.124 Prueba 24 Teclado en el eje Y

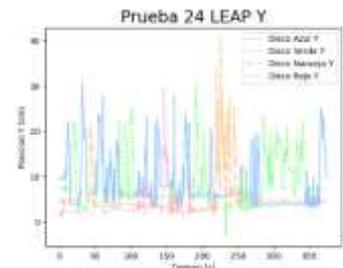


Figura 5.125 Prueba 24 LEAP en el eje Y

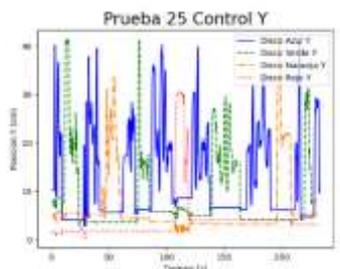


Figura 5.126 Prueba 25 Control en el eje Y

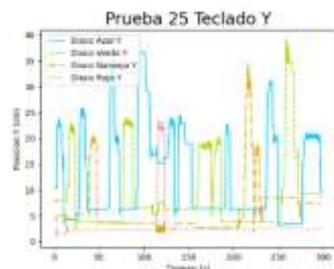


Figura 5.127 Prueba 25 Teclado en el eje Y

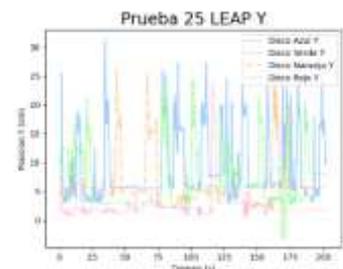


Figura 5.128 Prueba 25 LEAP en el eje Y

5.2.6 Comparativa de Posición en X vs Y de cada controlador

Finalmente, se presentan las gráficas de X vs Y de cada controlador, en estas, se puede apreciar el recorrido de los discos durante toda la prueba, pudiendo apreciar su trazo/comportamiento en una sola imagen.

En algunas pruebas se puede apreciar que no hubo tanta variación en los movimientos entre los controladores, en algunas que existió gran diferencia entre los mismos.

Las siguientes gráficas corresponden a las 18 pruebas presenciales que se analizaron, se presenta en un mismo renglón cada prueba con fines comparativos, en la primera columna se encuentra la prueba con control y en la segunda columna la prueba del teclado.

El eje *Y* en la gráfica corresponde a la posición en *Y* de los discos, el eje *X* en la gráfica corresponde a la posición en *X* de los discos.

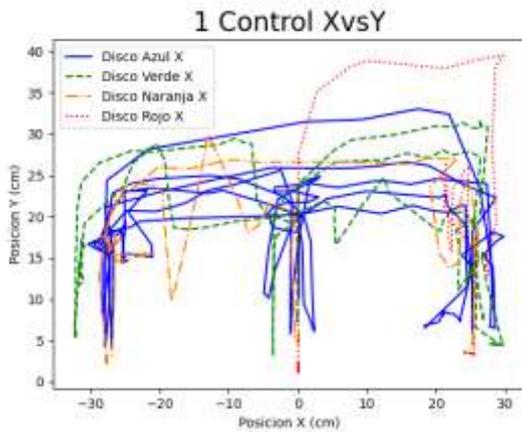


Figura 5.129 Prueba 1 Control en XvsY

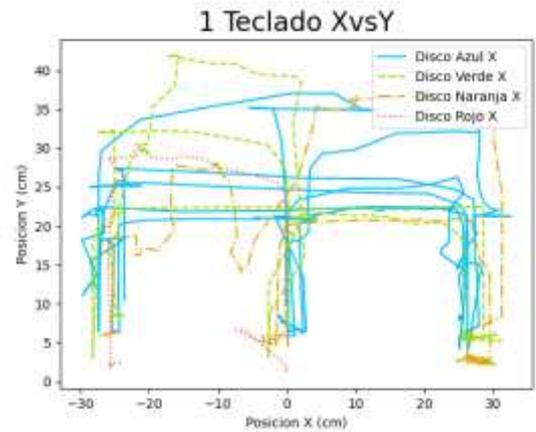


Figura 5.130 Prueba 1 Teclado en XvsY

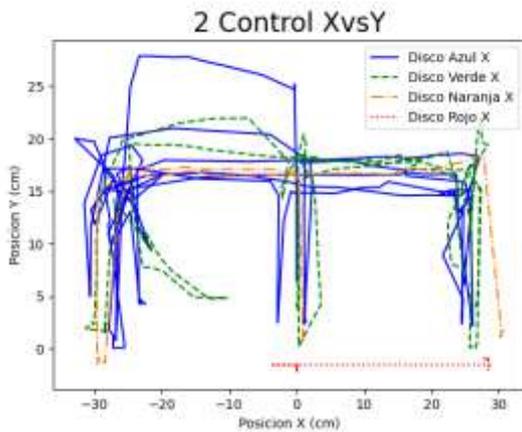


Figura 5.131 Prueba 2 Control en XvsY

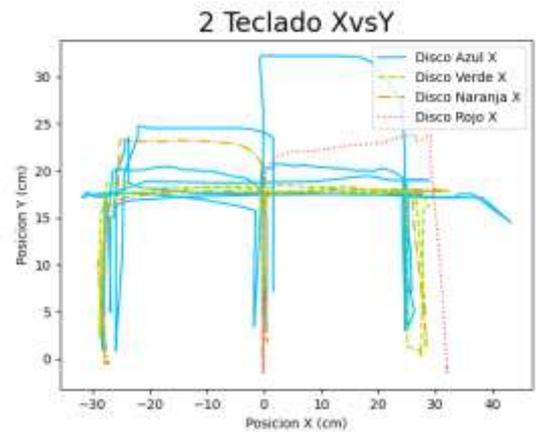


Figura 5.132 Prueba 2 Teclado en XvsY

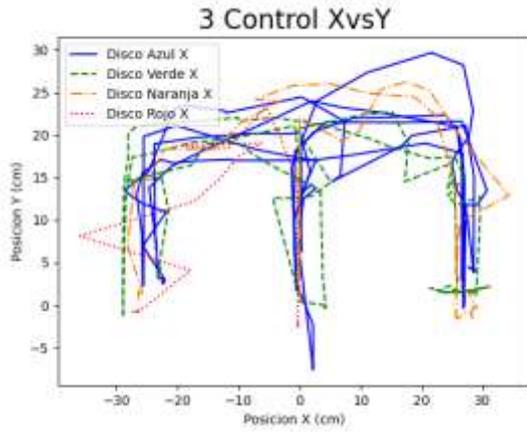


Figura 5.133 Prueba 3 Control en XvsY

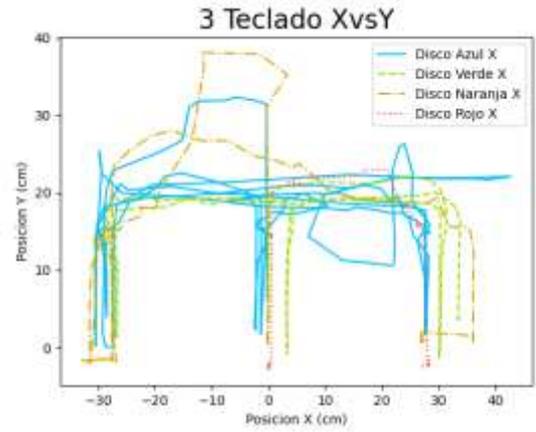


Figura 5.134 Prueba 3 Teclado en XvsY

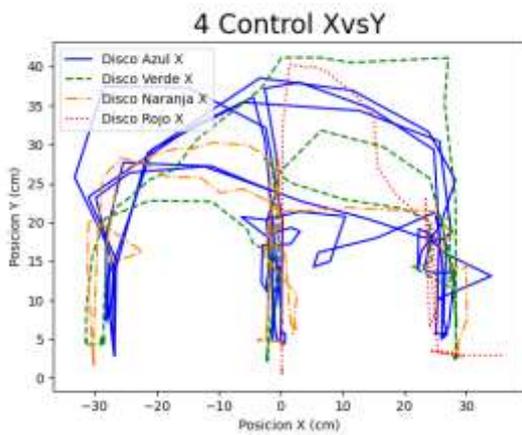


Figura 5.135 Prueba 4 Control en XvsY

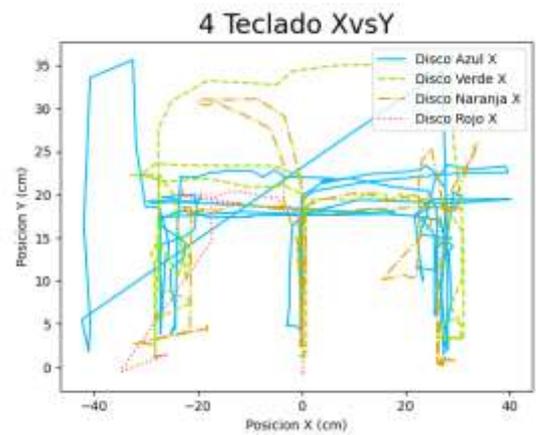


Figura 5.136 Prueba 4 Teclado en XvsY

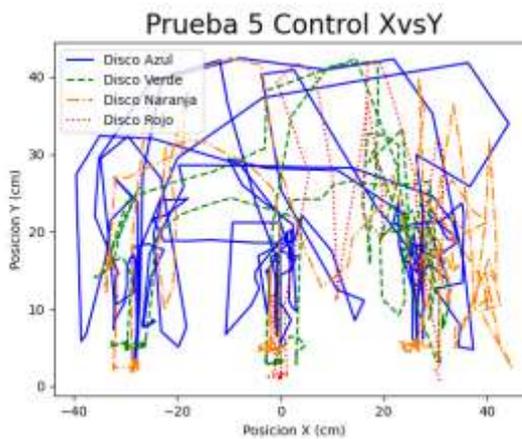


Figura 5.137 Prueba 5 Control en XvsY

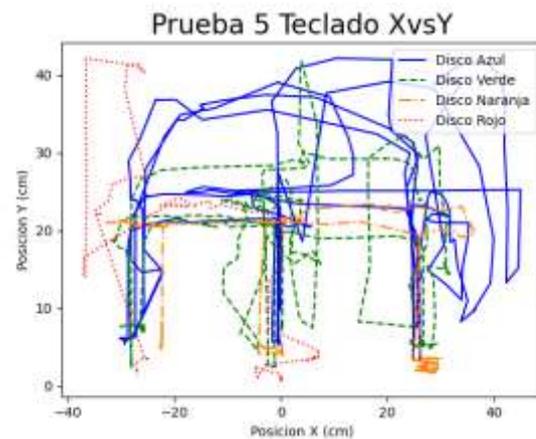


Figura 5.138 Prueba 5 Teclado en XvsY

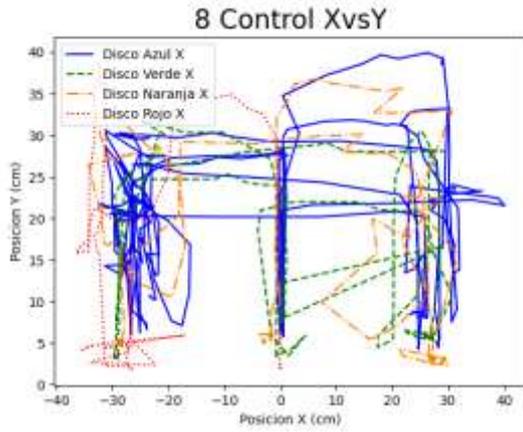


Figura 5.139 Prueba 8 Control en XvsY

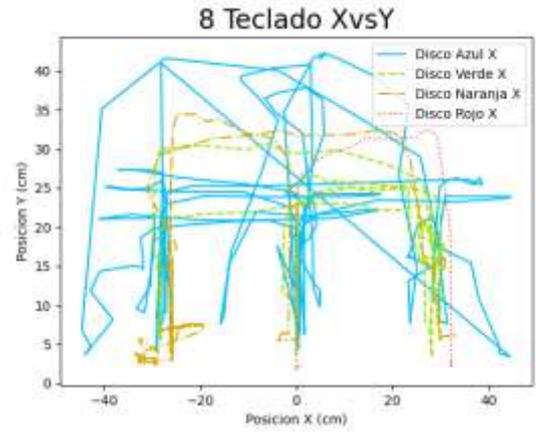


Figura 5.140 Prueba 8 Teclado en XvsY

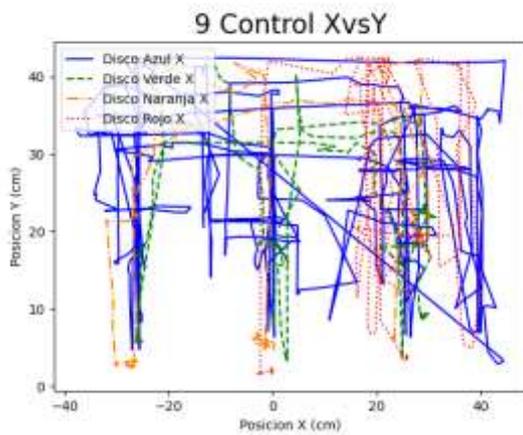


Figura 5.141 Prueba 9 Control en XvsY

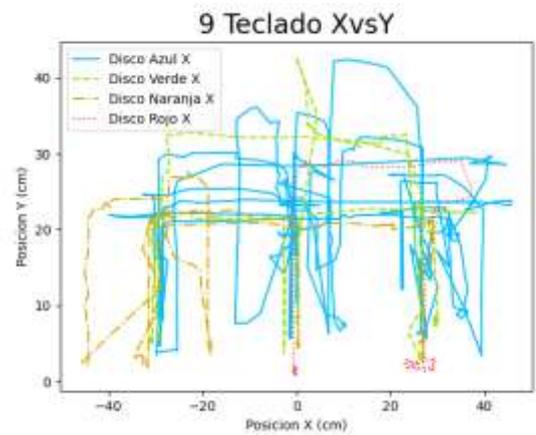


Figura 5.142 Prueba 9 Teclado en XvsY

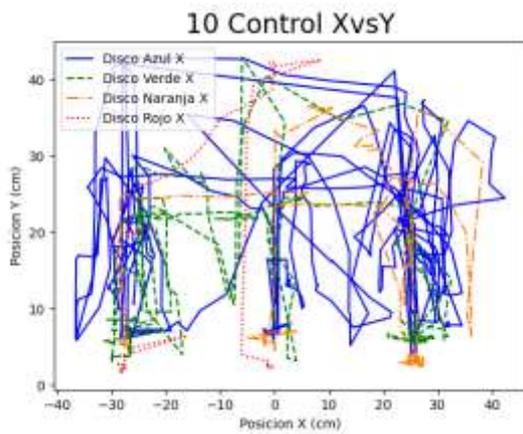


Figura 5.143 Prueba 10 Control en XvsY

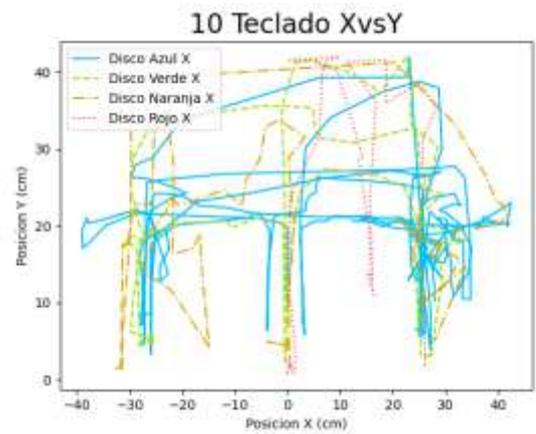


Figura 5.144 Prueba 10 Teclado en XvsY

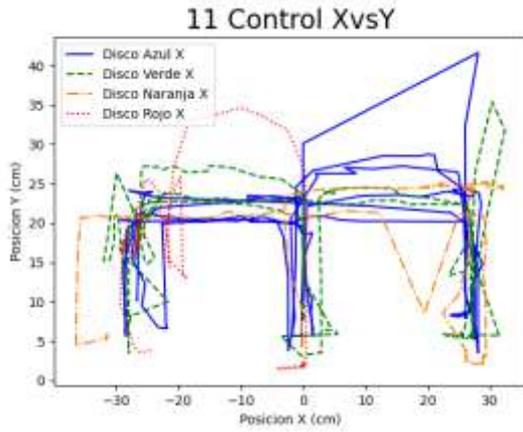


Figura 5.145 Prueba 11 Control en XvsY

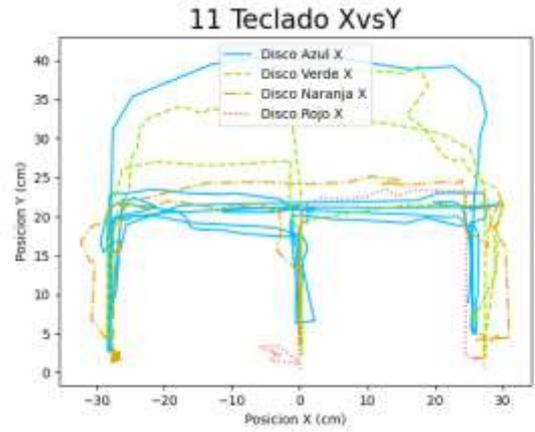


Figura 5.146 Prueba 11 Teclado en XvsY

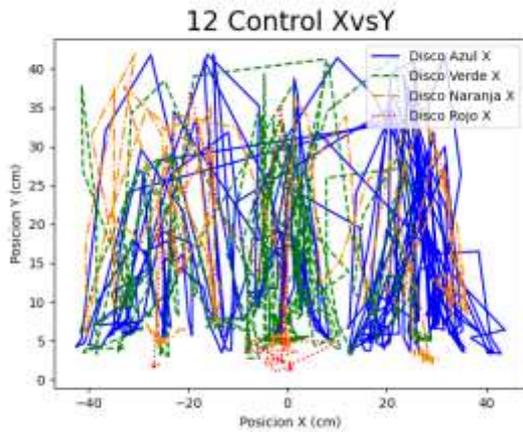


Figura 5.147 Prueba 12 Control en XvsY

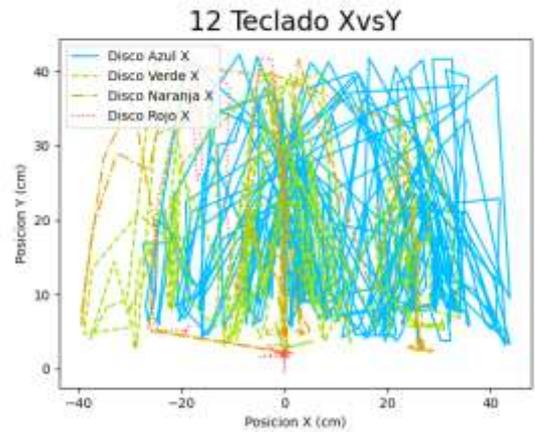


Figura 5.148 Prueba 12 Teclado en XvsY

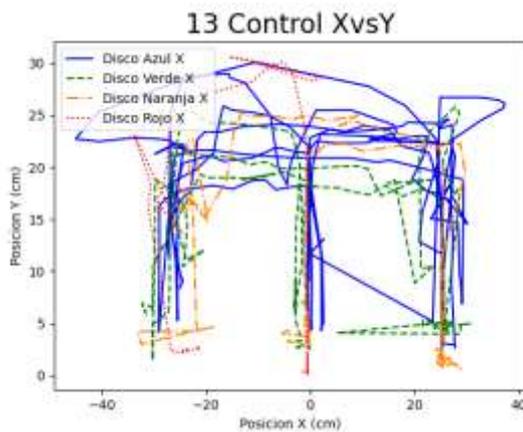


Figura 5.149 Prueba 13 Control en XvsY

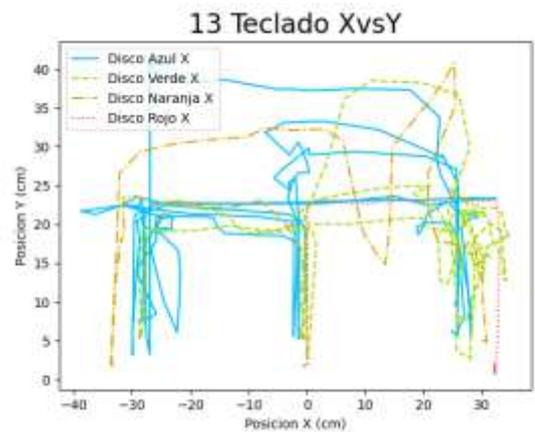


Figura 5.150 Prueba 13 Teclado en XvsY

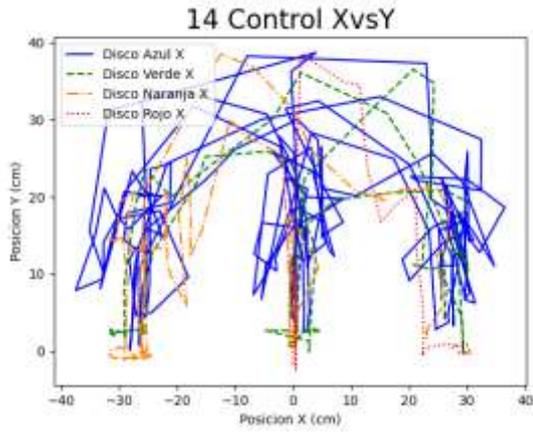


Figura 5.151 Prueba 14 Control en XvsY

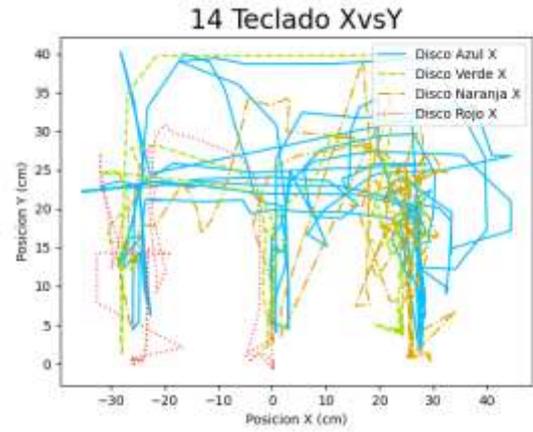


Figura 5.152 Prueba 14 Teclado en XvsY

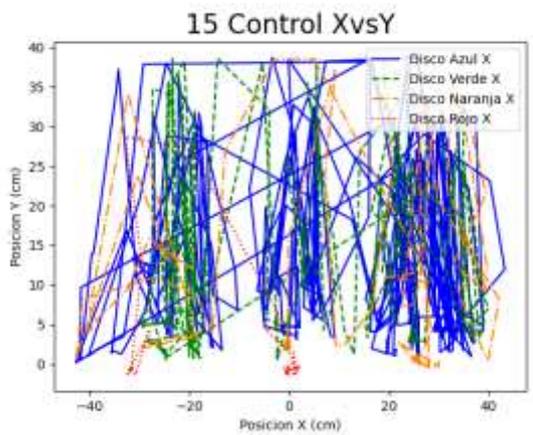


Figura 5.153 Prueba 15 Control en XvsY

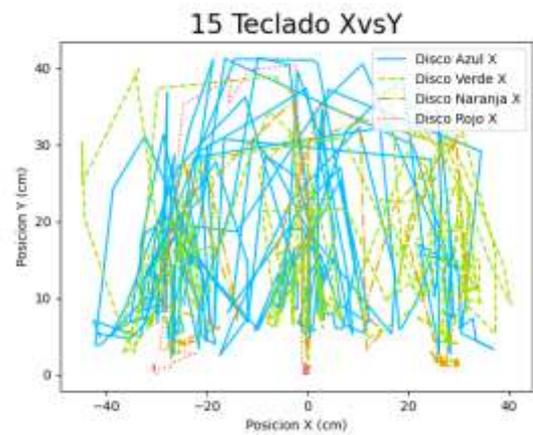


Figura 5.154 Prueba 15 Teclado en XvsY

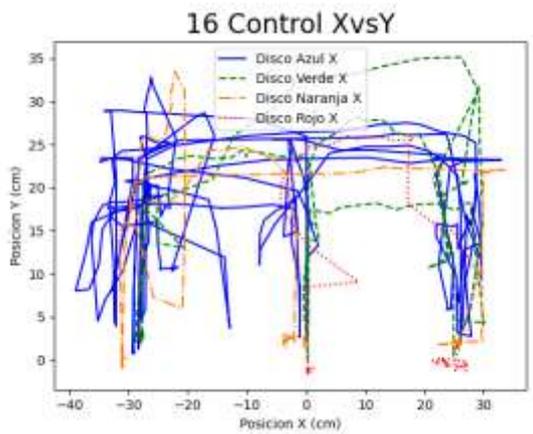


Figura 5.155 Prueba 16 Control en XvsY

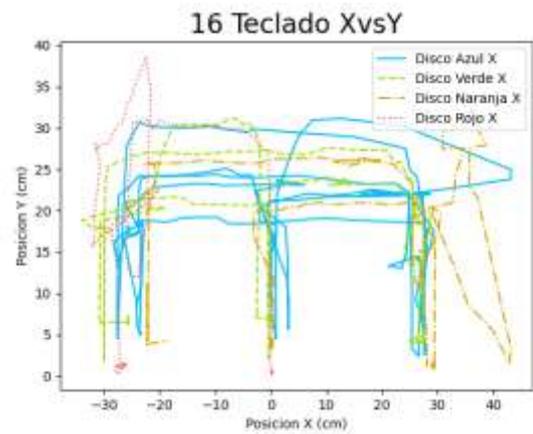


Figura 5.156 Prueba 16 Teclado en XvsY

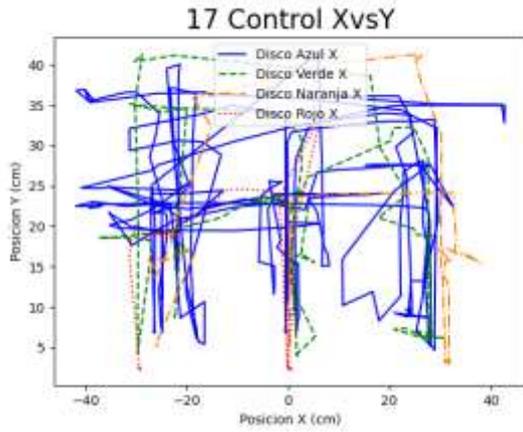


Figura 5.157 Prueba 17 Control en XvsY

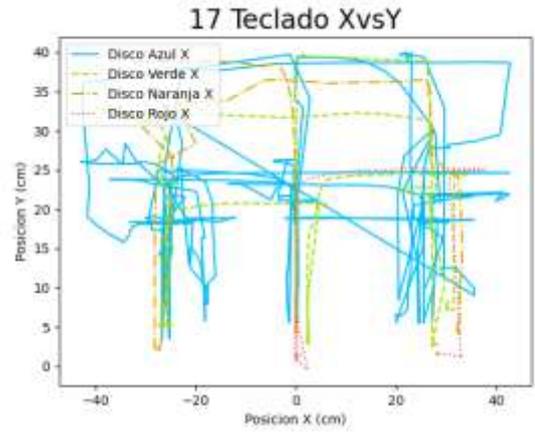


Figura 5.158 Prueba 17 Teclado en XvsY

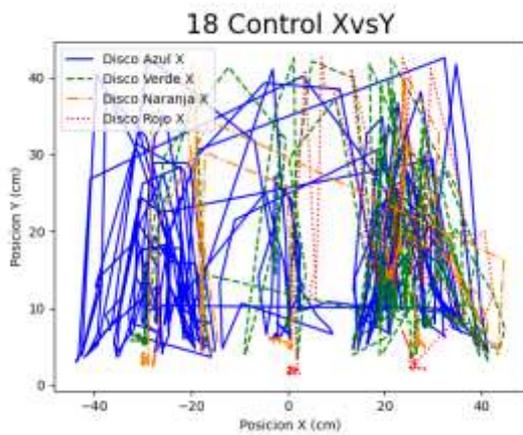


Figura 5.159 Prueba 18 Control en XvsY

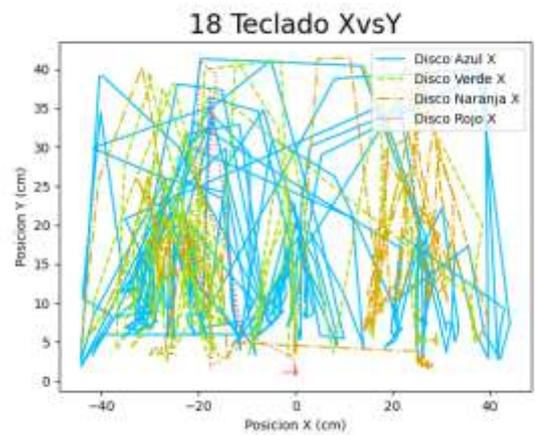


Figura 5.160 Prueba 18 Teclado en XvsY

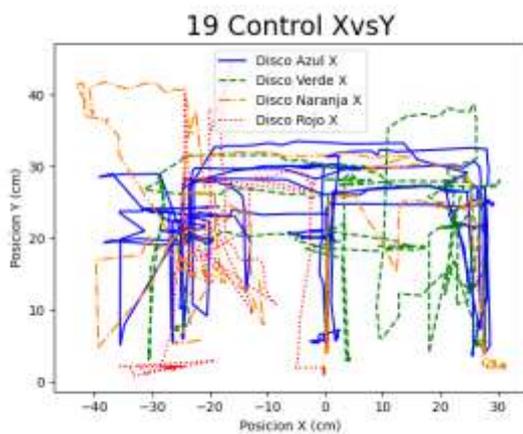


Figura 5.161 Prueba 19 Control en XvsY

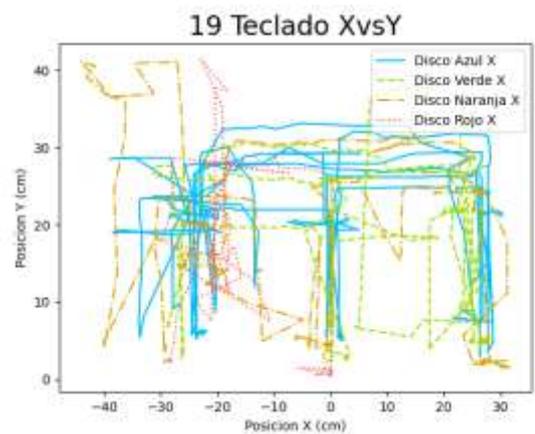


Figura 5.162 Prueba 19 Teclado en XvsY

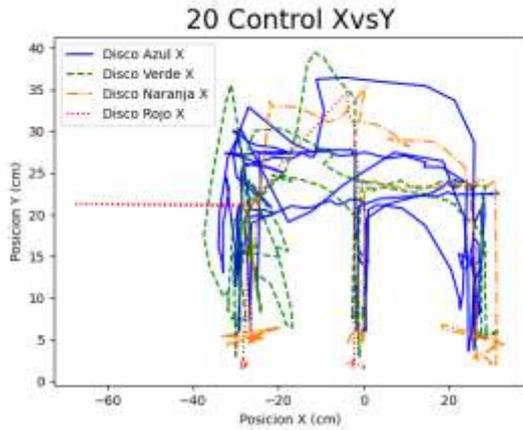


Figura 5.163 Prueba 20 Control en XvsY

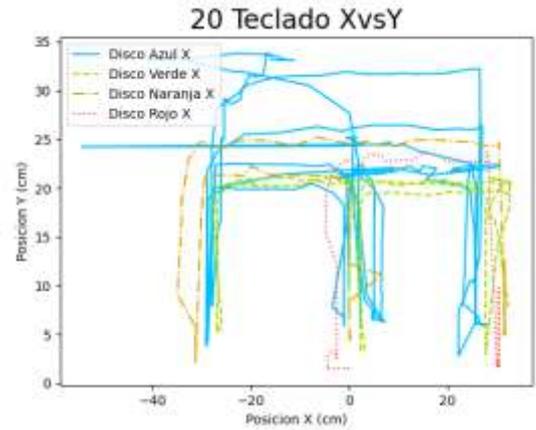


Figura 5.164 Prueba 20 Teclado en XvsY

Las siguientes gráficas corresponden a las 5 pruebas presenciales que se realizaron, se presentan en un mismo renglón cada prueba con fines comparativos, la primera columna se encuentra la prueba con control, la segunda columna la prueba del teclado, y la tercera columna se encuentra el control de gestos, LEAP.

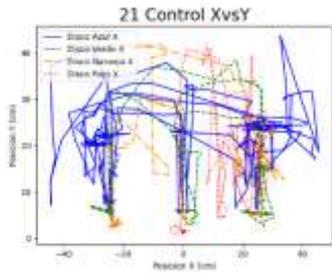


Figura 5.165 Prueba 21 Control en XvsY

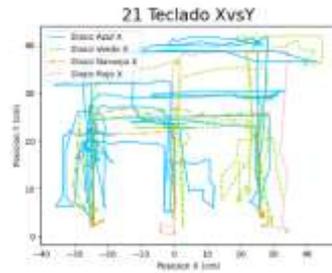


Figura 5.166 Prueba 21 Teclado en XvsY

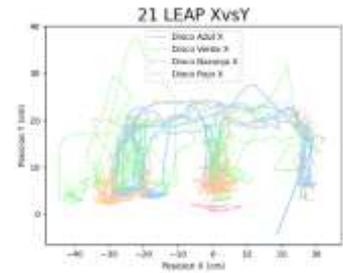


Figura 5.167 Prueba 21 LEAP en XvsY

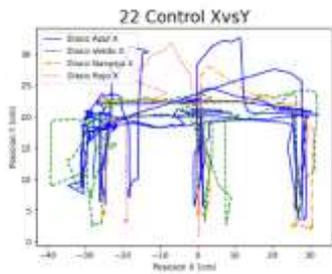


Figura 5.168 Prueba 22 Control en XvsY

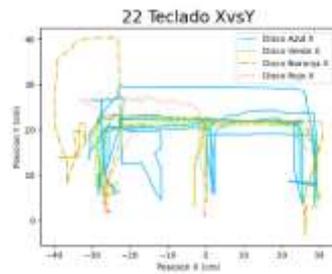


Figura 5.169 Prueba 22 Teclado en XvsY

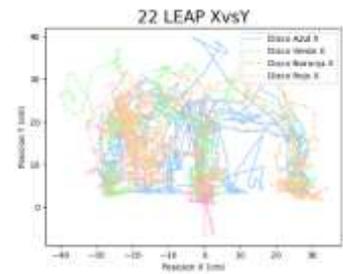


Figura 5.170 Prueba 22 LEAP en XvsY

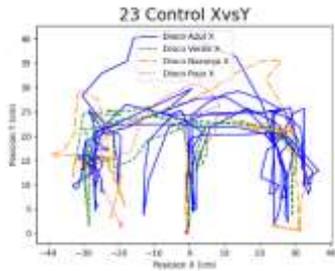


Figura 5.171 Prueba 23 Control en XvsY

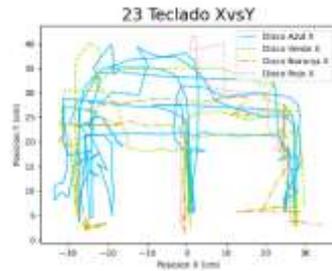


Figura 5.172 Prueba 23 Teclado en XvsY

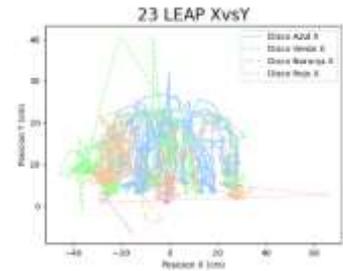


Figura 5.173 Prueba 23 Control en XvsY

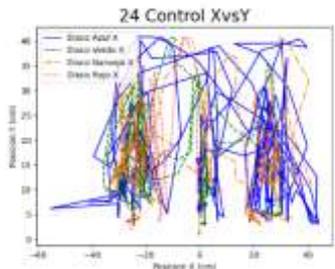


Figura 5.174 Prueba 24 Control en XvsY

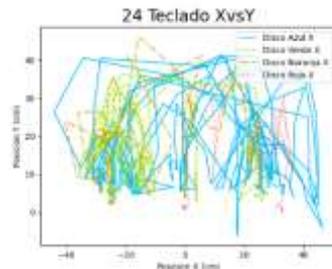


Figura 5.175 Prueba 24 Teclado en XvsY

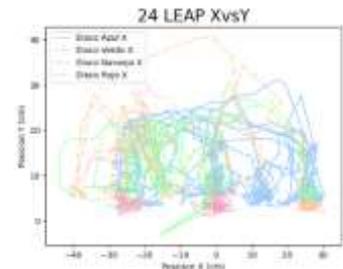


Figura 5.176 Prueba 24 Control en XvsY

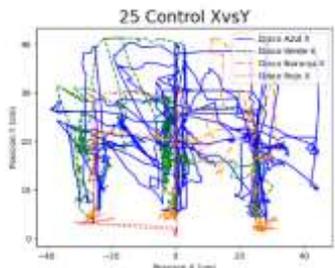


Figura 5.177 Prueba 25 Control en XvsY

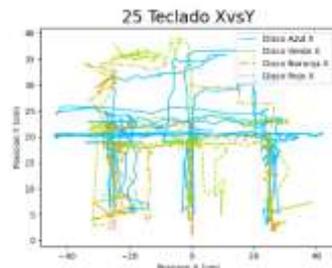


Figura 5.178 Prueba 25 Teclado en XvsY

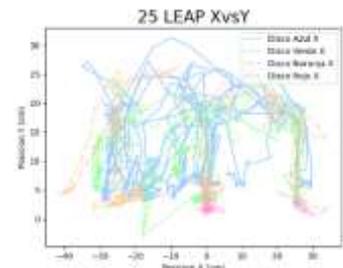


Figura 5.179 Prueba 25 Control en XvsY

5.3 Análisis de Resultados

Una vez que se han presentado los resultados de manera gráfica, es necesario analizarlos gráfica, estadística y analíticamente, generando los parámetros y conclusiones.

5.3.1 Tiempo Total efectivo o Curva de Aprendizaje

Teniendo la información de las diferencias de tiempo, se puede obtener una curva de aprendizaje, siendo ésta definida como el tiempo acumulado que se ocupó para mover los discos a lo largo de la prueba. Siendo el valor final de la gráfica el tiempo total efectivo de la prueba.

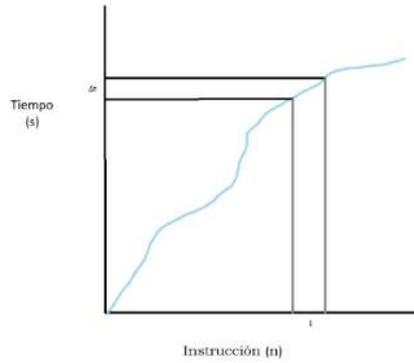


Figura 5.180 Curva de Aprendizaje

Las siguientes gráficas corresponden a las deltas de tiempo de las 19 pruebas a distancia que se analizaron, cada gráfica contiene la información del Teclado y el Control de cada prueba. El eje Y de la gráfica corresponderá al número de instrucción y el eje X corresponderá al tiempo de cada instrucción.

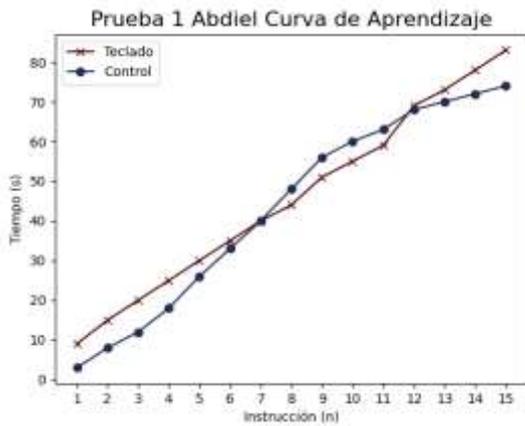


Figura 5.181 Prueba 1 Curva de Aprendizaje

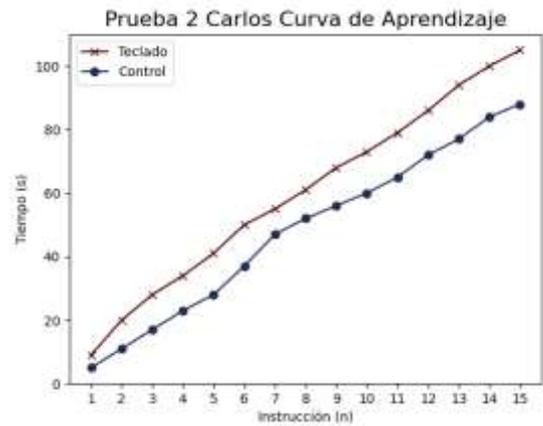


Figura 5.182 Prueba 2 Curva de Aprendizaje

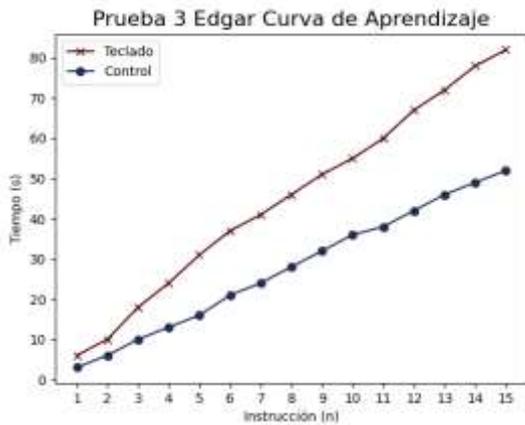


Figura 5.183 Prueba 3 Curva de Aprendizaje

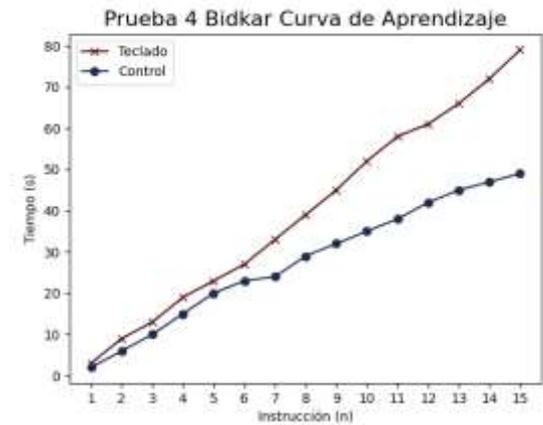


Figura 5.184 Prueba 4 Curva de Aprendizaje

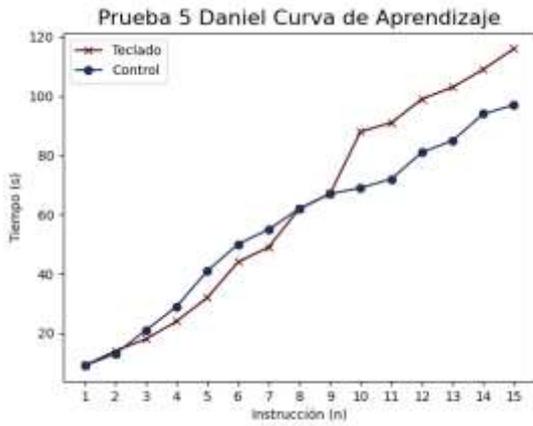


Figura 5.185 Prueba 5 Curva de Aprendizaje

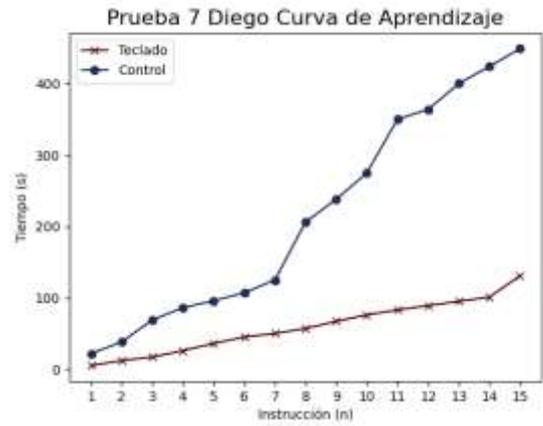


Figura 5.186 Prueba 7 Curva de Aprendizaje

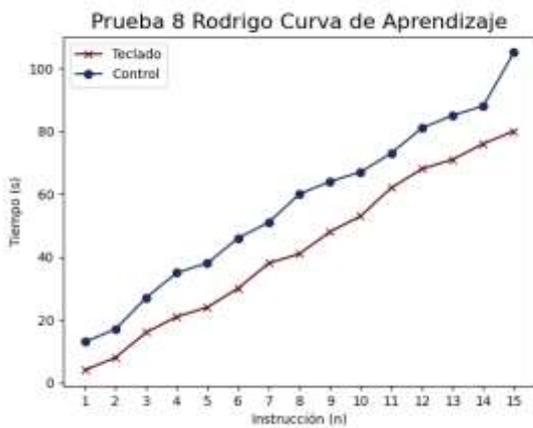


Figura 5.187 Prueba 8 Curva de Aprendizaje

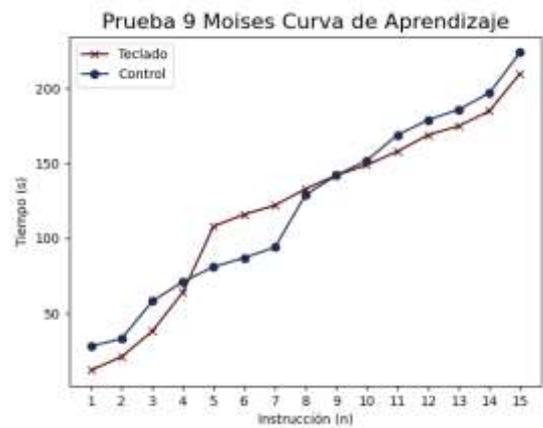


Figura 5.188 Prueba 9 Curva de Aprendizaje

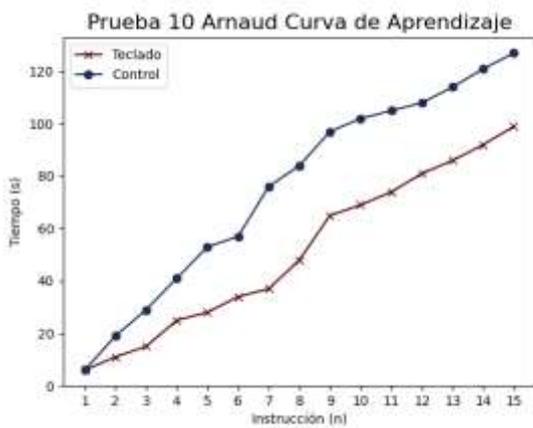


Figura 5.189 Prueba 10 Curva de Aprendizaje

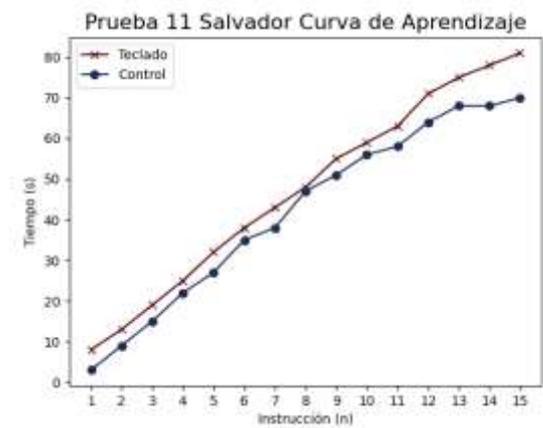


Figura 5.190 Prueba 11 Curva de Aprendizaje

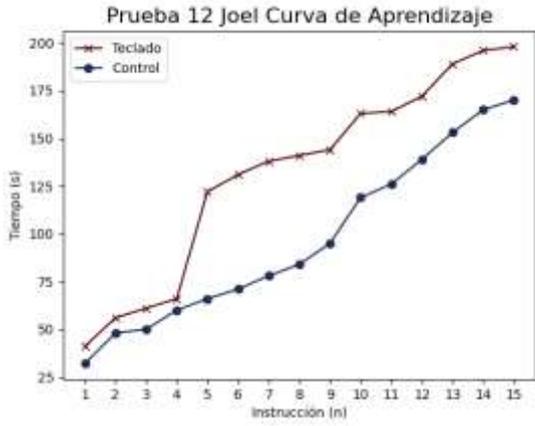


Figura 5.191 Prueba 12 Curva de Aprendizaje

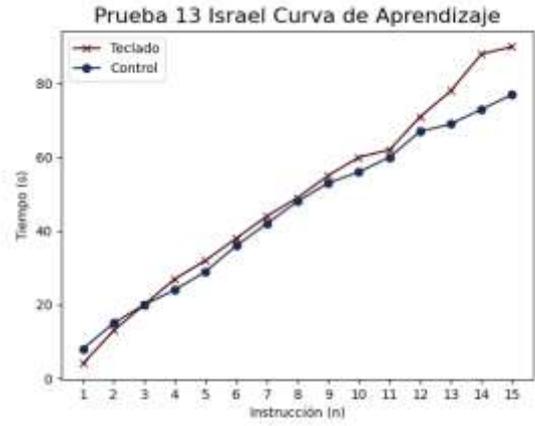


Figura 5.192 Prueba 13 Curva de Aprendizaje

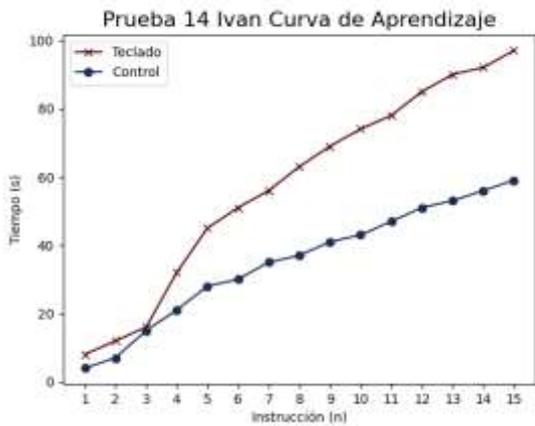


Figura 5.193 Prueba 14 Curva de Aprendizaje

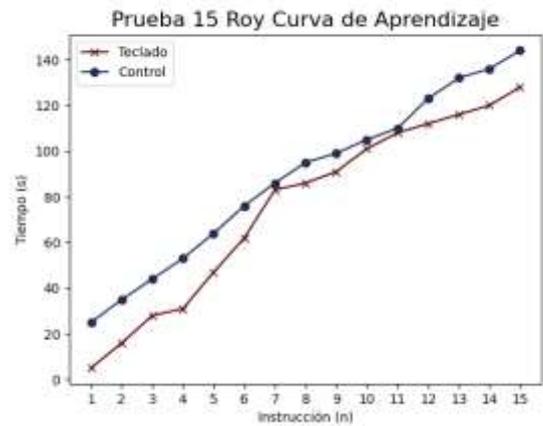


Figura 5.194 Prueba 15 Curva de Aprendizaje

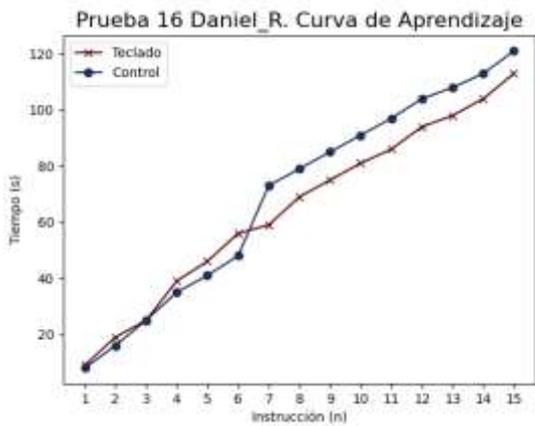


Figura 5.195 Prueba 16 Curva de Aprendizaje

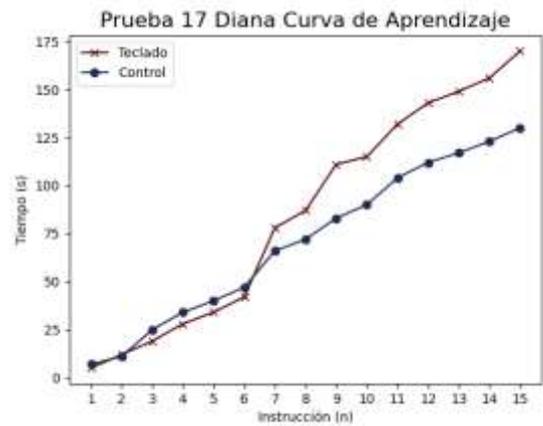


Figura 5.196 Prueba 17 Curva de Aprendizaje

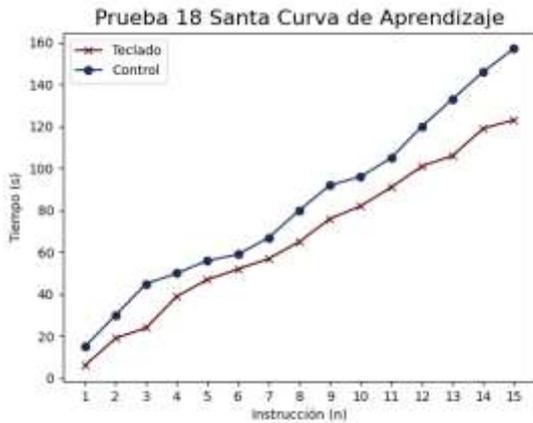


Figura 5.197 Prueba 18 Curva de Aprendizaje



Figura 5.198 Prueba 19 Curva de Aprendizaje

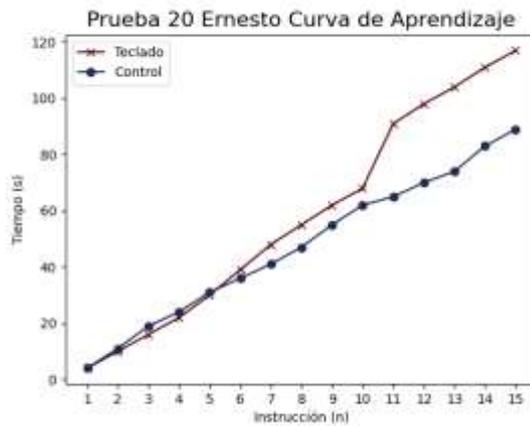


Figura 5.199 Prueba 20 Curva de Aprendizaje

Las siguientes gráficas corresponde a las curvas de aprendizaje de las 5 pruebas presenciales que se realizaron. Cada gráfica tiene las curvas de aprendizaje de los distintos controladores de la prueba.

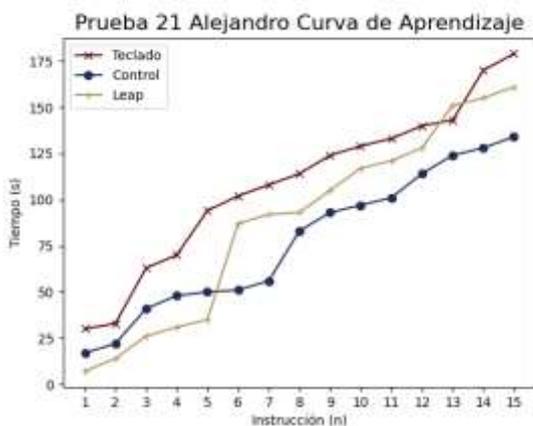


Figura 5.200 Prueba 21 Curva de Aprendizaje

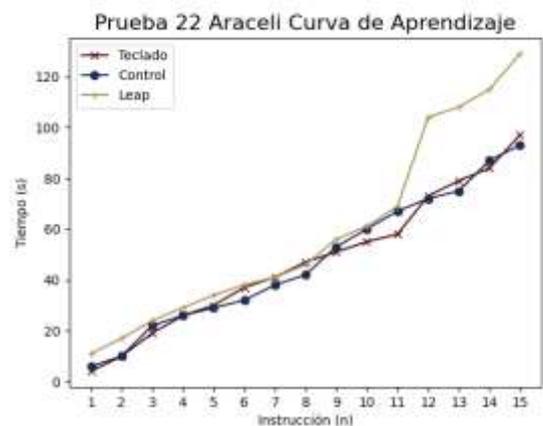


Figura 5.201 Prueba 22 Curva de Aprendizaje

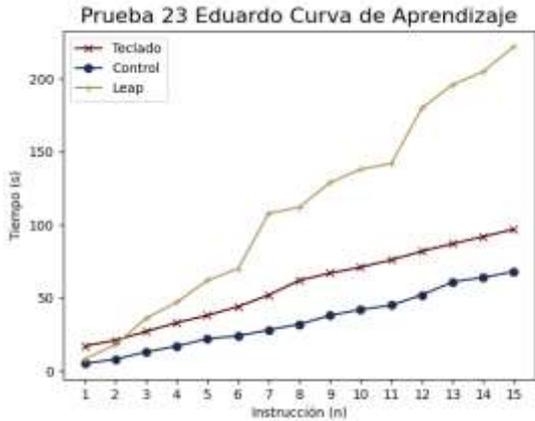


Figura 5.202 Prueba 23 Curva de Aprendizaje

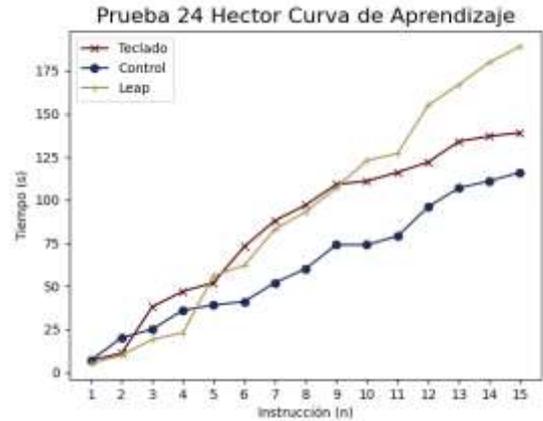


Figura 5.203 Prueba 24 Curva de Aprendizaje

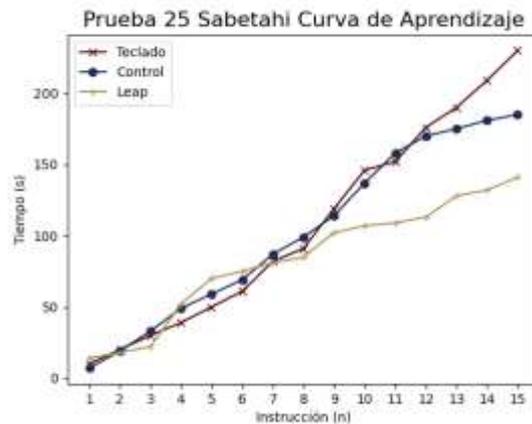


Figura 5.204 Prueba 25 Curva de Aprendizaje

El controlador que tiene la menor curva de aprendizaje se considera la mejor opción para resolver la prueba usando este criterio.

5.3.2 Ancho de Banda

De las gráficas de X vs Tiempo se observó que el movimiento de los discos sobre el eje X al desplazarlos de una posición a otra se comportaba de manera oscilatoria, es decir, iban de izquierda a derecha del poste al que eran movidos según el controlador que se estaba utilizando. Tomando esto en cuenta se midió el ancho de aquella oscilación para el disco que presentaba más movimientos, el disco azul, y se graficó para observar la tendencia de este a lo largo de la prueba en los distintos controladores.

Las siguientes gráficas corresponden a las deltas de tiempo de las 19 pruebas a distancia que se analizaron, cada gráfica contiene la información del Teclado y el Control de cada prueba. En el eje Y de la gráfica se aprecia el ancho de banda en centímetros (cm), y en el eje X se aprecia el número de movimiento en el que sucedió el ancho de banda.

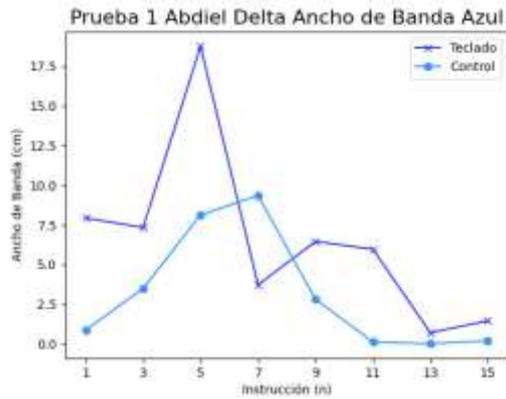


Figura 5.205 Prueba 1 Delta de Ancho de Banda

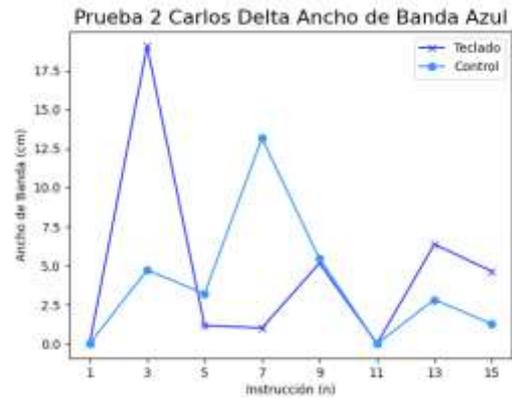


Figura 5.206 Prueba 2 Delta de Ancho de Banda

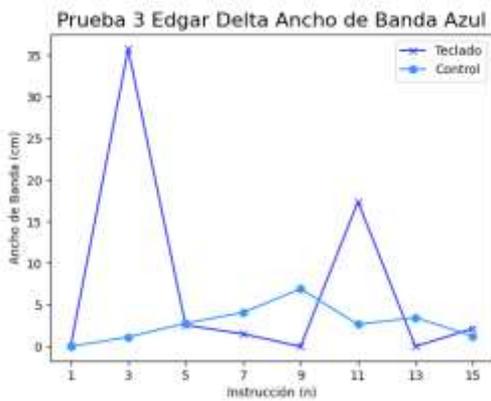


Figura 5.207 Prueba 3 Delta de Ancho de Banda

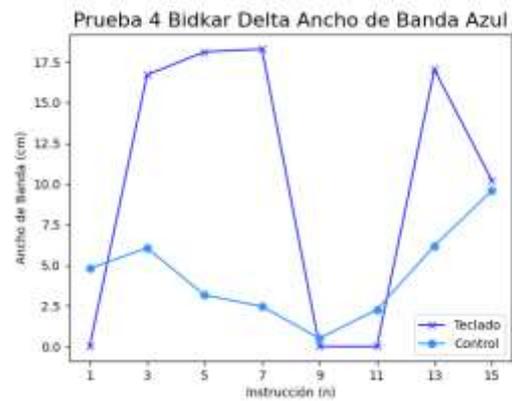


Figura 5.208 Prueba 4 Delta de Ancho de Banda

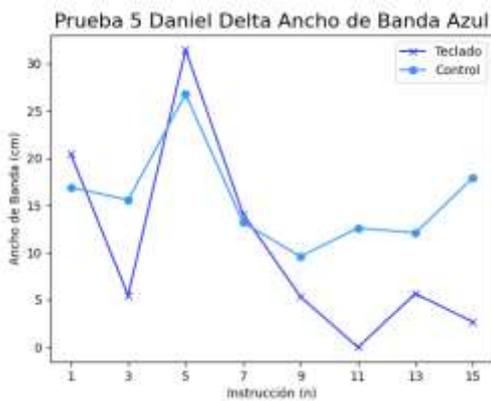


Figura 5.209 Prueba 5 Delta de Ancho de Banda

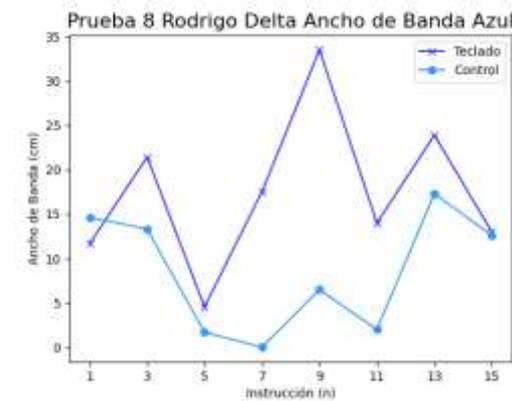


Figura 5.210 Prueba 8 Delta de Ancho de Banda

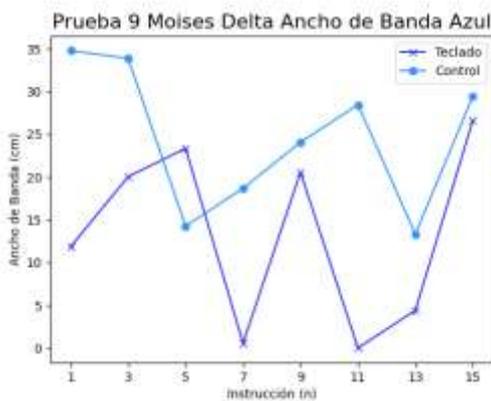


Figura 5.211 Prueba 9 Delta de Ancho de Banda

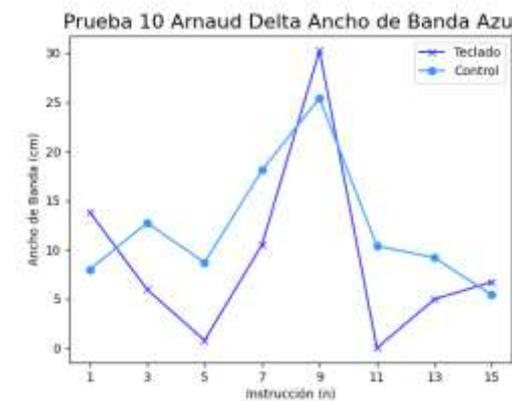


Figura 5.212 Prueba 10 Delta de Ancho de Banda

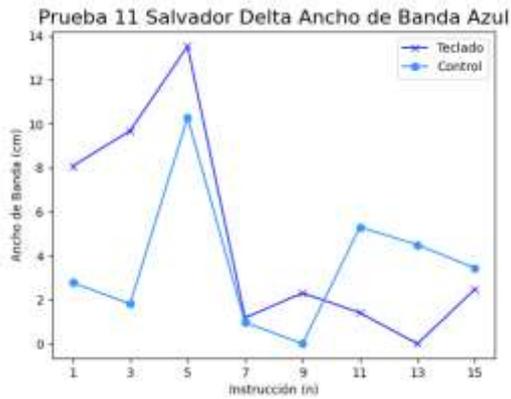


Figura 5.213 Prueba 11 Delta de Ancho de Banda

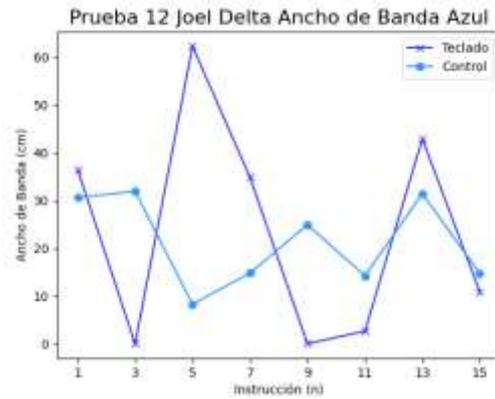


Figura 5.214 Prueba 12 Delta de Ancho de Banda

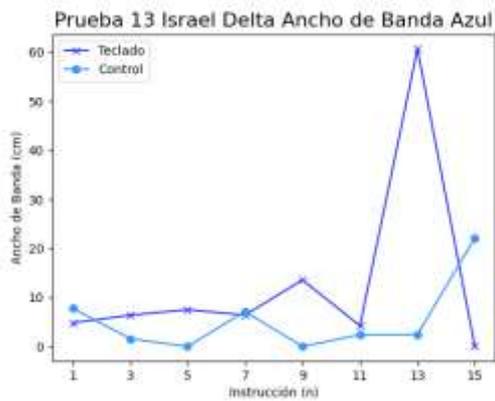


Figura 5.215 Prueba 13 Delta de Ancho de Banda

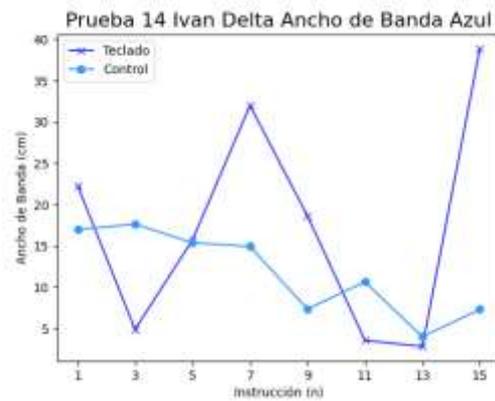


Figura 5.216 Prueba 14 Delta de Ancho de Banda

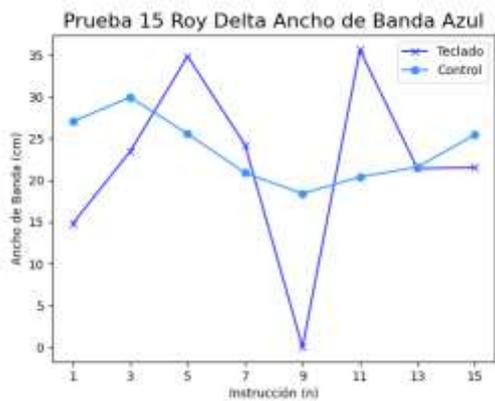


Figura 5.217 Prueba 15 Delta de Ancho de Banda

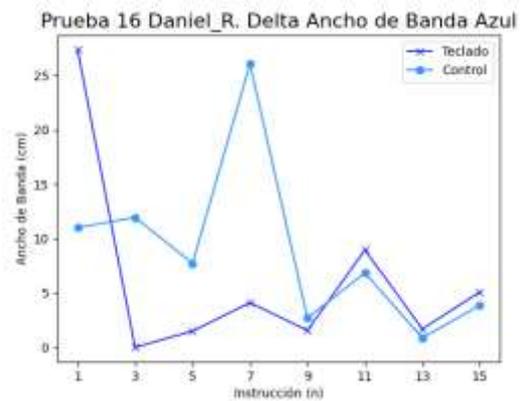


Figura 5.218 Prueba 16 Delta de Ancho de Banda

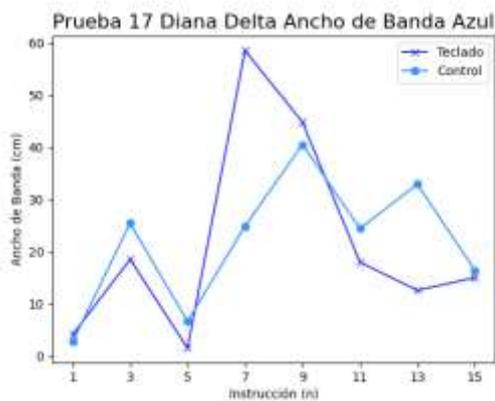


Figura 5.219 Prueba 17 Delta de Ancho de Banda

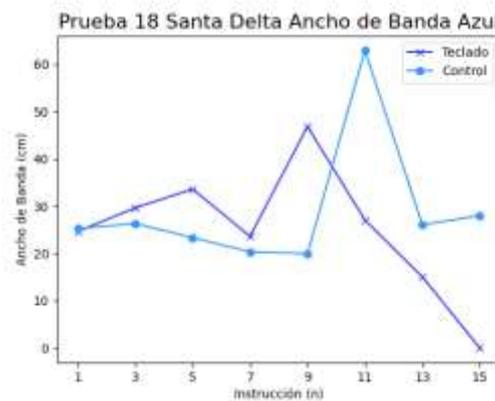


Figura 5.220 Prueba 18 Delta de Ancho de Banda

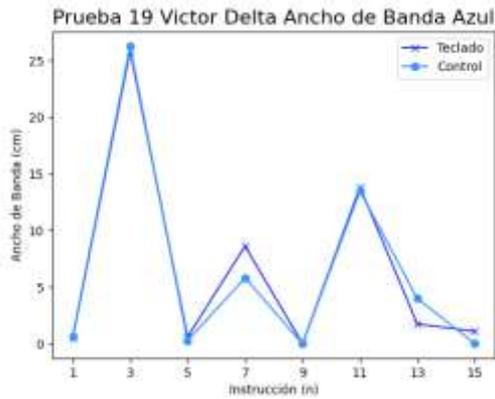


Figura 5.221 Prueba 19 Delta de Ancho de Banda

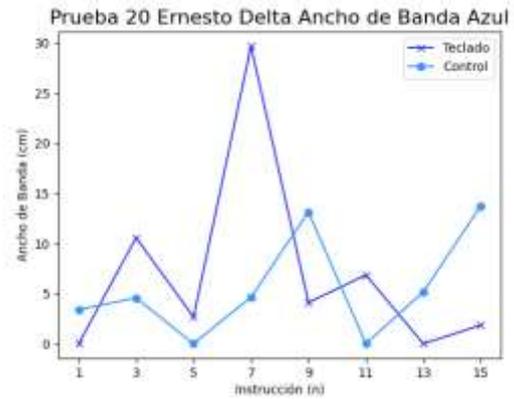


Figura 5.222 Prueba 20 Delta de Ancho de Banda

Las siguientes gráficas corresponden a las deltas de tiempo de las 5 pruebas presenciales que se analizaron, cada gráfica contiene la información del Teclado, el Control, y el control de gestos, LEAP Motion, de cada prueba.

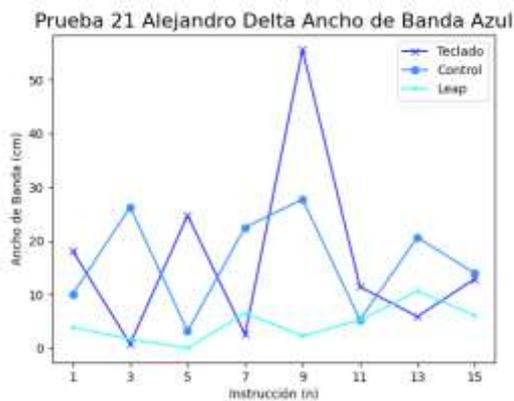


Figura 5.223 Prueba 21 Delta de Ancho de Banda

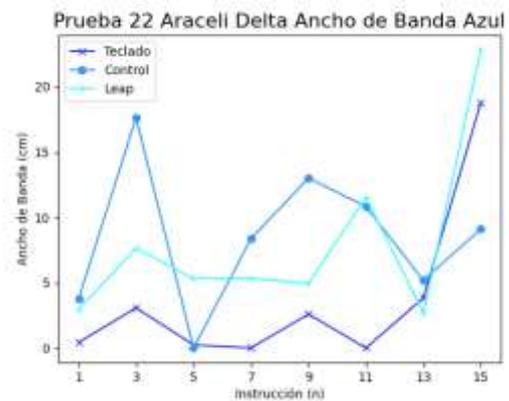


Figura 5.224 Prueba 22 Delta de Ancho de Banda

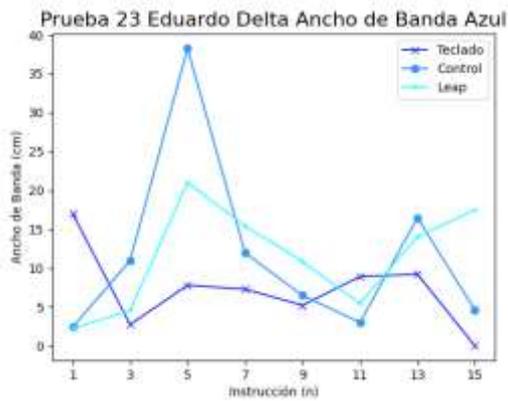


Figura 5.225 Prueba 23 Delta de Ancho de Banda

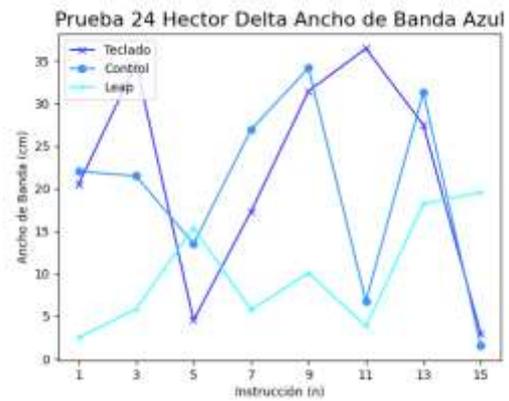


Figura 5.226 Prueba 24 Delta de Ancho de Banda

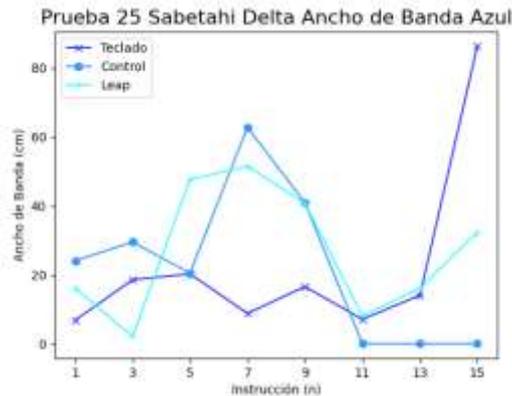


Figura 5.227 Prueba 25 Delta de Ancho de Banda

El controlador que tiene el menor delta de ancho de banda se considera la mejor opción para resolver la prueba usando este criterio.

5.4 Tabla Relacional

Finalmente, en una tabla se juntan todos los criterios que se fueron observando a lo largo del análisis de resultados en una tabla, ponderando cada prueba con cada criterio se encuentra el mejor controlador para realizar la actividad:

- La primera columna identifica el nombre de usuario y prueba.
- La segunda columna indica el controlador en el que se obtuvo el mejor tiempo, obtenido en la sección 5.2.1.
- La tercera columna indica el criterio de la mejor curva de aprendizaje durante la prueba, obtenido en la sección 5.2.1.
- La cuarta columna es el criterio de menor número de movimientos 5.1.2.
- La quinta columna indica el controlador que tuvo menor dispersión en el disco azul, visto en las gráficas de la sección 5.1.4, 5.1.5 y 5.1.6.
- La sexta columna indica el controlador en el cual se observó el menor ancho de banda en los discos azules, visto en la sección 5.2.2.
- La séptima columna indica el controlador en el cual, la altura máxima que alcanzaron los 4 discos fue menor, tomando en consideración aquellas pruebas en las que no se salió del área de juego, visto en las gráficas de la sección 5.1.5.
- La octava columna indica el mejor controlador para realizar la prueba.
- La sexta prueba se canceló por problemas de conectividad del control del usuario, y no se completó la prueba del control en el entorno virtual.

Tabla 5.2 Comparativa de Controladores

Prueba	Mejor Tiempo	Mejor Curva de aprendizaje	Menor número de movimientos	Menor dispersión en disco azul	Menor Ancho de banda (x)	Altura Máxima menor (y)	EL MEJOR PARA LA ACTIVIDAD
1 Abdiel S.	Control	Control	Teclado (15)	Control	Control	Control	Control
2 Carlos L.	Control	Control	Control (19)	Control	Control	Control	Control
3 Edgar P	Control	Control	Teclado 17 (Control turbo)	Teclado	Control	Control	Control
4 Bidkar P.	Control	Control	Control (15)	Control	Control	Teclado	Control
5 Daniel M.	Teclado	Control	Teclado (15)	Control	Control	Teclado	Teclado
7 Diego M.	Teclado	Teclado	Teclado (16)	-	-	-	Teclado
8 Rodrigo R.	Control	Teclado	Teclado (19)	Control	Control	Control	Control
9 Moisés O.	Empate	Teclado	Control (19)	Control	Teclado	Teclado	Teclado
10 Arnaud N.	Teclado	Teclado	Teclado (19)	Control	Teclado	Teclado	Teclado
11 Salvador A.	Teclado	Control	Teclado (16)	Control	Control	Teclado	Teclado
12 Joel A.	Control	Control	Teclado (167)	Control	Control	Control	Control
13 Israel N.	Control	Control	Empate (15)	Control	Control	Control	Control
14 Iván L.	Control	Control	Control (18)	Control	Control	Control	Control
15 Roy L.	Teclado	Teclado	Teclado (162)	Control	Teclado	Control	Teclado
16 Daniel R.	Teclado	Teclado	Control (16)	Control	Teclado	Control	Teclado
17 Diana S.	Control	Control	Control (19)	Control	EMPATE	Teclado	Control
18 Christian S.	Control	Teclado	Control (132)	Teclado	Teclado	Teclado	Teclado
19 Víctor C.	Teclado	Teclado	Teclado (25)	EMPATE	EMPATE	EMPATE	Teclado
20 Ernesto C.	Control	Control	Control (22)	Control	Control	Teclado	Control
21 Alejandro J.	Control	Control	Control (22)	Leap	LEAP	LEAP	Control
22 Araceli N.	Control	Control	Teclado (24)	Control	Teclado	Teclado	Teclado
23 Eduardo N.	Control	Control	Control (17)	Teclado	Teclado	LEAP	Control
24 Héctor N.	Control	Control	LEAP (61)	Leap	LEAP	LEAP	LEAP
25 Sabetahí R.	LEAP	LEAP	Teclado (20)	Leap	EMPATE	LEAP	LEAP

Considerando todas las métricas, el control se presenta como la opción que permitió al usuario resolver la Torre de Hanoi de la mejor manera. En 15 de cada 24 pruebas, el control tuvo el mejor tiempo de resolución; en 13 de cada 24 pruebas el control presentó una mejor curva de aprendizaje; el control tuvo en promedio 22.7 movimientos en falso, menos que los 32.8 movimientos en falso que en promedio tuvo el teclado. El control y el teclado empataron en 11 de cada 24 pruebas en el menor número de movimientos totales si no se considera la prueba del control turbo (un control que registraba movimientos adicionales que los ingresados); empataron también en el parámetro de altura máxima menor, con 9 pruebas para cada uno. El teclado tuvo mejores métricas en el ancho de banda, donde fue menor en 13 de cada 23 pruebas, y también tuvo 13 pruebas de 24 con menos movimientos en falso.

Esta conclusión sería válida mientras en el entorno virtual de Torre de Hanoi se garantice la misma física, la programación similar o balanceada de los controladores de entrada, teclado y control. Se tiene que tomar en cuenta que en los entornos virtuales pueden existir diversas interacciones significativas, y que en algunas otras circunstancias pudiera resultar otro controlador como la mejor opción. Esta no es una forma definitiva de establecer una comparativa, sino de visibilizar que la interacción con ambientes virtuales se seguirá adaptando a diversas necesidades, y nuevas alternativas también intentarán ofrecer mejorar la interacción con los ambientes virtuales.

Capítulo 6 Conclusiones

“...Cuando tengas que elegir entre dos caminos, pregúntate cuál de ellos tiene corazón. Quien elige el camino del corazón, no se equivoca nunca...” – Popol-Vuh

Durante la realización de esta tesis se utilizaron distintas herramientas que complementaron mi desarrollo académico y profesional.

Respecto a algunas herramientas utilizadas en la carrera, para el modelado tridimensional, se utilizó Blender en el diseño de los discos y la base; se retomó la programación orientada a objetos entre la interacción de los controladores y el ambiente virtual; se utilizó Unity como motor gráfico en el cual se implementó la física de los objetos y los objetos colisionables; se retomó el programa de Tracker para el rastreo de posición en la grabaciones de las pruebas; se utilizaron hojas de cálculo para almacenar datos temporalmente para su posterior análisis.

Respecto a algunas herramientas que complementaron mi experiencia profesional, la exitosa implementación de un kit de desarrollo de software (Software Development Kit, SDK) en un proyecto fue experiencia ante nuevos proyectos en el trabajo; el análisis de datos que se hizo a través de código de Python retomó y aportó conceptos utilizados en el trabajo que actualmente desarrollo, pues utilizo dicho lenguaje de programación para procesar una gran cantidad de datos almacenados en hojas de cálculo, expresados de manera gráfica.

Se diseñó un entorno virtual con la Torre de Hanoi en donde los usuarios reportaron que la física del entorno virtual fue similar a lo que encontrarían en un ambiente real. En esta parte se observó que la conexión que se presenta entre usuarios y entornos virtuales va más allá de los gráficos utilizados, la cantidad de polígonos usados o su calidad; la conexión se centra en que el usuario de ambientes virtuales reconozca elementos del mundo real en ese mundo virtual, y que el comportamiento de los elementos del mundo virtual tengan interacciones para el usuario como en el mundo real.

Aún con todas las opciones de controladores de entrada que existen, se pudo apreciar que los principales métodos de entrada usados para interactuar con ambientes virtuales en la actualidad, no necesariamente son los más recientes, como los visores de realidad virtual; pues al consultar a diversos usuarios de entornos virtuales, los visores de realidad virtual no eran tan comunes como lo eran el control y el teclado, siendo estos, los que tienen una mayor difusión y se han adaptado a diversos cambios, observado también con la alta disponibilidad que los usuarios tenían.

En la resolución de la Torre de Hanoi se identificaron las siguientes interacciones significativas: la identificación del ambiente virtual, la selección entre discos, la traslación de discos, y la rotación de los discos. Estas interacciones tuvieron su interpretación a acciones que se podían realizar con el control, con el teclado y con el LEAP. Tanto en el control como en el teclado la acción de mantener presionado un botón o tecla diferente para identificar la selección de cada disco se hizo con la intención de ser una acción similar por sujetar el disco.

En el control, el joystick tiene dos ejes, X y Y. El valor que se recibe oscila dentro de un rango, ya que cuanto más se mueve el joystick hacia una dirección, más grande es ese valor. Este valor variable se utilizó como magnitud de una fuerza variable que el usuario aplica sobre el disco. Durante las pruebas, se observó que con los controles el movimiento de los

discos abarcaba una mayor área de juego, dado que se tenía la entrada para el eje X y el eje Y unida en el joystick.

El control resultó ser más conveniente para el usuario ya que con un solo movimiento existe un control sobre ambos ejes, a pesar de que esto implicaba en algunas ocasiones un movimiento con más variaciones al principio de la prueba se identificó una tendencia a disminuir cuando el usuario se adaptaba al control, observado en la curva de aprendizaje.

En el teclado, para las teclas de dirección se seleccionó la señal que es enviada cuando el botón se presiona, y esa señal aplica una pequeña fuerza para que el disco se moviera, haciendo que el usuario deba presionar en repetidas ocasiones la tecla para seguir aplicando fuerza hacia cada disco. Durante las pruebas, se observó que con el teclado el movimiento de los discos era más lineal, la altura de los discos se mantenía relativamente constante entre un movimiento y otro, extraer el disco del poste en el que estaba era más sencillo, pero no se observó una adaptabilidad tan notoria en la mayoría de las ocasiones.

Para el análisis de datos se tomaron métricas directas e indirectas que ayudaron a la comparativa entre controladores. Una parte de las métricas directas se midieron manualmente, y otras se obtuvieron usando Tracker, la razón de esto es que se debía interpretar correctamente algunas mediciones que los datos de Tracker no permitían interpretar. Las métricas indirectas se tomaron a partir de los datos obtenidos.

En este caso, hacer uso de gráficas como elementos visuales para la evaluación y comparación de controladores permitió ver claramente el movimiento que tuvieron los discos durante toda la prueba en una sola imagen, pudiendo hacer una comparativa de una prueba con dos imágenes de manera rápida y sencilla.

Las primeras gráficas utilizaron las herramientas de gráficas de Excel, de licencia estudiantil, pero conforme se iban haciendo cambios y añadiendo detalles, se iba complicando mantener todas las gráficas con todos los cambios deseados. Estas dificultades impulsaron a automatizar el procesamiento de datos. Se automatizaron las gráficas ya que algún cambio en un tipo de gráfica habría implicado realizar de entre 25 a 50 cambios por cada tipo de gráfica, mientras que el código permitió generar las nuevas gráficas en segundos. El uso adecuado de sistemas de cómputo permitió el análisis de datos masivos.

La métrica de la latencia o los deltas de tiempo permitió identificar el tiempo efectivo de cada movimiento durante la prueba y la suma de ellos como el tiempo efectivo de toda prueba, así se buscó eliminar el tiempo que se tomaba en decir la instrucción, y eliminar algún otro factor externo.

La suma de los deltas de tiempo permitió estimar la curva de aprendizaje de las pruebas, en donde el valor final fue el tiempo total efectivo de la prueba. La curva de aprendizaje que demuestra que hubo una mejor adaptación es aquella que va reduciendo el valor de las deltas de tiempo hasta que se mantienen constantes o decrecientando.

Se analizó el movimiento de los discos a lo largo de toda la prueba, y se obtuvo la posición en X y Y utilizando un origen de referencia, un sistema cartesiano y el tiempo. Respecto al eje X se observaron movimientos oscilantes, cuando el disco llegaba a la posición en X de los postes, oscilaciones que se redujeron a lo largo de la prueba en la mayoría de las pruebas. Usando estos datos se añadió una métrica adicional, la cual fue evaluar la magnitud máxima

de los movimientos oscilantes para el disco que tuvo la mayor cantidad de movimientos, el azul. Respecto al eje *Y* se observaron movimientos oscilantes durante cada movimiento de los discos, correspondiendo a los pequeños ajustes de altura. Usando estos datos se añadió una métrica adicional, que consideraba en qué pruebas los discos NO se salían del área designada para el entorno virtual.

A partir de estas métricas se consideró al control como la alternativa que mostró en más ocasiones un menor tiempo de resolución, una mejor curva de aprendizaje, un menor número de movimientos, una menor dispersión en el disco azul y el controlador que menos se salió del entorno virtual.

Sin embargo, este es un acercamiento de cómo se pudiera hacer la comparativa entre controladores y no es de ninguna manera una forma única y definitiva de evaluar los controladores, pues existen más interacciones significativas entre los ambientes virtuales y los usuarios en distintos entornos virtuales.

Cada día surgen nuevas formas de interactuar con los ambientes virtuales, el control de gestos es cada vez más utilizado por nuevos dispositivos a fin de inmergir más sentidos del usuario, y ofrecerle una experiencia inmersiva adaptando gestos que ya conoce, a un nuevo mundo virtual o en un entorno de realidad aumentada. Esta forma de interacción, si bien, innovadora no necesariamente será la forma óptima de realizar un tarea determinada sino una forma de interacción adaptada al usuario.

Capítulo 7 Trabajo a futuro

“Solo podemos ver poco del futuro, pero lo suficiente para darnos cuenta de que hay mucho que hacer.” – Alan Turing

En el futuro vendrán nuevas formas de interactuar con ambientes virtuales y los lanzamientos de este año son prueba de ello. Los ambientes virtuales han llegado para quedarse, y su popularidad entre la población dependerá también de los controladores usados para interactuar con ellos. En una mirada final hacia todo el desarrollo de la tesis, existen algunas cosas que considero pudieran modificarse o mejorarse durante una supuesta nueva iteración del proyecto, así como profundizar en el análisis del estudio comparativo.

Entre los primeros cambios considero que se debería considerar añadir a la comparativa los visores de realidad virtual. Hay diversas opciones como los Meta Quest 3, los Meta Quest Pro, los Apple Vision Pro y los Pico 4, y tal vez la selección se reduciría a su disponibilidad.

Otra consideración que debería de tenerse en cuenta es la de actualizar la versión del sensor para el control de gestos utilizado, LEAP Motion, por su segunda generación la cuál fue lanzada en agosto de 2023, ya que permitiría observar cómo esta tecnología se ha desarrollado en 10 años.

La siguiente consideración es acerca del motor gráfico, primero ponderar diferentes motores gráficos que existan y que permitan implementar la interacción con diversos controladores de manera sencilla a fin de reducir el tiempo de desarrollo de la prueba. Y en caso de continuar usándose Unity, optaría por una versión más actualizada para que diversas opciones estén disponibles.

La siguiente consideración sería considerar el uso de aceleración por GPU para utilizar el código, las bibliotecas usadas (**Pandas y Matplotlib**) son compatibles con la biblioteca de cuDF de RAPIDS [24] y su uso permitiría reducir el tiempo de ejecución de los programas, de minutos a segundos. Para el desarrollo de la tesis, esta reducción de tiempo en el análisis no es tan significativa como puede ser el utilizar herramientas de análisis de datos de última generación como experiencia previa para el campo laboral.

Reconsideraría volver a utilizar la herramienta Tracker, esto es debido a que en algunas ocasiones el rastreo se interrumpía y la posición se tenía que añadir manualmente. Esta situación ocurrió muchas veces durante el análisis de las pruebas y ralentizó el desarrollo de la tesis. Una opción sería utilizar Open Computer Vision Library (Open CV) [24] la cuál es una biblioteca de código abierto para desarrollar el rastreo de un punto en la imagen, y aunque esta sería mi opción inicial, creo que deberían considerarse diversas opciones para el rastreo de los discos, inclusive una nueva versión de Tracker con una mejor configuración. Nuevamente, el uso de esta herramienta daría experiencia previa para el campo laboral.

Referencias

- [1] S. G. Weinbaum, *Pygmalion's Spectacles*, USA: Start Publishing LLC, 1935.
- [2] S. Greengard, *Virtual Reality*, Cambridge, MA: The Massachusetts Institute of Technology, 2019.
- [3] A. Basso, «Advantages, Critics and Paradoxes of Virtual Reality Applied to Digital Systems of Architectural Prefiguration, the Phenomenon of Virtual Migration,» 2017. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/321142137_Advantages_Critics_and_Paradoxes_of_Virtual_Reality_Applied_to_Digital_Systems_of_Architectural_Prefiguration_the_Phenomenon_of_Virtual_Migration.
- [4] I. & F. L. C. & A. L. G. Molina de la Torre, «Utilización de la realidad aumentada en el trabajo de campo geográfico: posibilidades y dificultades para su uso docente.,» de *Investigar para innovar en la enseñanza de la geografía*, GeoAlicante, 2015, pp. 634-649.
- [5] L. & R. J.-M. & B. L. Thériault, *Virtual Reality Interfaces for Virtual Environments.*, 2004.
- [6] Lancaster University, «Future Learn - Construct a Virtual Reality Experience,» Institute of Coding, 2021. [En línea]. Available: <https://www.futurelearn.com/courses/construct-a-virtual-reality-experience>. [Último acceso: 1 Marzo 2023].
- [7] S. Fuentes, «Especial controles de videojuegos Wiimote,» XATAKA, 3 Abril 208. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/videojuegos/especial-controles-de-videojuegos-wiimote>. [Último acceso: 5 Mayo 2023].
- [8] R. Gonçalves, M. Souza y G. Carbone, «Analysis of the Leap Motion Controller's Performance in Measuring Wrist Rehabilitation Tasks Using an Industrial Robot Arm Reference,» *Sensors*, 2022.
- [9] E. Pinedo, «Las Meta Quest Pro ya están aquí, y quieren ser tu puerta de entrada al Metaverso,» *Hipertextual*, 11 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://hipertextual.com/2022/10/meta-quest-caracteristicas-precio-fecha-lanzamiento>. [Último acceso: 15 Abril 2023].
- [10] L. Goode, «Probamos las Apple Vision Pro y esto es lo que se siente,» *WIRED*, 6 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://es.wired.com/articulos/probamos-apple-vision-pro-y-esto-es-lo-que-se-siente>. [Último acceso: 11 Julio 2023].
- [11] Ultraleap, «Ultraleap launches second generation of iconic hand tracking camera – Leap Motion Controller 2,» 31 Mayo 2023. [En línea]. Available:

- <https://www.ultraleap.com/company/news/press-release/leap-motion-controller-2/>. [Último acceso: 2 Septiembre 2023].
- [12] B. Farnsworth, «What is VR Eye Tracking? [And How Does it Work?],» IMOTIONS, 2017. [En línea]. Available: <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/vr-eye-tracking/>. [Último acceso: 10 Septiembre 2023].
- [13] Quasar Dynamics, «Quasar Dynamics,» 2023. [En línea]. Available: <https://quasardynamics.com/dispositivos-hapticos-la-realidad-virtual/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20dispositivo%20h%C3%A1ptico,encargados%20de%20simular%20respuestas%20t%C3%A1ctiles.> [Último acceso: 20 Septiembre 2023].
- [14] P. Rodriguez, «Zuckerberg quiere que toquemos su metaverso: así es el guante háptico que está desarrollando Meta para sentir objetos virtuales como reales,» XATAKA, 4 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/realidad-virtual-aumentada/zuckerberg-quiere-que-toquemos-su-metaverso-asi-guante-haptico-que-esta-desarrollando-meta-para-sentir-objetos-virtuales-como-reales.> [Último acceso: 22 Septiembre 2023].
- [15] D. Romik, «Solving the Tower of Hanoi,» Futurum, 22 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://futurumcareers.com/solving-the-tower-of-hanoi.> [Último acceso: 2 Febrero 2023].
- [16] A. G. N. N. J. V. M. T. H. T. M. d. J. O. D. y. R. D.-S. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz^{1*}, «Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación,» 9 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://myb.ojs.incol.mx/index.php/myb/article/view/428.> [Último acceso: 2 Febrero 2023].
- [17] Borodar, «Unity Asser Store Farland Skies - Cloudy Crown,» 19 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/2d/textures-materials/sky/farland-skies-cloudy-crown-60004.> [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [18] Protocolo Covid MX, «Señaletica oficial para Covid-19,» [En línea]. Available: <https://www.protocolocovid.mx/post/se%C3%B1aletica-oficial-para-covid-19.> [Último acceso: 30 Mayo 2023].
- [19] NUMFOCUS, «pandas documentation,» [En línea]. Available: <https://pandas.pydata.org/docs/>. [Último acceso: 25 Octubre 2023].

- [20] The Matplotlib development team., «<https://matplotlib.org/>,» [En línea]. Available: <https://matplotlib.org/stable/users/project/license.html>. [Último acceso: 2 Octubre 2023].
- [21] Numpy Developers, «<https://numpy.org/>,» [En línea]. Available: <https://numpy.org/doc/stable/license.html>. [Último acceso: 1 Octubre 2023].
- [22] RAE, «<https://dle.rae.es/>,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/latencia>. [Último acceso: 13 Marzo 2023].
- [23] «<https://physlets.org/tracker/>,» [En línea]. Available: <https://physlets.org/tracker/>. [Último acceso: 15 Marzo 2023].
- [24] «<https://rapids.ai/>,» [En línea]. Available: <https://rapids.ai/#quick-start>. [Último acceso: 28 Noviembre 2023].
- [25] OpenCV Team, «<https://opencv.org/>,» [En línea]. Available: <https://opencv.org/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2023].

Anexo I

Se puede encontrar el repositorio con todo el código y modelos empleados en el siguiente enlace.

<https://github.com/rubenparedes0796/T-Comparativa-Controladores/tree/main>