Diseño e implementación de un prototipo de muro interactivo de bajo costo basado en matriz de sensores ópticos y proyección de escenarios virtuales

Fernández Bermeo, Daniel Antonio y Reyes Jurado, Joshua Sebastián

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control

Ing. Vargas Vallejo, Vanessa Carolina, PhD.

19 de febrero de 2024

Copyleaks

Plagiarism and AI Content Detection Report

TRABAJO DE TITULACION FernandezR...

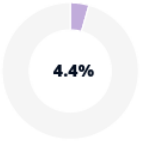
Scan details

Scan time:	Total Pages:	Total Words:
February 20th, 2024 at 20:18 UTC	112	27865

Plagiarism Detection

Types of plagiarism		Words
Identical	0.8%	217
Minor Changes	0.2%	54
Paraphrased	0.8%	212
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	4.4%	1237
Human text	95.6%	26628

Learn more

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "**Diseño e implementación de un prototipo de muro interactivo de bajo costo basado en matriz de sensores ópticos y proyección de escenarios virtuales**" fue realizado por los señores **Fernández Bermeo, Daniel Antonio y Reyes Jurado Joshua Sebastián;** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de febrero de 2024

VANESSA CAROLINA VARGAS VALLEJO

.....

Ing. Vargas Vallejo, Vanessa Carolina, PhD.

C. C. 1711309045

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Fernández Bermeo, Daniel Antonio y Reyes Jurado, Joshua Sebastián**, con cédulas de ciudadanía n°1752312106 y n°1718909706, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un prototipo de muro interactivo de bajo costo basado en matriz de sensores ópticos y proyección de escenarios virtuales** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 19 de febrero de 2024

.....

Fernández Bermeo, Daniel Antonio

C.C.: 1752312106

.....

Reyes Jurado, Joshua Sebastián

C.C.: 1718909706

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Autorización de Publicación

Nosotros **Fernández Bermeo, Daniel Antonio y Reyes Jurado, Joshua Sebastián**, con cédulas de ciudadanía n°1752312106 y n°1718909706, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un prototipo de muro interactivo de bajo costo basado en matriz de sensores ópticos y proyección de escenarios virtuales** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 19 de febrero de 2024

.....

Fernández Bermeo, Daniel Antonio

C.C.: 1752312106

.....

Reyes Jurado, Joshua Sebastián

C.C.: 1718909706

Dedicatoria

A mis padres Rosa y Galo, cuyo amor incondicional y sacrificios han sido mi mayor inspiración y motor para alcanzar mis metas académicas. Mi madre, cuyo cariño y guía han sido mi luz en los momentos más oscuros, inspirándome a seguir adelante con determinación. Mi padre, cuya sabiduría y valentía han sido mi ejemplo de perseverancia, motivándome a superar cualquier obstáculo en mi camino.

A mis hermanos Diego, Milady y Paola, cómplices de mis sueños y confidentes en mis desafíos, gracias por su constante apoyo y aliento a lo largo de este arduo camino. A todos aquellos amigos y seres queridos que han dejado una marca imborrable en mi corazón, les dedico este trabajo con profundo agradecimiento y cariño.

Daniel Antonio Fernández Bermeo

Dedicatoria

Dedicado a mi familia ya que en este viaje llamado vida, ustedes, con su amor inquebrantable, han sido faros de inspiración. Cada uno de ustedes, desde la fortaleza de Jorge hasta la ternura de Alexandra, ha dejado una huella imborrable en mi corazón. A mis queridas hermanas, Nicole y Paula, compañeras de risas y confidentes de sueños, su luz ha multiplicado la alegría en nuestra familia.

Agradezco a la vida por regalarme el tesoro de tener padres y hermanas como ustedes. Juntos, hemos conseguido este logro. Que esta dedicatoria refleje mi profundo agradecimiento por el amor, la paciencia y el apoyo que han compartido conmigo.

Joshua Sebastián Reyes Jurado

Agradecimiento

Quiero agradecer de todo corazón a mis padres y hermanos por su amor incondicional y apoyo constante durante mi trayecto académico. Su aliento y confianza fueron fundamentales para mi éxito.

También agradezco tanto a mis compañeros de universidad como a personas que llevo en el corazón por su camaradería y palabras de aliento, que me motivaron en los momentos difíciles.

Un agradecimiento especial a mi tutora académica, Dra. Vanessa Vargas, por su orientación invaluable y apoyo continuo en mi investigación.

Finalmente, mi profundo agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas ESPE por proporcionarme las oportunidades y recursos necesarios para alcanzar mis metas académicas y profesionales.

Daniel Antonio Fernandez Bermeo

Queridos padres, Jorge y Alexandra, en este significativo capítulo de mi vida, su amor y apoyo han sido los pilares que me han sostenido en cada paso del camino. Su sacrificio, comprensión y aliento han sido mi mayor fuente de fortaleza. A ustedes les debo más de lo que las palabras pueden expresar.

A la respetada directora de mi tesis, Dra. Vanessa Vargas, agradezco sinceramente su guía experta, paciencia y dedicación a lo largo de este desafiante proceso académico. Su mentoría ha sido fundamental para mi crecimiento y desarrollo profesional. Gracias por inspirarme a alcanzar nuevas alturas y por compartir su conocimiento de manera tan valiosa.

A ambos, les estoy eternamente agradecido por ser faros en mi trayecto académico y personal.

Joshua Sebastián Reyes Jurado

Índice de Contenido

Abreviaciones 16
Resumen 18
Abstract 19
Capítulo 1: Introducción 20
Contextualización del Proyecto 20
Planteamiento del Problema 23
Justificación del Proyecto 23
Objetivos del Proyecto 25
Objetivo General 25
Objetivos Específicos 25
Alcance 25
Organización del manuscrito 27
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos 28
Tecnologías de Pantallas Táctiles 28
Clasificación 29
Pantalla Táctil Infrarroja 33
Pantalla Táctil Basada en Cámara Infrarroja. 34
Pantalla Táctil Basada en Proyector Infrarrojo 34
Pantalla Táctil Basada en Matriz de Sensores Infrarrojos 34
Interacción Humano Máquina 35
Clasificación interfaces de usuario 36
Interfaz Gráfica de Usuario 37
Guías Generales de Diseño de GUI 38
Sensores 39
Clasificación 40
Sensores infrarrojos 41
Aplicaciones con Sensores Infrarrojos 42
Controladores 42
Dispositivos Lógicos Programables 44
Clasificación. 44
Matriz de Compuertas Programable en Campo (FPGA). 45
Aplicaciones. 45
Computadores de Placa Única 46
Aplicaciones. 46

Comunicación entre Dispositivos 47
Clasificación. 48
Protocolo de Comunicación Serial Asíncrono Universal (UART). 51
Capítulo 3: Diseño e Implementación de la Plataforma de Hardware 54
Consideraciones del Sistema 54
Esquema General 54
Periférico de Entrada 55
Diseño del Marco 58
Diseño del Circuito de los Sensores 61
Circuito Receptores Infrarrojos. 61
Circuito Emisores Infrarrojos. 62
Periférico de Salida 64
Controlador 65
Driver Periférico de Entrada 69
Selección de FPGA. 69
Diseño. 70
Codificador. 71
Codificador Ascii. 73
Codificador de Prioridad. 75
Controlador UART. 77
Uart Tx Buffer 78
Uart Tx. 81
Implementación FPGA. 83
Controlador del Periférico de Salida 86
Configuración del Computador de Placa Única. 87
Instalación del Sistema Operativo 87
Instalación Drivers. 87
Implementación Controlador del Periférico de Salida. 89
Capítulo 4: Diseño de Escenarios Virtuales e Integración con el Hardware 91
Diseño General de la Aplicación de Usuario 91
Driver de Interacción 92
Diseño de los Escenarios Virtuales 95
Selección de Conceptos y Temáticas para Escenarios Virtuales 96
Selección de la Plataforma de Desarrollo de Videojuegos 96
Creación de Elementos Gráficos y Visuales 98

Integración de Elementos Gráficos en los Escenarios Virtuales 102
Programación de los Escenarios Virtuales 108
Diagramas de Flujo Menú Principal 108
Diagramas de Flujo Escenario 1 109
Diagramas de Flujo Escenario 2 110
Diagrama de Flujo Escenario 3 114
Capítulo 5: Evaluación del Prototipo 116
Evaluación Cuantitativa 116
Evaluación de la precisión, exactitud y del error del prototipo 119
Evaluación del sistema con diferentes condiciones 125
Consideración de las pruebas 129
Evaluación del tiempo de respuesta 131
Consumo de Potencia 132
Costos Totales del Sistema 134
Evaluación Cualitativa 136
Análisis de Resultados 141
Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones 145
Conclusiones 145
Recomendaciones 146
Trabajos Futuros 148
Bibliografía 149
Apéndices 158

Índice de Tablas

Tabla 1 *Resumen de las tecnologías de pantalla táctil y sus características* 32

Tabla 2 *Tabla comparativa entre varios sensores infrarrojos en el mercado*..... 56

Tabla 3 *Tabla de cantidad de lúmenes recomendados dependiendo del uso* 64

Tabla 4 *Tabla comparativa entre Arduino, Microcontroladores y FPGA* 66

Tabla 5 *Tabla comparativa entre los principales modelos de SBC más populares en el mercado*..... 68

Tabla 6 *Tabla comparativa entre los principales modelos de las marcas de FPGA más disponibles en el mercado* 70

Tabla 7 *Tabla comparativa entre las principales plataformas de desarrollo de videojuegos que se pueden encontrar* 97

Tabla 8 *Posibles casos de respuesta del sistema.* 117

Tabla 9 *Clasificación de posibles casos de respuesta.*.....118

Tabla 10 *Datos obtenidos FP, FN, VP y VN*..... 123

Tabla 11 *Objetos propuestos para pruebas de evaluación.* 127

Tabla 12 *Resultados obtenidos con diferentes objetos.*..... 129

Tabla 13 *Resultados obtenidos a diferentes distancias y niveles de iluminación con objeto Peluche estándar.* 130

Tabla 14 *Tiempos de respuesta promediados de cada escenario con SBC.* 132

Tabla 15 *Tiempos de respuesta promediados de cada escenario con computador portátil.* 132

Tabla 16 *Potencia individual de cada componente del prototipo* 133

Tabla 17 *Potencia comparada con cpu AMD Ryzen 7 en lugar de SBC*..... 133

Tabla 18 *Potencia individual de cada componente*..... 134

Tabla 19 *Costo detallado del prototipo* 134

Tabla 20 *Costo detallado con computador portátil*..... 135

Tabla 21 *Comparación con productos comerciales* 136

Tabla 22 *Comparativa costo, tiempo de respuesta y consumo de potencia* 142

Tabla 23 *Descripción de los hallazgos encontrados en la realización de la encuesta* ... 144

Índice de Figuras

Figura 1 *Diagrama de bloques del prototipo de MDI.* 26
Figura 2 *Clasificación de tipos de tecnologías de pantallas táctiles.* 31
Figura 3 *Tipos de interfaces de usuario y principal característica* 36
Figura 4 *Clasificación Sensores Ópticos*..... 41
Figura 5 *Clasificación de Dispositivos de Lógica Programable* 45
Figura 6 *Clasificación de acuerdo con la dirección del intercambio de información* 49
Figura 7 *Clasificación de acuerdo con el tipo de sincronización entre transmisor-receptor* 50
Figura 8 *Clasificación de acuerdo con el tipo de sincronización entre transmisor-receptor* 51
Figura 9 *Formato Trama Enviada en Protocolo UART* 52
Figura 10 *Diagrama de Bloques de la plataforma de hardware*..... 55
Figura 11 *Dimensiones del marco del MDI mostrados en el modelo 3D*..... 58
Figura 12 *Dimensiones del grosor del marco para el MDI*..... 59
Figura 13 *Matriz de sensores*..... 60
Figura 14 *Separación de cada sensor infrarrojo que van a estar distribuidos alrededor del marco* 60
Figura 15 *Modelo 3D del marco junto con la caja* 61
Figura 16 *Circuito propuesto para los receptores infrarrojos*..... 62
Figura 17 *Circuito propuesto para los emisores infrarrojos* 63
Figura 18 *Placa PCB* 64
Figura 19 *Diagrama de Bloques del Controlador* 65
Figura 20 *Modelo del sistema MDI conjunto a su arquitectura*..... 69
Figura 21 *Entidad top DPE* 71
Figura 22 *Arquitectura estructural de la entidad top DPE*..... 71
Figura 23 *Entidad codificador* 72
Figura 24 *Arquitectura codificador* 73
Figura 25 *Entidad codificador_ascii* 73
Figura 26 *Identificación de estimulos*..... 74
Figura 27 *Codificación de los puntos de cada fila* 75
Figura 28 *Entidad codificador_prioridad*..... 75
Figura 29 *Arquitectura codificador_prioridad*..... 76

Figura 30 *Ejemplo funcionamiento codificador_prioridad_columnas* 77
Figura 31 *Ejemplo funcionamiento codificador_prioridad_filas* 77
Figura 32 *Entidad controlador_uart* 78
Figura 33 *Arquitectura controlador_uart* 78
Figura 34 *Entidad uart_tx_buffer* 79
Figura 35 *Diagrama de flujo del funcionamiento del buffer de transmisión* 80
Figura 36 *Entidad uart_tx* 81
Figura 37 *Diagrama de estados del bloque de transmisión* 82
Figura 38 *Implementación DPE* 83
Figura 39 *Simulación de funcionamiento codificador_ascii* 84
Figura 40 *Simulación de funcionamiento codificador_prioridad* 84
Figura 41 *Simulación de funcionamiento del uart_tx_buffer* 85
Figura 42 *Simulación de funcionamiento del uart_tx* 86
Figura 43 *Conexión FPGA y placa PCB* 86
Figura 44 *Herramienta de creación de dispositivos booteables* 87
Figura 45 *Versión del controlador Vulkan instalado* 88
Figura 46 *SBC implementada* 89
Figura 47 *Modelo del sistema MDI considerando el hardware y software implementado* . 90
Figura 48 *Estructura Aplicación de Usuario* 92
Figura 49 *Diagrama de Bloques de Script SerialManager* 93
Figura 50 *Diagrama scripts necesarios para la interacción* 94
Figura 51 *Diagrama de Escenarios con su función asignada.* 95
Figura 52 *Diagrama de Escenarios con su temática y conceptos asignados.* 96
Figura 53 *Elementos gráficos y visuales utilizados en Escenario Menú* 99
Figura 54 *Elementos gráficos y visuales utilizados en el escenario 1.* 100
Figura 55 *Elementos gráficos y visuales utilizados en el escenario 2.* 101
Figura 56 *Elementos gráficos y visuales utilizados en el escenario 3.* 102
Figura 57 *Boceto de interfaz de Escenario Menú* 103
Figura 58 *Diseño de interfaz de Escenario Menú* 103
Figura 59 *Boceto de interfaz de Escenario 1* 104
Figura 60 *Diseño de interfaz de Escenario 1* 104
Figura 61 *Boceto de interfaz de Escenario 2* 105
Figura 62 *Diseño de interfaz de Escenario 2* 105

Figura 63 *Boceto de interfaz de minijuego* 106
Figura 64 *Diseño de interfaz de minijuego* 106
Figura 65 *Boceto de interfaz de Escenario 3* 107
Figura 66 *Diseño de interfaz de Escenario 3* 107
Figura 67 *Diagramas de Flujo utilizados para el escenario Menú* 109
Figura 68 *Diagramas de Flujo utilizados para el escenario 1* 110
Figura 69 *Diagramas de flujo utilizados en el script Rueda para el escenario 2*.....111
Figura 70 *Diagramas de flujo utilizados en el script Calcular para el escenario 2 (a)* 112
Figura 71 *Diagramas de flujo utilizados en el script Calcular para el escenario 2 (b)* 113
Figura 72 *Diagramas de flujo utilizados en el script RellenaColor para el escenario 3*....114
Figura 73 *Matriz de error ante la presencia de un estímulo.*.....116
Figura 74 *Matriz de error definida de variable estímulo y coordenada.* 118
Figura 75 *Pantalla para la evaluación del prototipo*..... 121
Figura 76 *Evidencia pruebas FP, FN, VP y VN*..... 123
Figura 77 *Resultados VP, FP, VN y FN.* 124
Figura 78 *IUV del día 7 y 8 de febrero del 2024.*..... 125
Figura 79 *Prueba para determinar la distancia ideal de funcionamiento del sistema.*..... 126
Figura 80 *Prueba para determinar el objeto con el que mejor reacciona el sistema*..... 128
Figura 81 *Ilustración área de tolerancia.* 129
Figura 82 *Ejemplo errores encontrados* 131
Figura 83 *Resultados dificultades durante de la interacción en el escenario eliminar zombies* 138
Figura 84 *Resultados dificultades durante de la interacción en el escenario rueda de la fortuna matemática* 138
Figura 85 *Resultados dificultades durante de la interacción en el escenario pintar casillas con la letra correcta* 138
Figura 86 *Resultados experiencia al Interactuar con escenario eliminar zombies*..... 139
Figura 87 *Resultados experiencia al Interactuar con escenario rueda de la fortuna matemática* 139
Figura 88 *Resultados experiencia al Interactuar con escenario pintar casillas con la letra correcta*..... 140
Figura 89 *Resultados de percepción de atracción a los escenarios virtuales*..... 140
Figura 90 *Resultados de percepción global de experiencia del usuario* 141
Figura 91 *Resultados de facilidad de uso y comprensión de la aplicación de usuario*.... 141

Abreviaciones

AIBM	Monitor Automático de Comportamiento por infrarrojos
APR	Reconocimiento de Pulso Acústico
CERN	Centro Europeo para la Investigación Nuclear
CLI	Interfaz por Línea de Comandos
DST	Tecnología de Señal Dispersiva
FN	Falso Negativo
FP	Falso Positivo
FPGA	Matriz de puertas programables
FTIR	Reflexión Interna Total Frustrada
GUI	Interfaces Gráficas de Usuario
HCI	Interacción Humano-Computadora
HDMI	Interfaz Multimedia de Alta Resolución
IR	Infrarrojo
IREDs	Diodos Emisores de Infrarrojos
NUI	Interfaz Natural de Usuario
PDI	Pantalla Digital Interactiva
PSD	Detección de Dispersión Plana
SAW	Onda Acústica de Superficie
SBC	Computador de Placa Única
SCEIN	Sistemas Ciber-Físicos para Entornos Inteligentes
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal

UI Interfaces de Usuario

VP Verdadero Positivo

VN Verdadero Negativo

Resumen

El avance tecnológico en los últimos años, ha cambiado el paradigma de la forma en que las personas se comunican, aprenden y se divierten. Por esta razón, el uso de dispositivos electrónicos que permitan interacción y estímulos visuales se vuelve cada vez más atrayente. Sin embargo, el costo de sistemas que incluyen pantallas interactivas es elevado. Ante esta situación, el presente trabajo de titulación propone un prototipo de muro interactivo de 72” de diagonal, que permita la interacción del usuario con 3 tipos de escenarios virtuales: uno de actividad física, uno de enseñanza lúdica y otro destinado a terapia de salud mental.

La tecnología de pantalla táctil usada en este proyecto es de tipo óptica, con sensores infrarrojos. Los sensores están montados dentro del marco del muro, formando una estructura matricial de 14 x 26 celdas. La interacción del usuario con la aplicación se realiza por medio de toques con la mano o algún tipo de objeto en el interior del marco del muro. El sistema utiliza un controlador para monitorizar la celda estimulada por el usuario, y de acuerdo a ello gestiona la aplicación. Los escenarios proyectados en el muro fueron desarrollados en el motor gráfico Unity 3D. Para cumplir con el objetivo del proyecto, el controlador debe: a) monitorizar 40 entradas simultáneas de la matriz de sensores; b) tener una plataforma liviana para el despliegue de vídeo; y, c) ser de costo reducido. Estos requisitos fueron satisfechos mediante el uso de dos componentes: un dispositivo de lógica programable (FPGA) para el monitoreo de entradas, y un computador embebido (SBC) que utiliza Sistema Operativo y librerías de código abierto. La evaluación del proyecto dio como resultado una precisión de 90,5%, una exactitud de 95,2% y un tiempo de respuesta media de 2,55 segundos. En cuanto al consumo de potencia, éste es 6 veces menor que el consumo de un sistema basado en un computador portátil. Por otro lado, resultó ser 24 veces más económico que un dispositivo comercial. La evaluación de la experiencia de usuario obtuvo una calificación del 80% como muy favorable y el 20% como favorable.

Palabras clave: muro digital interactivo, escenarios virtuales, dispositivo de lógica programable, computador embebido, pantalla táctil.

Abstract

Technological progress in recent years has changed the paradigm of the way people communicate, learn and have fun. For this reason, the use of electronic devices that allow interaction and visual stimuli is becoming increasingly attractive. However, the cost of systems that include interactive screens is high. In view of this situation, the present work proposes a prototype of a 72" diagonal interactive wall that allows the user to interact with three types of virtual scenarios: one for physical activity, one for recreational teaching and one for mental health therapy.

The touch screen technology used in this project is optical with infrared sensors. The sensors are mounted inside the wall frame, forming a 14 x 26 cell matrix structure. The user interaction with the application is done by touching the hand or some kind of object inside the wall frame. The system uses a controller to monitor the cell stimulated by the user, and accordingly manages the application. The scenarios projected on the wall were developed in the Unity 3D graphics engine. To meet the project objective, the controller must: a) monitor 40 simultaneous inputs from the sensor array; b) have a lightweight platform for video display; and, c) be cost-effective. These requirements were satisfied through the use of two components: a programmable logic device (FPGA) for input monitoring, and an embedded computer (SBC) using open source operating system and libraries. The evaluation of the project resulted in an accuracy of 90.5%, an accuracy of 95.2% and an average response time of 2.55 seconds. As for power consumption, it is 6 times lower than the power consumption of a laptop-based system. On the other hand, it was 24 times less expensive than a commercial device. The user experience evaluation was rated 80% as very favorable and 20% as favorable.

Key words: interactive digital wall, virtual scenarios, programmable logic device, singled board computer, touch screen.

Capítulo 1: Introducción

Contextualización del Proyecto

El desarrollo de pantallas digitales interactivas ha sido un tema de investigación y desarrollo en la industria tecnológica durante varias décadas. Desde la creación de las primeras pantallas táctiles en los años 60, la tecnología ha evolucionado de manera significativa y ha permitido una mayor interacción entre los usuarios y los dispositivos electrónicos.

Los sistemas de pantallas digitales interactivas (PDI) han ganado popularidad en los últimos años debido a su capacidad para proporcionar una experiencia de usuario mejorada y más atractiva. Muchos de estos sistemas utilizan tecnologías táctiles o de seguimiento de gestos para permitir la interacción del usuario con el contenido de la pantalla. Otros, utilizan tecnología basados en sensores infrarrojos para la detección de estimulos y movimientos.

En el trabajo propuesto por Shen et al. (2017) se discute el uso de pantallas interactivas de piso con radares de infrarrojos cercanos para crear juegos de pantalla super grande. La interacción multi-touch entre la pantalla de piso y el zapato del jugador se crea mediante el escaneo de rayos de los radares de infrarrojos cercanos. Este trabajo usa una biblioteca de software dedicada para producir aplicaciones de juegos para la pantalla interactiva de piso. El trabajo incluye el diseño del sistema de la pantalla super grande, así como la personalización del evento de movimiento del mouse de la biblioteca de software.

También el trabajo de Suyama et al. (2017) propone un sistema interactivo de navegación en interiores utilizando proyecciones en el suelo y discute las características básicas de la navegación humana con imágenes proyectadas en el suelo. También, se estudian las ventajas de usar detectores de rango láser para la medición de la posición, así como un método de planificación de rutas y dos enfoques para proporcionar información de navegación basada en la posición humana observada. Adicionalmente, presenta resultados experimentales para evaluar los efectos de los parámetros de diseño en los dos enfoques de navegación.

Finalmente, se discuten posibles trabajos futuros y se presenta un análisis de la navegación humana utilizando las imágenes proyectadas evaluando la efectividad del sistema de navegación.

El sistema “Automatic Infrared Behavior-Monitor” (AIBM) que presenta Liu et al. (2021) es un sistema de monitorización de comportamiento infrarrojo automático que puede detectar la posición en tiempo real de animales libremente moviéndose con un marco táctil infrarrojo. El estudio detalla el proceso de calibración de la cámara, la precisión espacial del detector infrarrojo y la comparación con otros métodos de monitoreo de comportamiento. Además, describe la aplicación del sistema en pruebas de comportamiento animal, como pruebas de ansiedad y memoria espacial. Los resultados demuestran que el sistema AIBM ofrece una forma precisa y eficiente de monitorear y analizar el comportamiento animal en entornos de laboratorio, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la investigación en neurociencia y psicología animal.

La proposición de Liang et al. (2018) versa sobre una técnica óptica y de bajo costo para convertir una pantalla convencional en una pantalla táctil utilizando una cámara web y un proyector de línea láser infrarrojo. Esta técnica se basa en el procesamiento de imágenes y métodos de visión por computadora para detectar la posición del dedo del usuario en la pantalla y proporciona una función táctil en tiempo real. El sistema ha sido probado en diferentes tamaños y resoluciones de pantalla y ha demostrado un rendimiento mejorado en comparación con técnicas existentes, ya que no requiere de dispositivos adicionales. Los resultados experimentales muestran que el sistema puede ser utilizado en diferentes tamaños y resoluciones de pantalla, lo que es una característica deseable para un muro interactivo de este tipo. Este trabajo es relevante en el campo de la interacción humano-computadora y puede tener aplicaciones en la industria de la tecnología táctil.

En el trabajo de Suto et al. (2018) se describe el diseño de un sistema de mesa táctil multi-touch que utiliza tecnología infrarroja para detectar la posición y los gestos de los

usuarios. Este sistema emplea un panel táctil FTIR (Frustrated Total Internal Reflection) y luz infrarroja para detectar las áreas de contacto y la sombra de la mano del usuario mediante una cámara infrarroja, y establece una relación entre las áreas de contacto y la posición del usuario. Asimismo, el sistema cuenta con gestos multi-touch para manipular objetos en la pantalla. El artículo también presenta los resultados de experimentos para evaluar la precisión de reconocimiento de gestos y la usabilidad del sistema.

Un uso de dispositivos interactivos contribuye en la realización no sólo de actividades lúdicas sino también de aprendizaje. Así, por ejemplo, la investigación llevada a cabo por Martínez, (2014) examina el impacto del uso de pantallas digitales interactivas (PDI) en la educación infantil y su efecto en el aprendizaje. La investigación se llevó a cabo mediante un diseño cuasi-experimental que incluyó tanto grupos de control como grupos experimentales. Los resultados demostraron que los grupos experimentales que utilizaron la PDI para recibir los contenidos educativos obtuvieron mejores resultados de aprendizaje en comparación con los grupos de control. En consecuencia, se concluyó que el uso de tecnología, específicamente la PDI, puede ser beneficioso para mejorar la educación infantil y el proceso de enseñanza diagnóstica.

Así mismo, el trabajo de Gandol et al. (2012) analiza los pros y contras del uso de la pantalla digital interactiva en la educación primaria y preescolar. Se divide el tema en siete áreas de investigación, como el contexto, la formación, el método y la utilización de la PDI por parte del profesorado, las características de la PDI, el rendimiento y la motivación de los estudiantes. Según los resultados, las principales ventajas de la PDI son su naturaleza kinestésica, la convergencia de elementos multimedia y un entorno conectado. No obstante, se considera esencial una formación integral del profesorado y un contexto que facilite su uso para evitar su interrupción en el aprendizaje. La conclusión es que se necesita más investigación empírica para obtener datos rigurosos sobre el rendimiento académico y el uso de la PDI.

De acuerdo con lo mencionado, se puede evidenciar que la investigación y el desarrollo de pantallas digitales interactivas ha sido importante en los últimos años. El uso de tecnología infrarroja ha permitido construir sistemas de mesas táctiles, sistemas automáticos de monitoreo de comportamiento, pantallas interactivas de piso y pantallas táctiles. El impulso tecnológico en esta área ha potenciado una buena experiencia al usuario al momento de interactuar con este tipo de dispositivos electrónicos. En este contexto, el objetivo es lograr minimizar los costos de implementación y consumo de potencia para permitir que este tipo de sistemas sea accesible a mayor cantidad de usuarios.

Planteamiento del Problema

De acuerdo con la investigación realizada en Otavalo por Cala at al. (2018) los estudiantes pierden la atención frecuentemente en las aulas con las pizarras tradicionales. Esto genera que muchos alumnos no consigan retener o captar la información lo cual significa un problema a largo plazo. Una solución consiste en el uso de PDI's debido a que los educadores y estudiantes tienen percepciones muy positivas en su uso. Sin embargo, pueden resultar costosas para varias instituciones, ya que en el mercado se las puede encontrar desde el precio de $1099 USD (Amazon.com Inc., s.f.-a). Por ello, es necesario encontrar una solución más económica que brinde la flexibilidad para utilizarla tanto en el ámbito académico como en el potenciamiento de actividades físicas.

Justificación del Proyecto

En la actualidad, resulta indiscutible evidenciar como el uso de dispositivos digitales ha cambiado el paradigma en la forma de educarse, divertirse e incluso tratar ciertas deficiencias físicas y mentales de los seres humanos. Así, por ejemplo, en el ámbito de la educación, la existencia de una brecha en la forma de usar la tecnología entre educadores y estudiantes interfiere en la motivación del estudiante al ya no responder a la transmisión tradicional del conocimiento de acuerdo con la investigación realizada por Alegría (2020). Por otra parte, dentro del área de entrenamiento físico de acuerdo con el trabajo de Manuel (2018) las pizarras

interactivas digitales comerciales utilizadas sirven para entrenar desde la condición física hasta el entrenamiento de movimientos motrices. Lo más destacable de su uso, es la manera como con ayuda de las aplicaciones de dichas pizarras se logra dinamizar las actividades repetitivas evitando la monotonía y la falta de motivación en el entrenamiento físico.

En cuanto a la aplicabilidad en el área de terapia de salud mental, este tipo de sistemas han sido utilizados para evidenciar el beneficio de su uso. Por ejemplo, Moreno et al. (2018) realizó un estudio en donde con ayuda de una pizarra digital interactiva y tabletas móviles se desarrollaron talleres orientados hacia adultos mayores de entre los 78 a 97 años. Los resultados mostraron que los dispositivos digitales incentivan el interés de las sesiones y mejoran la atención, colaboración, autoaprendizaje, percepción, memoria y razonamiento de los adultos mayores.

Por estas razones, es necesario encontrar nuevos recursos metodológicos con un alto grado de interacción de nivel lúdico para evitar perder la atención o la motivación. Las actividades realizadas a través de aplicaciones divertidas e inmersivas provocan un mayor compromiso, interés y mayor dinamismo. De manera que se puede evidencia que la ludificación es una metodología que potencia el desarrollo de aptitudes de según Ortiz et al. (2018). Estas aptitudes pueden ser académicas o físicas. A través de soluciones digitales, usando una pantalla interactiva se obtiene la flexibilidad, que permite utilizarla en diferentes ámbitos.

El inconveniente del costo del uso de esta tecnología resulta el aspecto más importante a tratar, con el fin de permitir su uso a personas y entidades con recursos económicos limitados. Por esta razón, el desarrollar sistemas embebidos de bajo costo resulta fundamental en países en vías de desarrollo como el nuestro. En este sentido, el proyecto de investigación “Sistemas Ciber-Físicos para Entornos Inteligentes –SCEIN” busca desarrollar sistemas que permitan la integración e interacción de procesos en diferentes dominios de aplicación para la generación de entornos inteligentes, como soluciones de innovación tecnológica. En efecto, uno de los objetivos específicos del proyecto SCEIN es “Desarrollar sistemas de procesamiento

con características bio-inspiradas con alto nivel de adaptabilidad, usabilidad y eficiencia energética en las áreas de redes neuronales, aplicaciones IoT para la industria y Robótica Social.” El presente proyecto de titulación tiene como meta apoyar directamente con este objetivo, al proponer el desarrollo de un muro interactivo a bajo costo para diferentes tipos de aplicaciones sean lúdicas, de enseñanza o de terapia física.

Objetivos del Proyecto

Objetivo General

Diseñar e implementar un prototipo de bajo costo de un muro interactivo enfocado a aplicaciones de enseñanza lúdica, actividad física y terapia de salud mental.

Objetivos Específicos

- Seleccionar la plataforma de desarrollo de hardware y software para la solución propuesta.
- Diseñar y construir el muro interactivo con la respectiva instrumentación.
- Programar el controlador para procesar los datos de los sensores y determinar el posición de estímulo para visualizar cambios en la salida de video.
- Desarrollar tres escenarios virtuales que permitan evaluar el prototipo.
- Evaluar y optimizar el prototipo en términos de precisión, tiempos de respuesta, falsos positivos y experiencia del usuario.

Alcance

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo de muro digital interactivo que tenga al menos tres tipos de escenarios virtuales que ejemplifiquen el funcionamiento del sistema aplicables para el desarrollo mental y físico de la persona. Los escenarios serán uno de tipo lúdico, el segundo enfocado a la enseñanza y el tercero tendrá la finalidad de ser empleado en salud mental. Considerando que el presente proyecto busca ser un prototipo utilizado en aulas pequeñas u oficinas, se ha determinado que el usuario estará

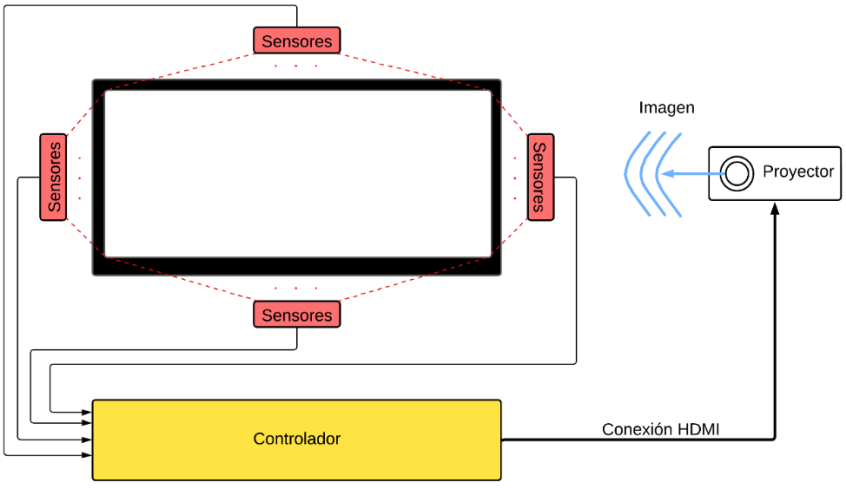
ubicado a una distancia entre 1 a 3 metros del marco. Esta distancia permite dimensionar la dimensión del muro interactivo.

Con estas consideraciones, se ha determinado que un tamaño de 72” de diagonal (1.82 m) resulta adecuado como prototipo. En cuanto a la relación de vídeo a implementarse, se ha optado por una relación de 16:9, la cual es ampliamente usada en la proyección de contenido audiovisual. Por otra parte, se pretende que el prototipo será utilizado en lugares que no se encuentren totalmente obscuros, por ello en la implementación se propone sensores ópticos en el espectro infrarrojo que permitirán simular un marco táctil para detectar la posición de objetos.

El prototipo será entonces, constituido por un marco equipado con los sensores ópticos tanto en las franjas verticales (filas) como en las horizontales(columnas). La información recopilada por los sensores será procesada por un controlador, quién en función de la interacción realizada por el usuario manejará los diferentes escenarios virtuales del sistema. Dicho controlador desplegará la imagen del escenario hacia un proyector externo mediante una comunicación HDMI. Es importante tomar en cuenta que, para satisfacer el criterio económico de la propuesta, el controlador deberá ser implementado a través de dispositivos de bajo costo. La Figura 1 proporciona una representación del modelo propuesto para el prototipo.

Figura 1

Diagrama de bloques del prototipo de MDI.



Una vez implementado el sistema, se realizarán las pruebas del sistema. Para ello se evaluará el mismo con diferentes métricas. Entre ellas se considerarán: la precisión, el consumo de potencia, el tiempo de respuesta, los falsos positivos, la usabilidad y el costo comparado con sistemas comerciales de similares características.

Organización del manuscrito

Como se mencionó anteriormente, este trabajo de titulación contribuirá al desarrollo de un prototipo de un muro digital interactivo de bajo costo. Este dispositivo se basa en una matriz de sensores ópticos y la proyección de escenarios virtuales. Para ello, en el Capítulo 2, se explicarán las tecnologías de pantallas táctiles, incluyendo sus características y tipos según la tecnología utilizada. Además, se examinarán los conceptos teóricos y características relacionadas con la Interacción Humano-Máquina, así como los dispositivos sensores y controladores. El Capítulo 3, se centrará en el diseño e implementación del sistema base del proyecto. Posteriormente, en el Capítulo 4, se abordará el diseño de los escenarios virtuales y su integración con el hardware. El Capítulo 5 detallará la evaluación del prototipo, incluyendo las pruebas funcionales realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo 6, se presentarán las conclusiones, recomendaciones y posibles direcciones para futuros trabajos.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos

En el presente capítulo, se explorarán conceptos esenciales para respaldar la investigación centrada en el diseño de un Muro Digital Interactivo (MDI) mediante tecnologías emergentes. Se destacará la tecnología infrarroja en pantallas táctiles por sus atributos ideales en aplicaciones interactivas. Además, se examinará la importancia de las Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) para facilitar la comunicación usuario-sistema, discutiendo principios de diseño y usabilidad para optimizar la experiencia del usuario.

El conjunto de sensores es crucial para el éxito de este proyecto, y por tanto será detalladamente explorado, enfocándose en los tipos de sensores ópticos, su funcionamiento y aplicaciones destacadas. En cuanto al sistema controlador del sistema se abordará nuevas tecnologías digitales. Así se propondrá el uso de Field Programmable Gate Array (FPGA) y Computadoras de Placa Única en el diseño ofrecerá una plataforma potente para algoritmos y procesamiento en tiempo real, describiendo sus principales características y aplicaciones. Finalmente, se examinará el Protocolo de Comunicación Serial Asíncrono Universal (UART) como componente clave para la comunicación serial entre dispositivos, resaltando su funcionamiento, flexibilidad y confiabilidad. Este capítulo sentará las bases teóricas necesarias, proporcionando un marco sólido para el diseño y desarrollo del sistema propuesto.

Tecnologías de Pantallas Táctiles

Las pantallas táctiles, también conocidas como pantallas sensibles al tacto, se pueden definir como una forma de interacción entre el ser humano y la máquina. Su funcionamiento se basa en el contacto directo del humano con una superficie sensible. Estas han evolucionado a lo largo de la historia y se han convertido en una parte integral de nuestras vidas. El concepto de una pantalla táctil se remonta a la década de 1960, cuando se realizaron los primeros trabajos en esta área.

Varios investigadores e ingenieros de diferentes países crearon los primeros prototipos y conceptos de pantallas táctiles. Entre ellos se destacan E. A. Johnson, quien en 1965 inventó

la primera pantalla táctil capacitiva en el Reino Unido; F. Beck y B. Stumpe, quienes en el año 1973 diseñaron la primera pantalla táctil óptica en el CERN; y G. Samuel Hurst, quien desarrolló la primera pantalla táctil resistiva en Estados Unidos en 1977 (Dang, 2018). Estos tres tipos de pantallas táctiles son los más comunes en la actualidad, y se diferencian por el principio físico que utilizan para detectar el toque sobre la superficie.

En Orphanides & Nam (2017) se resalta que las pantallas táctiles han ganado popularidad en diversos dispositivos, como teléfonos móviles y sistemas de información y entretenimiento en vehículos. También se menciona que la interacción táctil es una forma intuitiva y natural de interactuar con la tecnología, lo que la hace atractiva para los usuarios. Finalmente establece la importancia de la investigación en este campo para mejorar la usabilidad y la accesibilidad de la tecnología táctil.

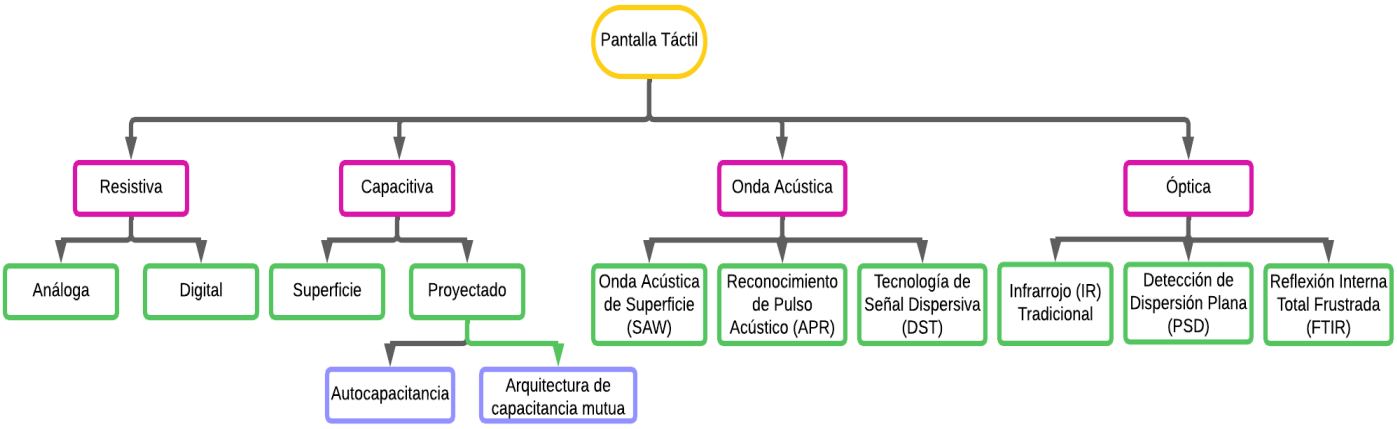
Clasificación

Existen diferentes tipos de tecnologías de pantallas táctiles, que se diferencian por el principio físico que utilizan para detectar el toque sobre la superficie. En Nam et al. (2021) se examinan las tecnologías más importantes de pantallas táctiles. A continuación, en el diagrama que se ilustra en la

Figura 2 se resume las distintas tecnologías de pantallas táctiles (resistivas, capacitivas, de onda acústica y ópticas) y sus subtipos.

Figura 2

Clasificación de tipos de tecnologías de pantallas táctiles.



Nota: Tomada de Nam et al. (2021)

Como se puede observar en el diagrama de la

Figura 2, se ha clasificado las tecnologías de pantallas táctiles en cuatro tipos principales: resistiva, capacitiva, onda acústica y óptica, cada una tiene sus ventajas y desventajas dependiendo del uso que se les vaya a dar. En la Tabla 1 se resumen las principales características y diferencias entre estas tecnologías indicando el grado de excelente, bueno, regular, malo o pésimo, de acuerdo a (ams-OSRAM AG, 2022).

Tabla 1

Resumen de las tecnologías de pantalla táctil y sus características

Características	**Resistiva**	**Capacitiva**	**Onda Acústica de Superficie**	**Basada en matriz de sensores infrarrojos**	**Basada en cámara infrarroja**	**Basada en proyector infrarrojo**
Calidad de claridad de imagen	Malo	Regular	Bueno	Excelente	Excelente	Excelente
Resolución	Bueno	Bueno	Regular	Malo	Excelente	Excelente
Rentable para pantallas más grandes	Malo	Malo	Malo	Malo	Excelente	Excelente
Resistencia al vandalismo	Malo	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Excelente
Estable calibración	Malo	Bien	Bueno	Excelente	Excelente	Excelente
Fácil de fabricar	Bueno	Regular	Regular	Bueno	Bueno	Bueno
Posibilidad de retro adaptación	Excelente	Regular	Malo	Excelente	Excelente	Malo
Cualquier objeto puede crear un estímulo	Regular	Malo	Regular	Excelente	Excelente	Excelente
Precisión táctil	Regular	Bueno	Bien	Regular	Excelente	Excelente

Características	Resistiva	Capacitiva	Onda Acústica de Superficie	Basada en matriz de sensores infrarrojos	Basada en cámara infrarroja	Basada en proyector infrarrojo
Capacidad multitáctil	Malo	Bueno	Regular	Bueno	Bueno	Bueno
Insensibilidad a luz ambiente	Bueno	Bueno	Bueno	Malo	Regular	Malo
Resistencia al polvo	Bueno	Bueno	Malo	Bueno	Excelente	Bueno
Mercado principal	p	m	m	m/l	m/l	p

Nota: Tamaño de pantalla: p: pequeña (2''-10''), m: mediana (12''-30''), l: larga (>32''). Tomada de: ams-OSRAM AG (2022).

Como se puede observar en la Tabla 1, algunas tecnologías son más sensibles, precisas o duraderas que otras, pero también pueden tener limitaciones como el consumo de energía, el costo o la interferencia de factores externos. La elección de la tecnología más adecuada dependerá de las necesidades y preferencias de cada usuario y aplicación. Para este proyecto, se va a elegir la tecnología infrarroja debido a las necesidades de uso del Muro Interactivo Digital. De forma específica, se optará por usar la tecnología óptica basada en una matriz de sensores de luz infrarroja (IR) para detectar el estímulo. Esta tecnología tiene la ventaja de ser muy resistente, de permitir el uso de múltiples puntos de contacto al mismo tiempo (multitouch) y de no requerir una capa transparente sobre la pantalla, lo que mejora el brillo y la calidad de la imagen. Además, la aplicación de la pantalla de matriz de sensores IR en el proyecto hará que el Muro Interactivo Digital tenga una buena visibilidad y una gran interactividad que es lo que se busca precisamente del proyecto.

Pantalla Táctil Infrarroja

Las pantallas táctiles infrarrojas son una tecnología innovadora que se basa en luz infrarroja para detectar la interacción del usuario. Estas tecnologías se encuentran entre las

superficies más duraderas y quizás las más versátiles. Debido a su durabilidad y alta calidad de imagen, las pantallas infrarrojas son ideales para aplicaciones y dispositivos de pantalla grande que requieren un uso interactivo (Hoye & Kozak, 2010). En el mercado existen varios tipos de pantallas que utilizan tecnología infrarroja, las cuales son las siguientes:

- Pantalla Táctil Basada en Cámara Infrarroja
- Pantalla Táctil Basado en Proyector Infrarrojo
- Pantalla Táctil Basada en Matriz de Sensores Infrarrojos

Pantalla Táctil Basada en Cámara Infrarroja. En esta tecnología, se emplean dos sensores de exploración de línea montados en las esquinas superiores izquierda y derecha del bisel de la pantalla. La pantalla se ilumina con luz invisible mediante Diodos Emisores de Infrarrojos (IREDs) ubicados a lo largo del escáner de luz. Estos IREDs están ópticamente aislados para evitar interferencias. Cuando se coloca un objeto en la pantalla, se produce un aumento en la señal de las celdas de detección pertinentes. La posición del objeto se calcula mediante un algoritmo de triangulación, y además proporciona información sobre el tamaño exacto del objeto colocado (Jagtap et al., 2018).

Pantalla Táctil Basada en Proyector Infrarrojo. En este enfoque, la imagen visible se proyecta desde la parte posterior sobre una pantalla difusa. Detrás de la pantalla, hay una o más cámaras infrarrojas para detectar la imagen infrarroja reflejada de la pantalla iluminada. La pantalla se ilumina mediante el uso de Diodos Emisores de Infrarrojos (IREDs). Cuando se coloca un objeto en la pantalla, la imagen infrarroja se refleja y la cámara detecta la ubicación del objeto (Jagtap et al., 2018).

Pantalla Táctil Basada en Matriz de Sensores Infrarrojos. Son un tipo de pantallas táctiles ópticas que usan una red de emisores y detectores de infrarrojos para crear una matriz de haces de luz sobre la superficie de la pantalla. Cuando un obstáculo, como un lápiz óptico o dedo, entra en la matriz, interrumpe los haces de luz, lo que resulta en una disminución de la corriente fotoeléctrica medida en los detectores, permitiendo obtener las coordenadas x e y.

Aunque este principio es eficaz para operaciones estáticas y movimientos, no es ideal para detección de movimientos de alta resolución, como el reconocimiento de escritura a mano (ams-OSRAM AG, 2022).

Después de explorar las distintas tecnologías infrarrojas disponibles es momento de hablar de la Interacción Humano Maquina que será esencial entender para saber cómo una vez aplicada esta tecnología en nuestro prototipo, este va a interactuar con el usuario final del MDI de manera eficiente.

Interacción Humano Máquina

Según Martínez de la Teja (2007) la Interacción Humano-Computadora (HCI) se centra en el estudio de cómo las personas y las computadoras pueden interactuar de manera efectiva para llevar a cabo tareas. La HCI se basa en una variedad de disciplinas, como ciencias físicas y sociales, ingeniería, arte, ciencias de la computación, psicología, matemáticas, artes gráficas, sociología, inteligencia artificial, lingüística, filosofía, antropología y ergonomía. La ergonomía desempeña un papel fundamental en la HCI, ya que busca mejorar el diseño de sistemas computacionales para lograr un uso más efectivo y eficiente. En este contexto, la ergonomía en HCI se enfoca en identificar aspectos de diseño y desarrollar principios, guías, métodos y herramientas para mejorar la interacción entre las personas y las computadoras.

Para Velazco & Garcia (2008) cuando un usuario interactúa con una herramienta o accede a un sistema informático, la interfaz actúa como el punto de convergencia y el espacio común entre el usuario y el objeto de interacción. Este elemento, que puede considerarse tanto un límite como un medio compartido, es esencial para la interacción con el entorno informático actual, que ofrece una diversidad de interfaces para diversas aplicaciones. La interfaz de un programa comprende elementos hardware y software que presentan información al usuario y facilitan la interacción con la máquina.

Habiendo explorado la dinámica de la HCI, profundizaremos ahora en las clasificaciones de las interfaces de usuario dado que desempeñan un papel elemental en la calidad de la

interacción humano-computadora. Son puntos de conexión esenciales entre los usuarios y la tecnología.

Clasificación interfaces de usuario

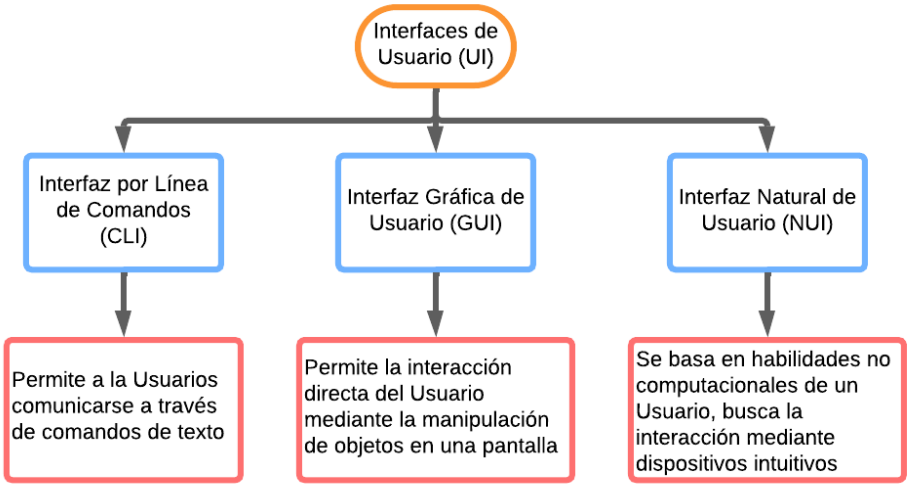
De Oliveira et al. (2013) destaca la importancia de la interfaz de usuario y su desarrollo histórico. De la misma manera, su investigación de la usabilidad a través de experimentos prácticos con interfaces CLI (Command Line Interface), GUI (Graphical User Interface) y NUI (Natural User Interface) nos lleva a la conclusión de que las interfaces informáticas han evolucionado significativamente y que las nuevas tecnologías pueden aprovechar esta tendencia. Los resultados obtenidos fueron relevantes para el análisis de las interfaces y su evolución histórica, y brindan nuevas oportunidades de investigación para mejorar aún más los resultados y cubrir nuevas tecnologías emergentes.

La

Figura 3 muestra la evolución de las interfaces táctiles y se puede concluir que las interfaces gráficas de usuario (GUI) mejoran la comunicación entre usuarios y máquinas al proporcionar una representación visual de la información y las acciones disponibles. La GUI se utiliza ampliamente en diversos campos, como sistemas operativos, aplicaciones informáticas, dispositivos móviles, videojuegos, etc.

Figura 3

Tipos de interfaces de usuario y principal característica



Nota: Tomada de Oliveira et al. (2013)

Interfaz Gráfica de Usuario

Para Arroyave et al. (2021) la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) es una herramienta informática que facilita la comunicación entre el humano y la computadora mediante el uso y el intercambio de elementos audiovisuales. También menciona que la GUI regula la interacción entre ambos elementos del sistema. Además, se enfatiza la importancia de las GUI en el contexto de la educación de los niños.

El trabajo de Fernández et al. (2001) manifiesta que el diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI) está indiscutiblemente ligado a la tarea en cuestión, el usuario, el entorno y la tecnología disponible. El objetivo principal de una GUI es facilitar la comprensión y aplicabilidad de ideas, conocimientos e información. Por tanto, su diseño se adapta al usuario, al entorno y a las tecnologías disponibles.

Así mismo, Fernández et al. (2001) enfatizan la importancia de un análisis detallado del usuario y del entorno para el éxito de la interfaz. La adaptabilidad a diferentes necesidades y niveles de experiencia es importante, así como la funcionalidad y la amabilidad. Obtener perfiles detallados, inquietudes clave de los usuarios y consideraciones de objetivos clave puede simplificar el diseño de la interfaz y guiar las decisiones sobre tecnología y contenido.

Las pruebas de funcionalidad y usabilidad y el análisis del flujo de información son esenciales para una interfaz eficaz.

Guías Generales de Diseño de GUI

A continuación, se presentan cuatro principios de diseño que, según Martínez (2011), son esenciales para garantizar la eficacia y amigabilidad de las interfaces gráficas de usuario (GUIs). Estos principios proporcionan pautas importantes que permiten a los diseñadores transformar interfaces complejas de interacción humana para que sean accesibles, efectivas y atractivas:

- Principio 1: "Enfóquese en los usuarios y sus tareas, no en la tecnología". Este principio destaca la importancia fundamental de comprender a quiénes están destinados los usuarios de la interfaz gráfica de usuario (GUI) y las tareas que deben realizar. Antes de iniciar el desarrollo de la GUI, se deben responder preguntas clave sobre los usuarios, las actividades que debe respaldar, los problemas que resuelve y las habilidades típicas de los usuarios. Aunque los desarrolladores de GUI en campos como estadísticas no siempre tienen usuarios específicos en mente, es crucial considerar estas preguntas desde la perspectiva del usuario para ahorrar tiempo en la codificación y el rediseño.
- Principio 2: "Considerar la función primero, la presentación después". Al crear una interfaz gráfica de usuario (GUI), a menudo surge la tentación de comenzar esbozando el diseño de la GUI con papel o alguna herramienta de diseño de GUI. Aunque esto es algo que se debe hacer eventualmente, los desarrolladores deben iniciar el proceso respondiendo algunas de las preguntas mencionadas anteriormente. Es crucial que los desarrolladores consideren el propósito y el papel de la GUI antes de realizar cualquier codificación. Se recomienda construir un modelo conceptual, que sea una representación del análisis (o producto) que los usuarios necesitan comprender.

- Principio 3: "Cumplir con la visión del usuario sobre la tarea y no complicarla demasiado". Los desarrolladores de software a menudo quieren que sus aplicaciones sean como deberían ser, lo que a menudo incluye animaciones llamativas y gráficos coloridos, así como controles de interfaz innecesarios. La idea principal detrás del diseño de una interfaz gráfica de usuario (GUI) es simplificarla para el usuario, no complicarla. Por tanto, es necesario volver a los primeros principios y conseguir que el usuario esté en el centro.
- Principio 4: "Estimular el aprendizaje y proporcionar información, no sólo datos". Las interfaces gráficas de usuario (GUI) se crearon principalmente para eliminar la necesidad de aprender lenguajes de programación complejos. Las GUI complejas frustran este propósito; deberían ser lo más simples posible. Se recomienda un diseño de GUI que sea fácil de usar y aprender, que agrupe los controles de usuario por función y proporcione información útil. Después de seguir estos principios (especialmente el primero), pasamos a crear un esquema de la GUI, teniendo en cuenta los flujos y procesos de tareas. También es beneficioso permitir que los usuarios potenciales revisen el diseño y brinden sugerencias antes de comenzar a codificar la GUI.

Sensores

Los sensores son parte fundamental para poder controlar cualquier proceso. Están definidos como cualquier dispositivo básico o complejo que tenga la capacidad de medir una variable física o química. Pérez (1996) define a un sensor como un “Dispositivo capaz de registrar de forma directa, continua y reversible un parámetro físico o la concentración de una especie química”. Existen una gran variedad de tipos de sensores para poder cubrir todas las magnitudes físicas/químicas, los más comunes son los sensores ópticos, de temperatura, de presión, electromagnéticos e inerciales.

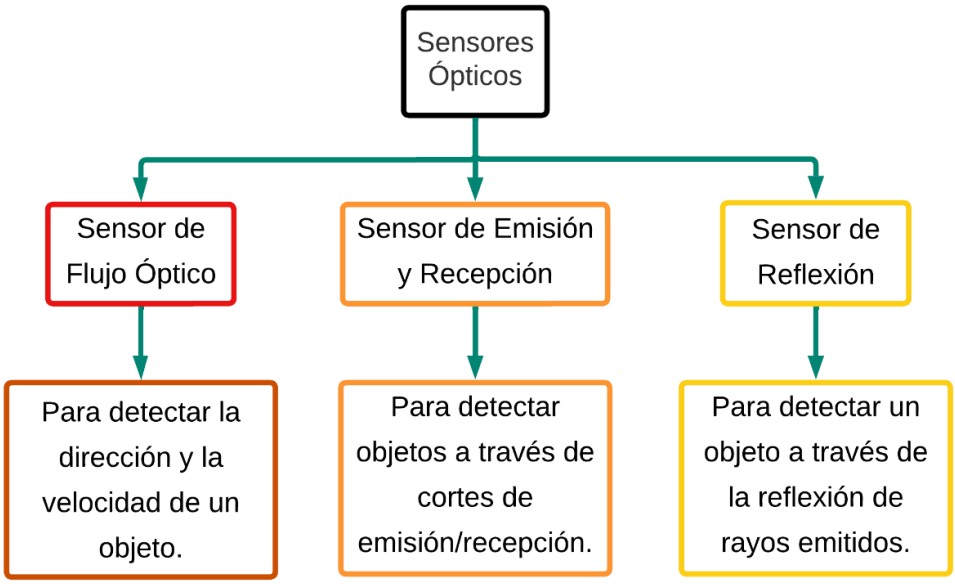
En el presente trabajo de titulación se explorará los sensores del tipo óptico, que son capaces de detectar y medir luz en diferentes regiones del espectro electromagnético. De acuerdo con Torres & Fernández (2011) estos se usan principalmente para detección de objetos. Además, tienen la ventaja de ser higiénicos y pueden ser usados en ambientes de condiciones duras ya que la detección se realiza sin necesidad de contacto con el objeto o variable a medir.

Clasificación

Los sensores ópticos se suelen clasificar de acuerdo al principio usado para la medición y por tipo de luz. De acuerdo al principio usado para la medición se clasifican en: flujo óptico, emisión/recepción y por reflexión. Las principales funciones de estos tipos de sensores ópticos se ilustran con más detalle en la Figura 4. En cuanto a la clasificación por tipo de luz, el presente trabajo detallará aquellos que funcionan en el espectro infrarrojo.

Figura 4

Clasificación Sensores Ópticos



Nota: Adaptado de Pérez (1996) y Torres & Fernández (2011)

Sensores infrarrojos

Son sensores que independientemente al principio de medición, detectan la presencia o la cantidad de la luz que se encuentra en el espectro infrarrojo, es decir, que está por debajo del espectro visible. Su funcionamiento puede ser pasivo al solo recibir radiación infrarroja emitida o reflejada por objetos externos, o puede ser activa cuando el mismo sistema emite luz infrarroja para luego ser medida por un receptor (Electricity Magnetism: Sensores Infrarrojos, 2023). Según Bastian (2001) los receptores más comunes son fototransistores, los cuales, están hechos de un material piroeléctrico sensible a diferentes longitudes de onda de luz. El material piroeléctrico genera portadores eléctricos al recibir luz, y esta carga generada en la base de un transistor, lo lleva al estado de conducción. En cuanto a los emisores de luz, los más comunes son los diodos LED infrarrojos. Estos convierten la corriente eléctrica en fotones de luz que se irradian en la juntura PN. Los diodos LED infrarrojos se componen de cristales mixtos, donde el material semiconductor y el dopado determinan el espectro de luz irradiado.

Por ejemplo, para una longitud de onda de luz infrarroja de 930 mm se utiliza semiconductor Arsenio de Galio y de dopado Silicio.

Aplicaciones con Sensores Infrarrojos

De acuerdo con Electricity Magnetism (2023), estos sensores han tenido una gran importancia dentro de la vida cotidiana de las personas. Así, por ejemplo: en las cocinas de inducción donde se puede medir la temperatura sin contacto directo, en los teléfonos inteligentes para control de proximidad o reconocimiento facial, o simplemente en el control remoto de la televisión. Por otra parte, en el área de medicina se utilizan en: la medición de temperatura corporal, circulación sanguínea y en la detección de variaciones de nivel de glucosa en la sangre. Otro campo emergente en el cual se ha estado utilizando esta tecnología es en la industria automotriz donde se los utiliza para detección de objetos en los puntos ciegos y en pruebas para la conducción autónoma. Estos sensores son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, si bien su funcionamiento es sencillo, para su correcta utilización es necesario de un controlador electrónico que interprete y analice los datos.

Controladores

El uso de controladores electrónicos en los procesos ha ido incrementando para sustituir a los dispositivos manuales o mecánicos. Ya que permiten mejorar el tiempo de respuesta, reducir errores y minimizar las actividades que deben ser supervisadas constantemente. El incremento de necesidades en los distintos procesos ha motivado la evolución de los controladores electrónicos. Existiendo al momento diferentes tipos de controladores de acuerdo al uso, a la tecnología, al consumo de potencia, a los dispositivos que quiere medir o controlar, entre otros. En la actualidad, los controladores están diseñados dependiendo de los requisitos específicos de la aplicación. Así, por ejemplo:

- Microcontroladores: Utilizados especialmente en sistemas embebidos con aplicaciones específicas. Donde no se requiere grandes capacidades de memoria y el sistema pueda ser controlado por los módulos que incluye el

microcontrolador, que combina los recursos fundamentales disponibles en un microcomputador, más conversores ADC y DAC, temporizadores y comunicaciones seriales y paralelas. Una característica fundamental es que son frecuentemente utilizados para sistemas de bajo consumo energético y bajo coste económico (Valdés y Areny, 2007).

- Microprocesadores: Diseñados para aplicaciones de propósito más general, por lo que se ejecutan diferentes tipos de tareas con mayor flexibilidad. Su arquitectura abierta permite expandir en uso de periféricos variados y de expandir la capacidad de memoria. Adicionalmente, son utilizados para implementar sistemas multitareas con alta escala de integración (Tokheim, 1990).
- Dispositivos Lógicos Programables: La gran diferencia en este dispositivo reside en que su hardware es configurable por el usuario, pudiendo existir incluso una reconfiguración durante la ejecución de las tareas. Son diseñados para aplicaciones de gran flexibilidad que requieran un diseño personalizado de hardware y para la validación de prototipos que serán luego implementados en silicio. Además, son utilizados cuando se necesita ejecutar múltiples tareas en paralelo, por lo cual en términos de rendimiento suelen ser más eficientes. (Hernández, 2011).
- Computadores de Placa Única: Como su nombre lo indica, son dispositivos que empotran un computador completo en una sola placa. Es decir, incluyen procesador, memoria RAM, entradas/salidas, almacenamiento y procesador de gráficos. Sus prestaciones son menores que una máquina de escritorio, sin embargo, por su costo y consumo energético son muy apreciadas en aplicaciones que requieren implementarse sobre un sistema operativo. Es decir,

son microcomputadores con sistema operativo que ofrecen mayor complejidad y capacidad de cómputo que un sistema microcontrolado (Raspberry Pi Ltd, s.f.).

Dispositivos Lógicos Programables

Los dispositivitos lógicos programables o también llamados PLD, como se indicó anteriormente, son circuitos digitales reconfigurables. Esta característica permite que se pueden integrar varias funciones en un solo chip evitando el uso de múltiples chips con cableado externo. Hernández (2011) menciona que, aunque las primeras generaciones eran programadas una sola vez, hoy en día estos dispositivos pueden cambiar de diseño durante su uso en campo y no solamente en la fábrica. A continuación, se describe una clasificación de dispositivos lógicos programables.

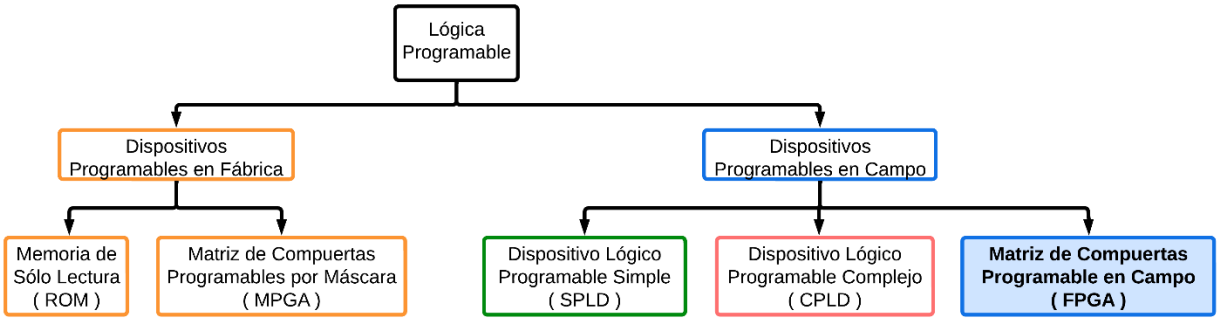
Clasificación. La clasificación mostrada en la Figura 5 divide a los dispositivos programables según su programación en fábrica o en campo. Siendo los más apetecidos en la actualidad, los programables en campo por su capacidad de ser reconfigurados por el usuario. Al comienzo de la década de 1970 los primeros dispositivos programables en campo estaban basados en compuertas AND y OR. Con el tiempo, surgieron los arreglos lógicos programables y los arreglos de compuertas programables.

Posteriormente surgieron los dispositivos lógicos programables complejos (CPLDs), los cuales, por el avance de la tecnología su circuito integrado incorporó varios de estos arreglos de compuertas junto con flip-flops. Con estos dispositivos el siguiente avance fue la Matriz de Compuertas Programables en Campo (FPGA) la cual fue desarrollada en la década de los ochenta, por parte de la empresa Xilinx. La FPGA se caracterizó por la adición de interconexiones programables, permitiendo al usuario programar las conexiones entre los diferentes bloques programados. Con el transcurro del desarrollo de las FPGA’s se integró funciones como la memoria RAM, controladores de reloj e incluso bloques embebidos de procesadores dentro del mismo chip (Hernández, 2011). Las principales empresas dedicadas a

la investigación y fabricación de dispositivos lógicos programables son Xilinx, Altera, Microchip y Atmel.

Figura 5

Clasificación de Dispositivos de Lógica Programable



Nota: Tomado de Hernández, 2011.

Matriz de Compuertas Programable en Campo (FPGA). Citando a Zeidman (2009) se explica que los FPGA son circuitos integrados que contienen bloques lógicos configurables, bloques de entradas/salidas configurables e interconexiones programables. Adicionalmente, dependiendo del fabricante pueden poseer una arquitectura con más complementos como circuitería para llevar señales de reloj a los bloques lógicos, como también ALU's, bloques de memoria y decodificadores. Marín de la Rosa, (2007) señala que para su descripción se utilizan lenguajes de descripción de hardware (HDL) estándar como: VDHL, Verilog y ABEL. Sin embargo, para poder realizar la síntesis se requiere de la descripción del dispositivo donde se va a ejecutar y por ello cada fabricante tiene sus herramientas de programación, compilación, análisis, depuración y síntesis.

Aplicaciones. Por su gran flexibilidad sus aplicaciones se encuentran en una gran variedad de industrias. En la aviación se lo utiliza para el control de sistemas de motores, manejo de los sistemas de iluminación, sistemas de aterrizaje y control de sistemas de vuelo (Microchip Technology Inc., s.f.-a). En la industria medica son utilizados en el área de procesamiento de imágenes, sistemas de ultrasonidos 3D y sistemas de rayos X (Microchip

Technology Inc., s.f.-b). En la industria de manufactura se usan en el control de robots, automatización de procesos, en procesamiento de imágenes de redes neuronales y como dispositivos de expansión o comunicación con controladores lógicos programables (PLC) (Intel Corporation, s.f.).

Computadores de Placa Única

Los computadores de placa única, como se mencionó anteriormente, son computadores que integran todos sus componentes dentro de una misma placa, a diferencia de las computadoras de escritorio donde se suele tener diferentes conectores para cada componente. Las SBC, al igual que las computadoras tradicionales, admiten la instalación de sistemas operativos y pueden ser programados en una amplia variedad de lenguajes de alto nivel como Python, C++, Java, etc. La principal ventaja de estos dispositivos radica en su tamaño compacto y asequibilidad. Sin embargo, se ven limitados en términos de escalabilidad ya que no se pueden aumentar sus capacidades (RS Components Ltd., 2023). Las SBC's dependiendo del fabricante pueden integrar diferentes interfaces o componentes, pero por lo general al menos contienen las siguientes:

- Procesador
- Memoria RAM
- Almacenamiento
- GPU: Comúnmente integrada dentro del procesador.
- Conectividad: Ya sea puertos ethernet o wifi para conexión a redes y puertos USB para conexión de periféricos.
- Entradas/Salidas: Ya sea puertos GPIO o puertos de salida de video.

Aplicaciones. Por su versatilidad las SBC's tienen aplicaciones dentro de diferentes áreas, por ejemplo, Raspberry Pi Ltd (2023) sugiere su uso en media Centers, media players, servidores Web, Servidores VPN, monitoreo estaciones meteorológicas, aplicaciones IoT y

sistemas de control y monitoreo de granjas hidropónicas. En el área de generación y distribución de energía eléctrica, las SBC’s se utilizan para el monitoreo y la comunicación entre “Smart Grids”, así como el monitoreo de bancos de condensadores y transformadores (Gateworks Corporation, s.f.). En la automatización de fábricas, las SBC’s se emplean para ejecutar algoritmos de machine learning que detectan comportamientos anormales de la maquinaria y analizan patrones que se estén dando (Gateworks Corporation, s.f.). Por lo general las SBC’s son elementos integrados con otros dispositivos para proporcionar interfaces gráficas y garantizar el control de la aplicación, los ejemplos de su uso pueden ir desde máquinas tragamonedas hasta el reemplazo de controladores en fábricas que requieren un alto nivel de flexibilidad (Texas Instrumetn Incorporated, 2018).

Un parámetro fundamental al momento de seleccionar un dispositivo es tomar en cuenta los protocolos de comunicación que requiere el sistema. Estos protocolos dependerán de los sensores, actuadores u otros dispositivos que van a ser interconectados con el controlador. Otros factores importantes a considerar al momento del diseño de la aplicación son las condiciones del entorno como: nivel de ruido, interferencia electromagnética, caídas de tensión debido a las distancias de conexión, entre otras. A continuación, se va a ampliar en este aspecto.

Comunicación entre Dispositivos

En el ámbito de la transmisión de información, es común la necesidad de comunicar datos procesados a otros dispositivos. Para la comunicación de estos datos se requiere al menos un transmisor que envíe la información y un receptor que la reciba. Con la finalidad de garantizar una transmisión efectiva, es importante establecer el medio físico a través del cual se transmitirán los datos, definir el tipo de comunicación y establecer un protocolo adecuado. A continuación se enlistan los diversos tipos de comunicación que pueden aplicarse.

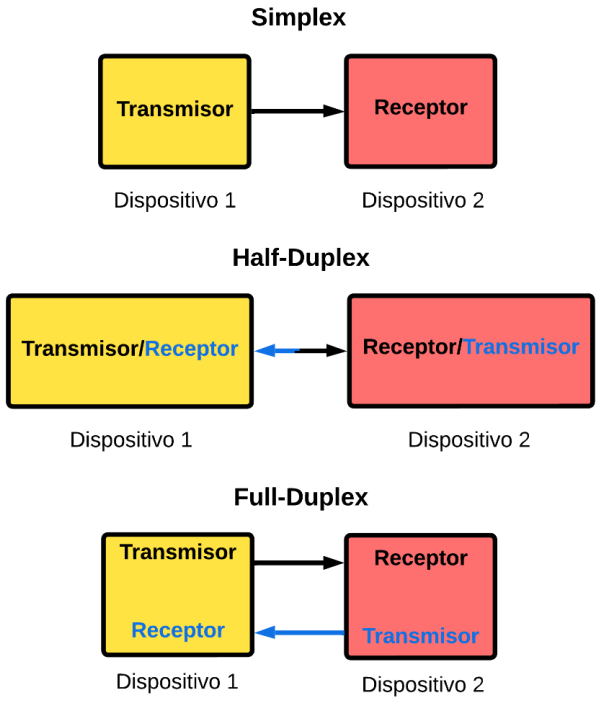
Clasificación. La comunicación se la puede clasificar de diferentes maneras: ya sea por la dirección del intercambio de información (Véase Figura 6), por el tipo de sincronización entre transmisor-receptor (Véase

Figura 7) o por la cantidad de bits enviados simultáneamente (Véase Figura 8). Es importante recalcar que no existe un modo de comunicación mejor que otro ya que su uso dependerá de las necesidades específicas de la aplicación.

Dependiendo del intercambio de información entre los dispositivos, la comunicación puede ser de tipo Simplex**,** Half Duplex y Full Duplex. En Simplex, el receptor solo recibe datos y el transmisor solo envía datos, maximizando la utilización del canal de comunicación sin incurrir en problemas de tráfico de datos, pero careciendo de intercomunicación entre los dispositivos. En Half Duplex, los datos pueden ir en ambas direcciones, pero solo en una dirección a la vez. En esta se tiene comunicación bidireccional con un uso óptimo del canal de comunicación, pero no hay comunicación bidireccional simultánea por lo que pueden existir posibles retrasos en la transmisión. En Full Duplex, los datos pueden ir en ambas direcciones al mismo tiempo a una alta velocidad de transmisión. El inconveniente puede darse cuando se incurre en un uso incorrecto del ancho de banda del canal, ya que se divide en dos.

Figura 6

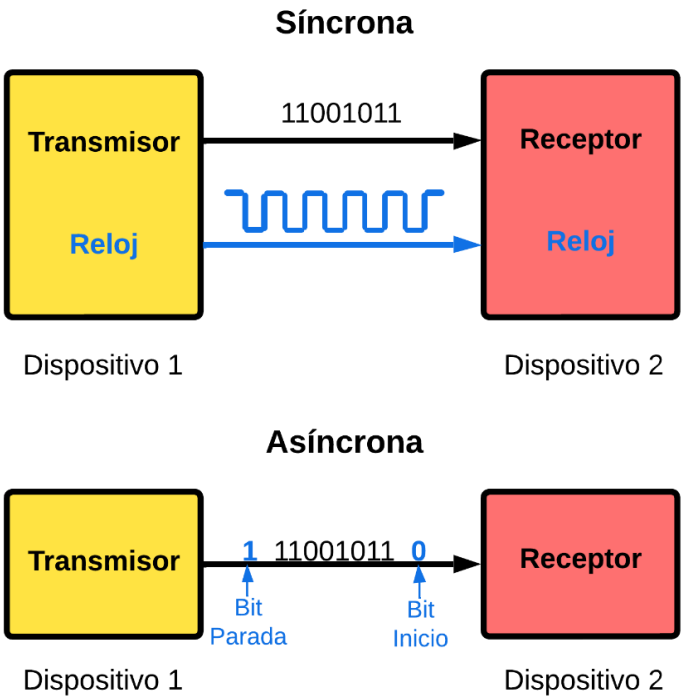
Clasificación de acuerdo con la dirección del intercambio de información



En cuanto al tipo de sincronización se clasifica en comunicación Síncrona y Asíncrona. La síncrona implica enviar bits de datos una tras otro sin necesidad de agregar bits de inicio/parada o huecos entre ellos. Esta destaca por ser una transmisión de alta velocidad a costa de ser más costosa. Por otro lado, la comunicación asíncrona utiliza bits de inicio/parada o huecos entre datos con el fin de ser más económica, pero posee una menor velocidad de transmisión en comparación con la síncrona.

Figura 7

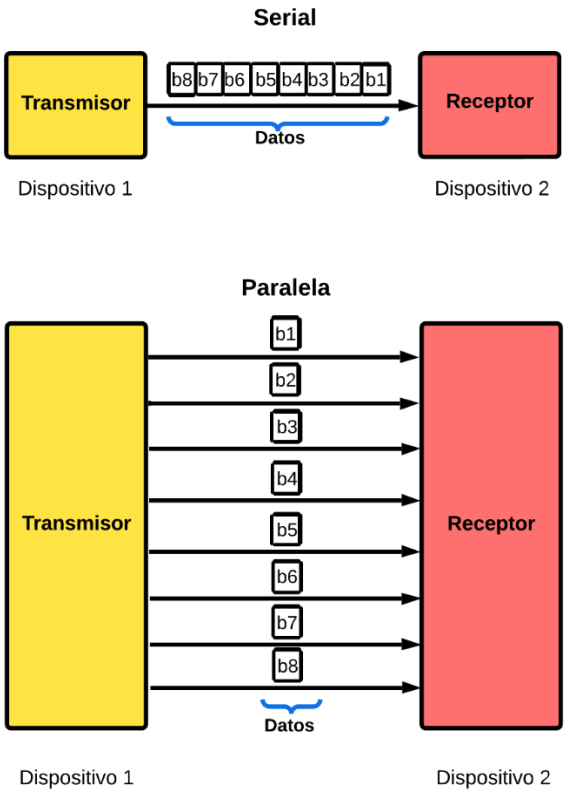
Clasificación de acuerdo con el tipo de sincronización entre transmisor-receptor



Dependiendo del número de bits enviados, la comunicación se clasifica en serial y paralela. La comunicación serial transmite bits uno tras de otro como si fuera una fila, ocasionando una relación costo-eficiencia muy bueno. Además, ofrece transmisión muy fiable a largas distancias, pero se pierde velocidad de transmisión. Por otro lado, la comunicación paralela transmite los bits de datos a la vez en paralelo, siendo más fácil de implementar y ofreciendo una alta velocidad de transmisión. Aunque esto provoca una mayor interferencia y un mayor costo por requerir más canales de transmisión.

Figura 8

Clasificación de acuerdo con el tipo de sincronización entre transmisor-receptor



Protocolo de Comunicación Serial Asíncrono Universal (UART). El protocolo UART requiere solo de un cable para una comunicación Simplex o Half-Duplex , en tanto que requiere de dos cables para una comunicación Full-Duplex. No necesita un reloj común entre los dispositivos, ya que es una comunicación asíncrona. Por este motivo se debe establecer una velocidad de intercambio de datos para garantizar el correcto funcionamiento de la comunicación.

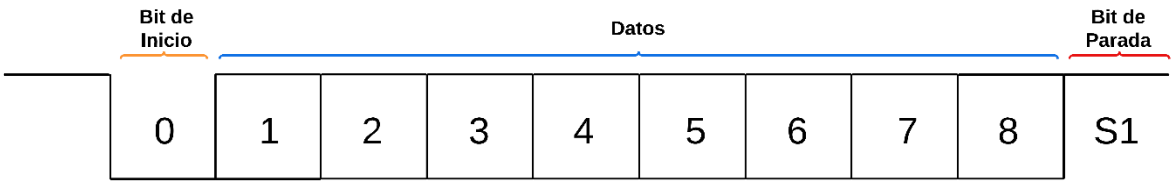
En este protocolo cuando el transmisor está inactivo, el canal de comunicación tiene un valor lógico alto. Para iniciar la transmisión el canal cambia a un valor lógico bajo, este cambio es el llamado bit de inicio. El bit de inicio indica al receptor que un dato está a punto de ser enviada y sincroniza el reloj del receptor a la velocidad de transmisión. Después del bit de inicio, se envían los bits de datos una tras otro comenzando desde el bit menos significativo

(LSB). Cada bit se transmite exactamente durante la misma cantidad de tiempo por lo que el receptor muestrea el canal de comunicación aproximadamente en la mitad del período para determinar si el bit es un valor lógico alto o bajo. Por ejemplo, si el transmisor envía un bit cada segundo, entonces el receptor hará el muestreo del primer bit al medio segundo y luego revisará cada segundo para coincidir con la mitad de cada periodo. Al finalizar de enviar el dato, el transmisor puede o no enviar un bit de paridad para que el receptor compruebe posibles fallos en el dato transmitido. A continuación, el transmisor finaliza con el bit de parada, que suele tener un valor lógico alto (PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN SPI/I2C/UART/UART, 2018). Para una mejor comprensión del protocolo se puede ver la

Figura 9.

Figura 9

Formato Trama Enviada en Protocolo UART



Como se mencionó anteriormente, UART no utiliza un reloj común por lo que la sincronización se gestiona manteniendo la misma velocidad en baudios en ambos dispositivos. Las velocidades más habituales en UART son 4.800, 9.600, 19.200, 57.600, y 115.200 bps. De acuerdo con el protocolo se permite una diferencia de hasta el 10% en la velocidad en baudios antes de que la sincronización de los bits genere fallas. Además de tener la misma velocidad en baudios, tanto transmisor como el receptor deben utilizar la misma estructura y parámetros de trama para evitar fallos en la comunicación. Este protocolo de comunicación es ampliamente usado por su versatilidad, costo y eficiencia.

En conclusión, en este capítulo se han abordado los conceptos fundamentales para el desarrollo del trabajo de titulación. Conceptos que servirán como principios base para el diseño de la solución propuesta. Dicha propuesta se detalla en el siguiente capítulo.

Capítulo 3: Diseño e Implementación de la Plataforma de Hardware

Este capítulo describe el diseño y la implementación de la plataforma de hardware sobre la que se desarrollará el muro interactivo. Se iniciará con el esquema general de la propuesta, luego se analizará en detalle cada bloque del sistema. Finalmente, se presentará la implementación del hardware completo del sistema.

Consideraciones del Sistema

Como se mencionó anteriormente, se pretende que este prototipo sea utilizado en aulas pequeñas u oficinas. Es decir, el usuario estará ubicado en distancias entre 1 a 3 metros del marco. Con estas consideraciones, se determinó un tamaño de pantalla de 72” de diagonal, con una relación de 16:9. Por otra parte, en cuánto a la iluminación ambiental, se prevé utilizarlo en ambientes con baja o media iluminación menor a 600 luxes lugares que no se encuentren totalmente obscuros, por ello en la implementación se propone sensores ópticos en el espectro infrarrojo.

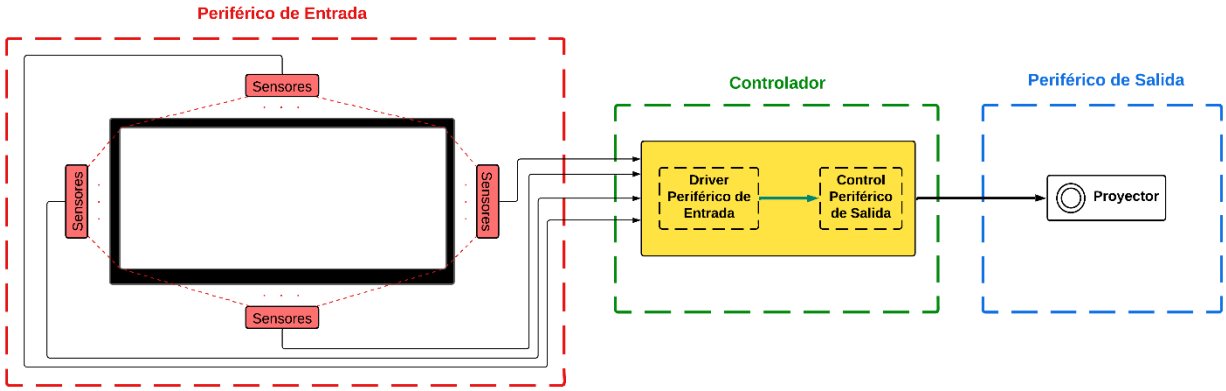
Adicionalmente, se busca que el prototipo tengo un consumo de potencia menor a un sistema implementado con un computador portátil o de escritorio; siendo menor a15 watts para optimizar la eficiencia energética. Finalmente, en términos de costos, considerando que un sistema comercial cuesta alrededor de 6.000 USD, se pretende que sea mucho menor, es decir 10 veces menor.

Esquema General

Como se puede ver en la Figura 10, la plataforma de hardware se divide en 3 partes: Periférico de entrada, controlador y periférico de salida. El periférico de entrada es la parte de la plataforma que constituye el hardware de sensores que permitirá al controlador determinar la posición de la pantalla que fue tocada por el usuario. Para ello se ha previsto trabajar con una matriz de fotosensores montados en un marco fijo. Para determinar la distancia entre sensores es necesario considerar la tecnología y los parámetros de haz de los sensores.

Figura 10

Diagrama de Bloques de la plataforma de hardware



El controlador es el dispositivo central del sistema que determina la posición del estímulo, así como la acción a ejecutarse ante un determinado estimulo. Debido a que la resolución de la posición del estímulo es determinada por la distancia y el número de sensores, se ha previsto trabajar con algunas decenas de sensores. Dada la necesidad de monitorizar un gran número de entradas, el sistema requiere de un dispositivo capaz de monitorizar muchas señales provenientes de los sensores, de manera simultánea. Este driver codificará el punto tocado y enviará la información hacia un dispositivo que es el encargado de gestionar la aplicación de software para el despliegue de los escenarios por el periférico de salida. Es decir, se prevé que el sistema controlador conste de dos dispositivos: el driver periférico de entrada y el controlador del periférico de salida.

Se ha previsto que el periférico de salida apropiado para el sistema sea un proyector comercial. Este proyecto contempla recomendar las características del proyector para tener un buen rendimiento del sistema. Las especificaciones serán detalladas en una sección posterior.

Periférico de Entrada

Los requisitos mínimos para determinar los sensores que se utilizarán en el periférico de entrada son los siguientes: a) los sensores deben detectar presencia sin necesidad de tener

contacto y, b) deben ser de bajo consumo de potencia. El parámetro de consumo de potencia estará condicionado por el número de sensores.

El proceso de este diseño comienza con la selección del tipo y modelo de sensor óptico. Como se indicaó en el capítulo 2, sección tecnologías de pantallas táctiles, este proyecto utilizará sensores del tipo emisor/receptor en el espectro infrarrojo. Esta selección se fundamenta en la necesidad de evitar interferencias con la luz visible emitida por el proyector. Además, estos sensores destacan por su bajo consumo energético, durabilidad y vida útil. Para la selección del modelo se llevaron a cabo consultas sobre las características de diversos sensores infrarrojos comerciales. Estas características se presentan de manera detallada en la Tabla 2, donde se realiza una comparación para determinar el modelo que se ajusta con el presente trabajo de titulación.

Tabla 2

Tabla comparativa entre varios sensores infrarrojos en el mercado

Criterios	**IR 940nm**	**Módulo IR de sensor infrarrojo para Arduino**	**Interruptor fotoeléctrico de infrarrojos**	**Sensor de Distancia por Infrarrojos**
Precio (USD)	Desde $0.70[a]	Desde $0.87[c]	Desde $13[d]	Desde $13[e]
Angulo de Visión	Receptor: 45°	Receptor: 35° [c]	Receptor: 15°[d]	Receptor: 15°[e]
Dimensiones	4.33" x 0.59"[b]	1.22" x 0.55" x 0.08" [c]	5.51" x 3.7" x 1.5"[d]	0.25" x 0.25" x 0.23"[e]
Voltaje de trabajo	Emisor: 1.3V [b] Receptor: 2.7V - 5.5V [b]	3V - 5V [c]	5V[d]	4.5V - 5.5V[e]

Criterios	IR 940nm	Módulo IR de sensor infrarrojo para Arduino	Interruptor fotoeléctrico de infrarrojos	Sensor de Distancia por Infrarrojos
Voltaje Directo	Emisor: 0.9V - 1.4V [b]	---	---	---
Corriente Directa	30mA [b]	---	---	---
Salida Digital	NO [b]	SI [c]	NO[d]	NO[e]
Distancia de Detección	1200cm [b]	2cm - 30cm [c]	30cm - 80cm[d]	100cm - 550cm[e]

Nota. [a]Recuperado de Amazon (2023) por Amazon.com, Inc. [b]Vishay Semiconductors (2024). [c]Nawazi (2020). [d]ETT CO., LTD. (s.f.).[e]Core Electronics (s.f.)

Tras un análisis cuidadoso de los datos recopilados en la Los requisitos mínimos para determinar los sensores que se utilizarán en el periférico de entrada son los siguientes: a) los sensores deben detectar presencia sin necesidad de tener contacto y, b) deben ser de bajo consumo de potencia. El parámetro de consumo de potencia estará condicionado por el número de sensores.

El proceso de este diseño comienza con la selección del tipo y modelo de sensor óptico. Como se indicaó en el capítulo 2, sección tecnologías de pantallas táctiles, este proyecto utilizará sensores del tipo emisor/receptor en el espectro infrarrojo. Esta selección se fundamenta en la necesidad de evitar interferencias con la luz visible emitida por el proyector. Además, estos sensores destacan por su bajo consumo energético, durabilidad y vida útil. Para la selección del modelo se llevaron a cabo consultas sobre las características de diversos sensores infrarrojos comerciales. Estas características se presentan de manera detallada en la

Tabla 2, donde se realiza una comparación para determinar el modelo que se ajusta con el presente trabajo de titulación.

Tabla 2, se determinó que la mejor es optar por emisores y receptores simples de infrarrojos de 940 nm. Estos sensores ofrecen un alcance de detección de 12 metros, una capacidad que supera ampliamente el alcance previsto de no mayor a dos metros de distancia. Su coste y amplia disponibilidad en el mercado respaldan aún más esta elección en el contexto de los objetivos del proyecto.

Diseño del Marco

Para el diseño del marco se considerará que el marco debe tener una dimensión mínima de 72” en diagonal. Tomando en cuenta que una relación de aspecto de 16:9 es ideal y común en la proyección de contenido audiovisual, se ha previsto utilizarla para este proyecto. Por lo que la dimensión para el área de contacto del muro interactivo es de 85 cm de alto por 160 cm de largo, lo que resulta en aproximadamente 72 pulgadas en diagonal. Dado que los sensores serán colocados en el interior del marco, es importante considerar un grosor de marco adecuado, en este caso de 5 cm, para facilitar tanto la instalación de sensores como el cableado hacia los sensores. Estas dimensiones se han modelado en 3D en la plataforma Tinkercad, las cuales se muestran en la Figura 11 y Figura 12.

Figura 11

Dimensiones del marco del MDI mostrados en el modelo 3D

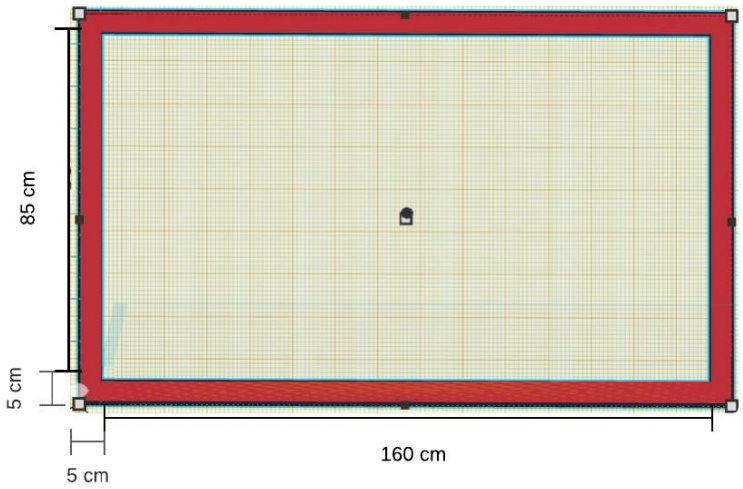
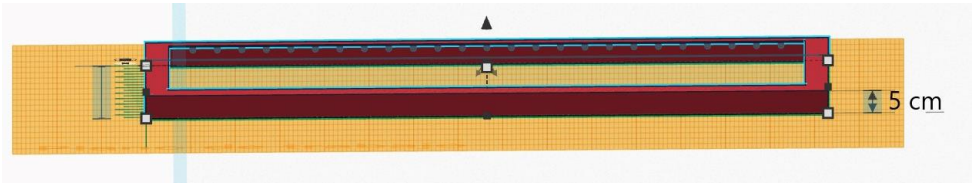


Figura 12

Dimensiones del grosor del marco para el MDI



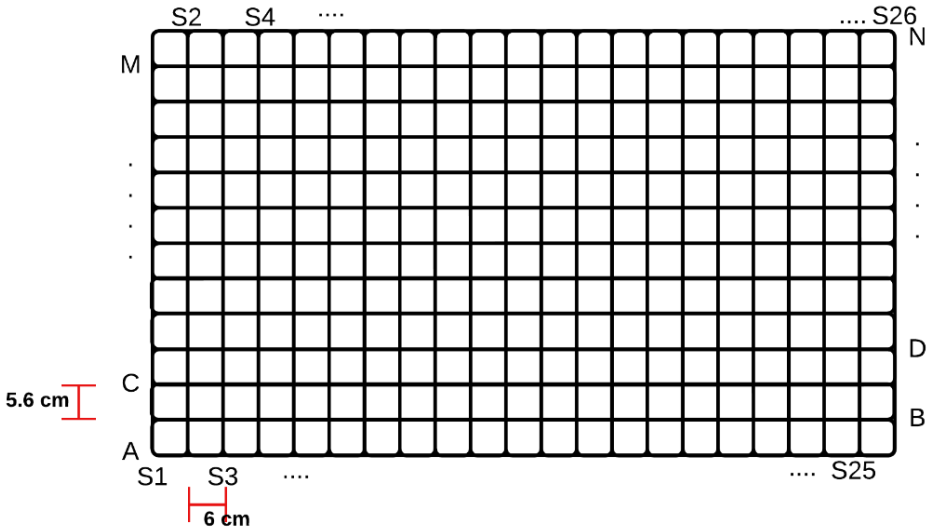
Con las dimensiones del marco se procede a establecer el espaciado entre los sensores. Es vital el diseño del espaciado y distribución para evitar interferencias entre ellos. Mediante pruebas realizadas se encontró que la mejor distribución es una cruzada, es decir que si el primer sensor del lado izquierdo es un receptor el siguiente debería ser un emisor y el siguiente a este nuevamente un receptor. En cuanto al espaciado, las pruebas definieron una distancia mayor a 5 cm entre cada sensor.

Con estas consideraciones, se tiene a los sensores en una matriz rectangular con filas y columnas pares. Se propone que horizontalmente exista una separación de 6 cm entre sensores, en tanto que verticalmente la separación será de 5.6 cm. Quedando configurado el sistema de manera que se instalarán 14 sensores de manera vertical (14 filas) y 26 sensores de manera horizontal (26 columnas), es decir un total de 40 sensores. En la Figura 13 se puede

ver la matriz propuesta con su respectiva distribución y espaciamiento. Además, el espaciamiento propuesto se puede visualizar en el modelado 3D mostrado en la Figura 14.

Figura 13

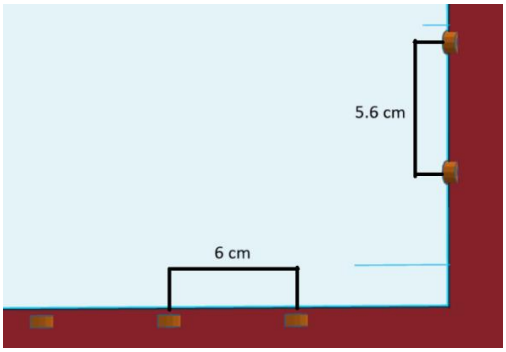
Matriz de sensores



Nota: Cada letra representa los receptores de cada sensor vertical y la numeración de S representa cada receptor horizontal.

Figura 14

Separación de cada sensor infrarrojo que van a estar distribuidos alrededor del marco

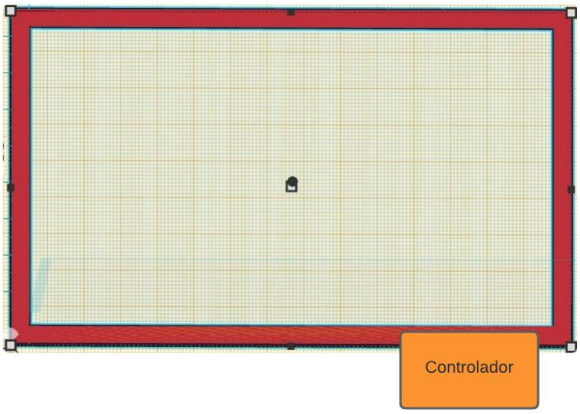


Las separaciones mostradas en la Figura 14 deben ser lo más precisas posible, para evitar problemas de alineación que afecten al funcionamiento. Finalmente hay que mencionar que en la parte inferior derecha del marco se instalará una caja, la cual contendrá el controlador

de todo el proyecto. Esta caja tendrá las dimensiones de 45cmx18cmx9cm, la posición dentro del modelo 3D se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Modelo 3D del marco junto con la caja



Diseño del Circuito de los Sensores

Para el diseño de los circuitos de acoplamiento de los sensores infrarrojos del tipo emisor-receptor seleccionados, se estableció un voltaje de alimentación de 3,3 V. Además, dado que la ubicación de los receptores y de los transmisores está físicamente separada se ha procedido a dividir en el circuito correspondiente al receptor y aquel correspondiente al emisor.

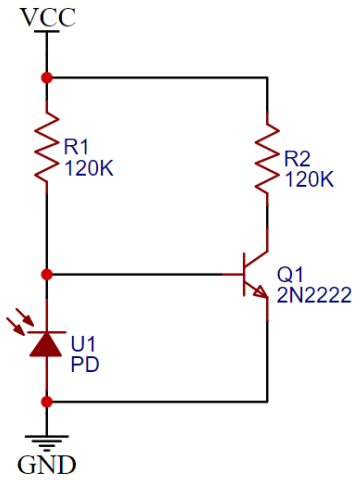
Circuito Receptores Infrarrojos. Para este circuito es requerido que a la salida se tenga dos estados: presencia del haz de luz infrarroja, representada por 3,3 V, y sin presencia del haz de luz infrarroja, representada por 0 V. Además, se calibrará el circuito a distancias superiores de 1,6 metros para evitar problemas de falsos negativos. El diseño propuesto del circuito tiene al fotodiodo operando en modo fotovoltaico de acuerdo con su curva característica.

Como se puede ver en la Figura 16 el circuito consta de dos resistencias, donde R1 se utiliza como resistencia de calibración, mientras que R2 actúa como resistencia “pull-up” para asegurar un estado conocido de la señal. Como en todo arreglo pull-up, la señal digital será tomada del colector del transistor. Además, R2 servirá para el control de la corriente de dicha

señal por lo que es importante ajustar el valor de R2 lo suficiente alto, pero sin afectar a la calidad de la señal. Esto se lo realiza para evitar un consumo excesivo de energía, dado que este circuito será replicado para los 40 receptores. Mediante pruebas realizadas se determinó que con R1=120 kΩ, el circuito se encuentra calibrado para distancias hasta 2 metros.

Figura 16

Circuito propuesto para los receptores infrarrojos

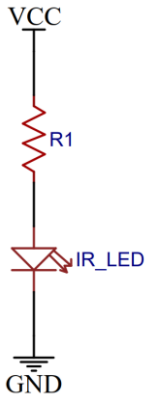


Circuito Emisores Infrarrojos. El circuito de los emisores, como se muestra en la Figura 17, es una configuración como el de un led convencional. Consta de una resistencia y del propio emisor. Según las especificaciones del fabricante, el diodo emisor trabaja con voltaje de 1,3 V con una corriente continua máxima de 100 mA. Para evitar operar el circuito en condiciones de máxima corriente se asumirá una corriente de 90 mA en el cálculo. Como se ve en la Ecuación 1 la resistencia debe ser no menor a 22 Ω.

$$R1 = \frac{Vcc - 1{,}3}{I} = \frac{3{,}3 - 1{,}3}{0{,}09} = 21{,}98 \approx 22 \qquad (1)$$

Figura 17

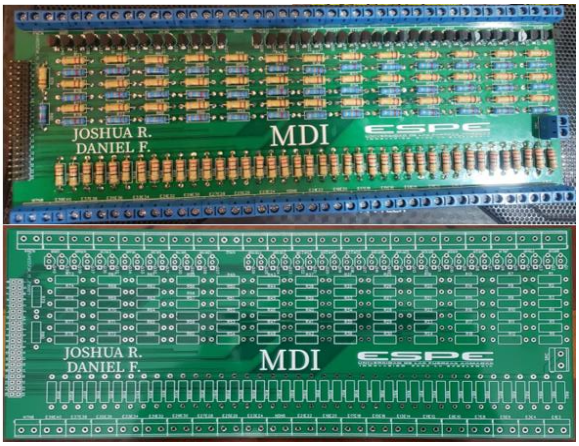
Circuito propuesto para los emisores infrarrojos



Considerando que para el sistema se requerirán 40 circuitos de emisor y 40 circuitos de receptor, se ha diseñado e implementado una tarjeta PCB que permita recopilar la información de los receptores y enviarla hacia el dispositivo driver de periférico de entrada. Adicionalmente, hay que considerar el cableado importante del sistema, por lo que se ha previsto que el dispositivo controlador se encuentre lo más cercano al marco del muro y para ello se ha diseñado una caja que almacene al controlador y al PCB de acoplamiento de sensores. El circuito de los sensores (emisores-receptores) fue plasmado en una placa de circuito impreso (PCB) de dos capas fabricada con material FR-4. Para el dimensionamiento del ancho de las trazas, las distancias mínimas entre pads y distancia mínima entre trazas, se aplicó la norma IPC 2221. El resultado se lo puede apreciar en la Figura 18. La implementación y montaje del sistema se presenta en el Apéndice A.

Figura 18

Placa PCB



Nota: Imagen inferior) PCB sin elementos, Imagen superior) PCB con electrónica montada

Periférico de Salida

Como se indicó el periférico de salida del sistema es un proyector comercial. Dada la amplia variedad de modelos disponibles en el mercado, se estableció la cantidad de lúmenes necesarios para un correcto funcionamiento del sistema. De acuerdo con el fabricante BenQ, para determinar la cantidad de lúmenes necesarios es importante el entorno donde se utilizará. La cantidad de luz ambiental de estos entornos impactará la visibilidad de las imágenes proyectadas. Para orientar esta decisión, la Tabla 3 presenta recomendaciones de BenQ respecto a los lúmenes requeridos en función del espacio de uso.

Tabla 3

Tabla de cantidad de lúmenes recomendados dependiendo del uso

Uso	Lúmenes Recomendados
Oficina	3.000 a 5.000 lúmenes
Escuelas	3.000 a 5.000 lúmenes
Entretenimiento	2.000 a 3.000 lúmenes

Uso	Lúmenes Recomendados
Espacio al aire libre	6.000 a 10.000 lúmenes

Nota. BenQ Corporation (2021).

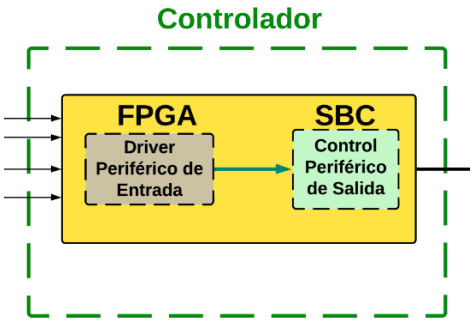
Dado que el trabajo de titulación está orientado hacia un uso en escuelas u oficinas, se recomienda que el proyector cuente con 3.000 a 5.000 lúmenes para asegurar un funcionamiento óptimo del sistema. Otro punto importante es la interfaz de conexión, la cual para el sistema se escogió HDMI debido a que actualmente es la interfaz más común de conexión. Definidos estos requisitos para el periférico de salida se verá a continuación el diseño del controlador.

Controlador

Como se indicó anteriormente el controlador es la parte del sistema capaz de monitorizar las entradas, determinar la posición del estímulo del muro y con ello la opción seleccionada por el usuario, para finalmente desplegar en el periférico de salida, la imagen del escenario virtual seleccionada por el usuario. Para cumplir con estas funciones, el controlador ha sido dividido en dos módulos: a) driver de periférico de entrada y b) controlador de periférico de salida, es necesario considerar los parámetros de cada parte. La Figura 19 proporciona una representación visual del controlador con sus módulos o bloques.

Figura 19

Diagrama de Bloques del Controlador



Primero, el driver del periférico de entrada debe procesar simultáneamente las 40 entradas provenientes de la matriz de los sensores. Este driver interpretará los datos proporcionados por los sensores para codificar la posición del estímulo y transmitir esta información hacia el controlador del periférico de salida, que es quién procesará la información para desplegar el escenario. Para facilitar la comunicación entre los dos módulos se propone utilizar el protocolo USART; siendo las características de esta comunicación: simplex, asíncrona y serial. Con estas consideraciones se escogerá el dispositivo para implementar el driver del periférico de entrada. La Tabla 4 presenta una comparativa con diferentes candidatos.

Tabla 4

Tabla comparativa entre Arduino, Microcontroladores y FPGA

Característica	ARDUINO	Microcontroladores	FPGA
Programación	C/C++ mediante IDE dedicado [a]	Ensamblador, C, BASIC [b]	VHDL/Verilog [c]
Flexibilidad	Menos flexible, principalmente para proyectos específicos [a]	Moderadamente flexible, según el modelo y configuración [b]	Muy flexible y adaptable a diversas aplicaciones [c]
Velocidad de Procesamiento	Relativamente baja comparada con FPGA's [a]	Variable según modelo y configuración [b]	Alta, con tiempos de respuesta muy rápidos [c]
Complejidad de Diseño	Baja a moderada, ideal para proyectos sencillos [a]	Baja a alta, según modelo y aplicaciones [b]	Alta, permitiendo implementaciones complejas y personalizadas [c]
Consumo de Energía	Bajo [a]	Variable [b]	Variable, puede ser optimizado [c]
Aplicaciones	Proyectos de hobby, educativos, y pequeñas implementaciones específicas [a]	Amplia variedad, desde sistemas embebidos hasta aplicaciones industriales [b]	Amplio rango de aplicaciones, desde sistemas embebidos hasta procesamiento de señales complejas [c]

Característica	ARDUINO	Microcontroladores	FPGA
Cantidad de Pines GPIO	El modelo más común 14 pines. Modelos con mayor cantidad sube el coste [a]	Varía según el modelo, pero a mayor cantidad mayor coste y mayor dificultad de disponibilidad comercial [b]	Varía según el modelo, pero gran cantidad de modelos con >40 pines [c]
Compatibilidad con UART	Si [a]	Si [b]	Si [c]

Nota. [a]Arduino(2023). [b]Villarán (2015). [c]Marín (s.f.)

Con la información dada en la Tabla 4, se ha seleccionado al dispositivo lógico programable FPGA como la opción más adecuada, principalmente por el manejo simultáneo de varias señales. Además, la FPGA permite una fácil implementación de UART. Concluida la selección del driver, se analizará los requerimientos para el control del periférico de salida.

El controlador del periférico de salida requiere de compatibilidad con UART para recibir los datos del driver. Asimismo, es fundamental que cuente con la capacidad de procesar y renderizar aplicaciones con gráficos 3D. Para este elemento se opta por utilizar un computador de placa única (SBC) por cumplir con estas condiciones y por su precio reducido en comparación a un computador portátil. Las SBCs se pueden conseguir con precios inferiores a 200 dólares con un consumo energético reducido en el orden de 15 Watts. Se ha previsto utilizar software libre para el desarrollo del sistema por lo que se ha determinado que la SBC permita contar con un sistema operativo basado en Linux. Adicionalmente se debe considerar que el computador seleccionado incluya una interfaz HDMI para poder enviar la señal de video hacia el periférico de salida y una interfaz compatible con UART para la conexión con la FPGA.

La SBC debe proporcionar una buena capacidad para manejar gráficos con unas dimensiones compactas. Para la selección del modelo de SBC que cumpla los requisitos del trabajo de titulación se realizó una comparativa. En la Tabla 5 se muestran las características principales a comparar de algunas de las SBC más populares en el mercado.

Tabla 5

Tabla comparativa entre los principales modelos de SBC más populares en el mercado

Computadora de Placa Única	Frecuencia de CPU	RAM	Conectividad	Puertos USB	Sistema Operativo Compatible	Precio Aproximado (USD)
Raspberry Pi 4 Model B[b]	1.5 GHz (Quad core Cortex-A72) [b]	1GB, 2GB, 4GB o 8GB LPDDR4[b]	Wi-Fi , Bluetooth 5.0, HDMI[b]	2 USB 3.0, 2 USB 2.0[b]	Linux, Debian, Raspberry Pi OS[b]	Desde $63[a]
Raspberry Pi 3[c]	100 MHz [c]	1 GB [c]	DSI/HDMI [c]	microSD [c]	Linux, Debian, Raspberry Pi OS[c]	Desde $34[a]
BeagleBone Black[d]	1000 MHz[d]	512 MB[d]	HDMI[d]	MMC/SD[d]	Android, Ubuntu[d]	Desde $82[a]
DragonBoard 410C[e]	1200 MHz[e]	1 GB[e]	HDMI[e]	microSD[e]	-	Desde $180[a]
Banana Pi BPI-M5[f]	2.0GHz (Quad-core Cortex-A55) [g]	4GB LPDDR4[g]	Wi-Fi, USB, Ethernet, HDMI[g]	4 x USB 3.0[g]	Android, Debian, Raspbian, Armbian[g]	Desde $65[a]

Nota. [a]Recuperado de Amazon (2023) por Amazon.com, Inc. [b]Raspberry Pi Ltd (2019a). [c]Raspberry Pi Ltd (2019b). [d]Coley (2013). [e]Qualcomm Technologies (s.f.). [f]BananaPi Team (2023).

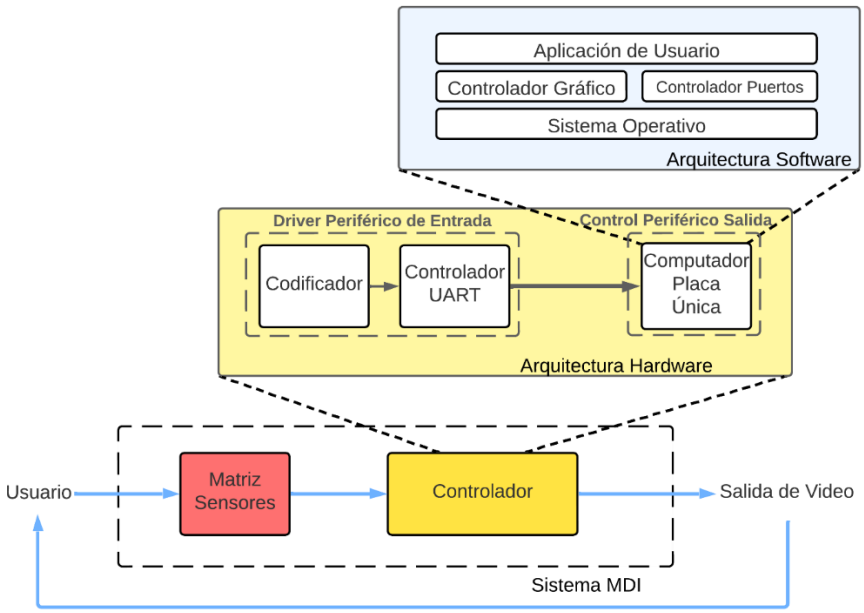
Para la selección se debe tener en cuenta que el dispositivo debe tener las capacidades para poder correr un programa 3D, que la salida de video sea compatible con HDMI y que posea al menos un puerto USB para la comunicación UART. Tras analizar la Tabla 5 se tiene dos opciones que destacan sobre las demás: la Raspberry Pi 4 Model B y la Banana Pi BPI-M5. Al ser muy similares se analizó el soporte y documentación que posee cada una, por este parámetro se destaca como la mejor opción la Raspberry Pi 4 Model B. Esta SBC seleccionada al ser una minicomputadora se requiere realizar algunas configuraciones mostradas a continuación.

Para el manejo de imágenes renderizadas se ha previsto trabajar con la librería vulkan-tools, recomendada para maximizar la gestión de recursos de las SBC's. Con estos parámetros

expuestos se puede diseñar la arquitectura tanto de hardware como de software de nuestro sistema para proceder con el diseño de cada parte de este. El modelo propuesto se lo puede observar en la Figura 20.

Figura 20

Modelo del sistema MDI conjunto a su arquitectura



Driver Periférico de Entrada

Como se indicó anteriormente, la implementación del driver del periférico de entrada se realizará sobre un dispositivo FPGA. Se tiene previsto utilizar VHDL con una arquitectura estructural para programar el diseño del driver del periférico de entrada. A continuación, se detallarán los criterios para la selección de la FPGA.

Selección de FPGA. Se realizó una búsqueda de diferentes modelos de las marcas más comerciales de FPGA's. Los modelos por analizar se seleccionaron por su alta disponibilidad comercial para luego hacer una comparativa de sus principales características. Los modelos presentados en la Tabla 6 pertenecen a las principales marcas de FPGA's, además dichos modelos fueron seleccionados por cumplir con los requisitos mínimos de cantidad de GPIO's.

Tabla 6

Tabla comparativa entre los principales modelos de las marcas de FPGA más disponibles en el mercado

Características	Xilinx	Altera (Intel)	Microchip	Lattice	Altera (Intel)
Modelo	Artix-7[b]	Cyclone V 5CSEMA5F31C6N[c]	A3PE3000[d]	ECP5-5G[e]	Cyclone II - EP2C5T144[f]
Puertas Lógicas	Hasta 215K[b]	77K[c]	3M [d]	Hasta 85K[e]	4608[f]
Bloques de RAM	Hasta 13.1 Mbits[b]	2.7 Mbits[c]	1.5 Mbits [d]	Hasta 3.7 Mbits[e]	Hasta 117 Kbits[f]
DSP Slices	Hasta 740[b]	112[c]	No especificado	Hasta 156[e]	-
Transceptores	Hasta 16 a 10.3125 Gbps[b]	Hasta 5 a 3.125 Gbps[c]	No aplicable	Hasta 4 a 3.2 Gbps[e]	-
Voltaje de Operación	0.97V - 1.03V[b]	0.87V - 0.93V[c]	1.425V - 1.575V [d]	1.14V - 1.26V[e]	3.3V[f]
Opciones de E/S	Hasta 500[b]	Hasta 480[c]	Hasta 620 [d]	Hasta 365[e]	89 I/O[f]
Precio (USD)	Desde $165[a]	Desde $500 [a]	Desde $700 [a]	Desde $81 [a]	Desde $60[a]

Nota. [a]Recuperado de Amazon (2023) por Amazon.com, Inc. [b]Xilinx (s.f.). [c]Intel Corporation (s.f-a). [d]Microchip (s.f.). [e] Lattice Semiconductor Corp (s.f). [f]Intel Corporation (s.f.-b).

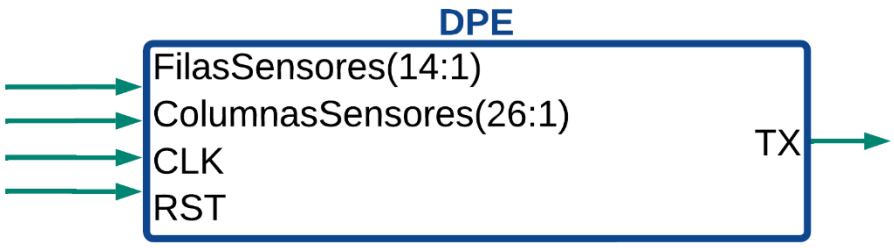
Diseño. El driver del periférico de entrada se diseñará utilizando la metodología TOP-DOWN, es decir se iniciará desde el bloque general, continuando con el diseño de los bloques intermedios hasta desmenuzar el diseño en las entidades más básicas. La entidad principal (top del sistema) se llamará “DPE” con el fin de simplificar el nombre “Driver Periférico Entrada”. Esta entidad, como se ve en la Figura 21, tendrá dos entradas para los sensores dividiéndolos por filas y columnas. El tipo de entrada será “STD_LOGIC_VECTOR” para facilitar el manejo de estas.

Las demás entradas son señales de control utilizadas en el funcionamiento comportamental de bloques internos. “CLK” será una señal de reloj y “RST” será una señal

digital. Para la salida se tendrá simplemente una salida del tipo “STD_LOGIC” ya que para el tipo de comunicación propuesta no se necesita más de una salida digital para poder comunicarse con el controlador del periférico de salida.

Figura 21

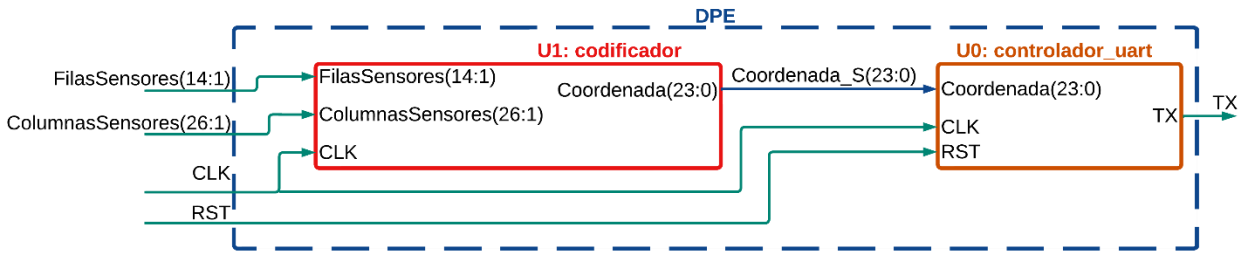
Entidad top DPE



Dentro de esta entidad se tendrá dos componentes los cuales se interconectarán mediante una señal tipo “STD_LOGIC_VECTOR” donde irá la coordenada del estímulo. En la Figura 22 se encuentran estos componentes y sus conexiones ilustradas para un mayor entendimiento de la entidad. El diseño de estos componentes se desarrollará más adelante donde se explicará el motivo de las entradas y salidas de cada componente.

Figura 22

Arquitectura estructural de la entidad top DPE

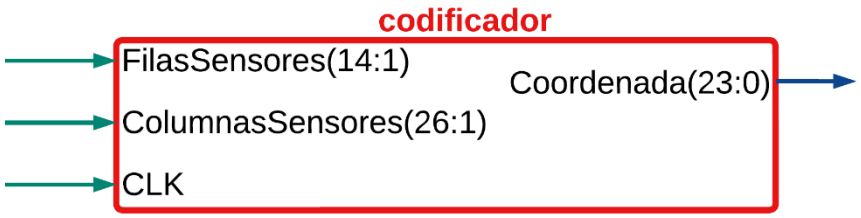


Codificador. Como se puede ver en la Figura 23 el diseño de esta entidad es simple ya que de entradas tendrá los sensores de filas, columnas y una señal de reloj para el control de un componente interno explicado más adelante. La salida como se puede ver es un vector de 24 bits debido a que se quiere que del codificador salga la coordenada de contacto en formato

ASCII donde los primeros 8 bits estén dedicados para identificar la fila que estará codificada con las letras desde la “A” hasta la “N” de acuerdo con la matriz del periférico de entrada (Véase Figura 13). Los siguientes 16 bits servirán para indicar en que columna se detectó el contacto, por ejemplo, si se detecta un contacto en la fila “A” en cruce con la columna 20 se codificará en la salida en código ASCII como “A20”.

Figura 23

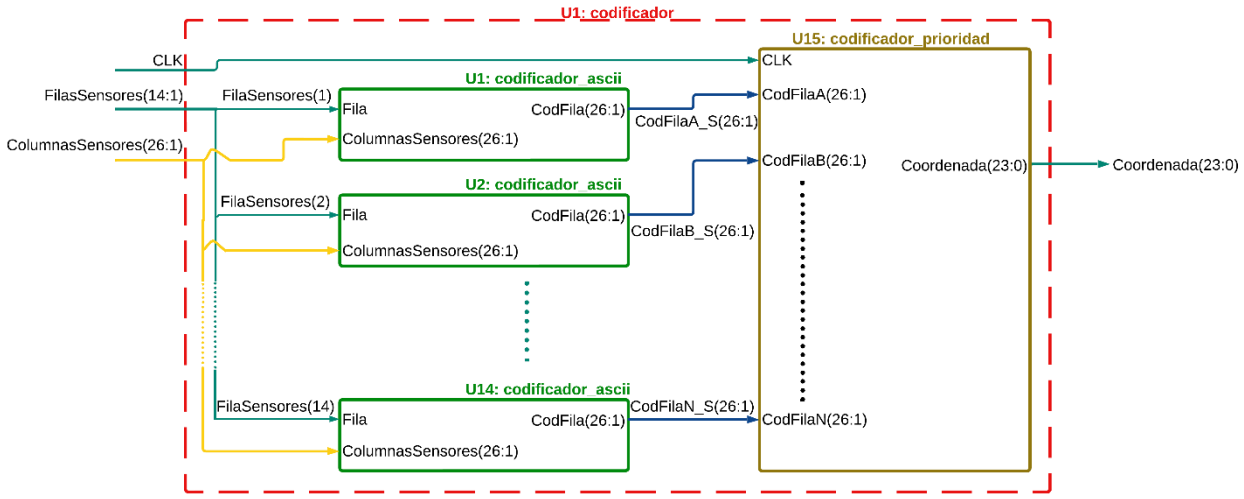
Entidad codificador



Para el diseño de la arquitectura es importante tener en cuenta que se tiene 14 filas y 26 columnas y, es decir 364 puntos de contacto con 2^{364} combinaciones posibles por lo que codificar todo esto en un solo bloque puede resultar muy complicado. Por este motivo para simplificar la codificación, como se puede ver en la Figura 24, se planteó que cada fila tenga un codificador llamado “codificador_ascii” del cual saldrá un vector con las posiciones del estímulo identificadas en formato ASCII hacia el componente “codificador_prioridad”. De este último componente se tendrá una coordenada dependiendo de la prioridad que se explicará cuando se hable del diseño de dicho componente.

Figura 24

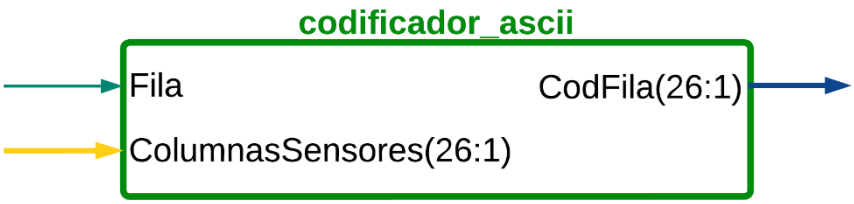
Arquitectura codificador



Codificador Ascii. Para el diseño de esta entidad como se puede ver en la Figura 25 se va a tener una entrada digital del tipo “STD_LOGIC” donde irá la señal digital del sensor de la fila correspondiente y la otra entrada será un vector del tipo “STD_LOGIC_VECTOR” en la cual irán las señales digitales de todos los sensores colocados en las columnas. Para la salida se tendrá un vector del tipo ascii de tamaño 26 debido a que se tiene 26 columnas.

Figura 25

Entidad codificador_ascii



La arquitectura de esta entidad será comportamental por lo que se debe diseñar su funcionamiento en base a que respuesta se espera ante los cambios en sus entradas. Para el caso de esta entidad su funcionamiento está pensado en comparar la fila de la entrada con cada una de las columnas para determinar donde existen estímulos. Estos estímulos existen cuando los haces de luz infrarroja de los sensores serán cortados con lo cual no habrá

presencia de haz de luz infrarroja en el receptor y por ende la señal digital del sensor será un “0” lógico.

Esto indica que existen estimulos donde se encuentren “0” lógicos siempre y cuando la fila también tenga un valor de “0” lógico. Por ejemplo, al observar la Figura 26, si la fila A tienen un valor lógico “0” en la salida se tendría las posiciones “A1” y “A3”. Sin embargo, en el caso de la fila B, aunque el vector de columnas tenga valores lógicos “0”, no se tendría estimulos debido al valor lógico “1” en la fila B. Es decir, no existe ese cruce entre la fila y las columnas.

Figura 26

Identificación de estimulos

Columnas / Filas	1	2	3
A=0	0	1	0

Columnas / Filas	1	2	3
B=1	0	1	0

Para determinar las posiciones de contacto de cada fila se lo puede hacer fácilmente con la función nor. Con las posiciones determinadas se codificará en código ascii de acuerdo con lo explicado previamente en la entidad “codificador”. Como este codificador estará en cada fila se utilizará una constante local denominada “AUX” que dependiendo de la fila se tendrá su código en letra. Observando la Figura 27 se puede ver la tabla de codificación. Para el caso de que no exista ningún estímulo a su salida se tendrá el código “ZZZ”.

Figura 27

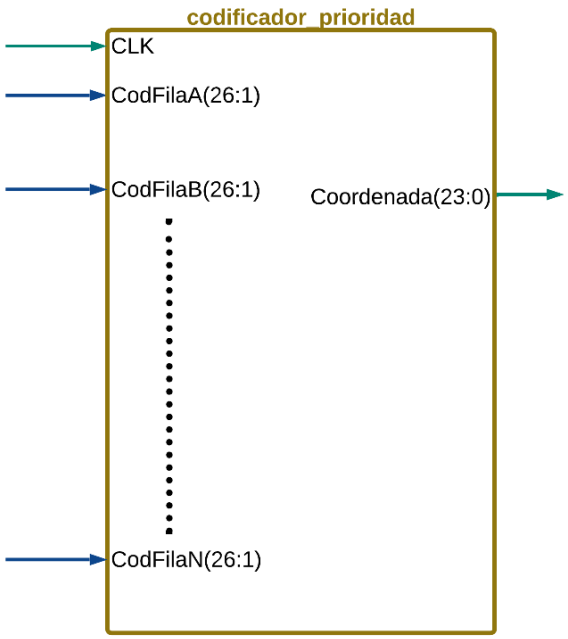
Codificación de los puntos de cada fila

	ColumnaSensores(0)	ColumnaSensores(1)	ColumnaSensores(2)	...	ColumnaSensores(25)	ColumnaSensores(26)
Fila=0	AUX & "01"	AUX & "02"	AUX & "03"	...	AUX & "25"	AUX & "26"

Codificador de Prioridad. Como en cada “codificador_ascii” de cada fila se puede tener varios estímulos es necesario establecer prioridad de que dato se enviará primero a la salida del codificador para posteriormente enviarse. Por este motivo la entidad “codificador_prioridad”, mostrado en la Figura 28, tendrá en la entrada además de los vectores de cada codificador ascii una entrada de reloj para poder controlar con cada subida de la señal de reloj el dato en su salida.

Figura 28

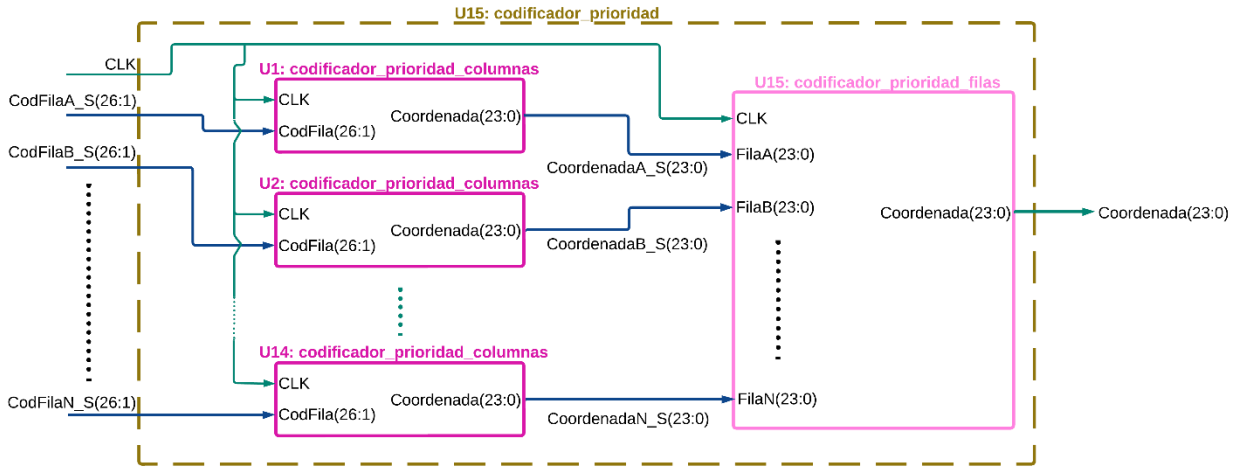
Entidad codificador_prioridad



Para la arquitectura de esta entidad se planteó tener dos componentes “codificador_prioridad_columnas” y “codificador_prioridad_filas” (Véase Figura 29). El primero dará prioridad de los estímulos desde un punto de vista de columnas buscando en orden ascendente estímulos y dando siempre prioridad al primer estímulo visto. Para el “codificador_prioridad_filas” su funcionamiento será de manera similar dando prioridad siempre a las primeras filas.

Figura 29

Arquitectura codificador_prioridad



El “codificador_prioridad_columnas” en cada flanco ascendente de señal de reloj buscará de forma ascendente por el vector de entrada CodFila los estímulos existentes, colocando en su salida la coordenada de los estímulos encontrados en orden. A modo de ilustración la Figura 30 muestra el funcionamiento diseñado para esta entidad. De forma similar el “codificador_prioridad_filas” en cada flanco ascendente de señal de reloj buscará de forma ascendente por sus entradas los estímulos existentes y colocará en su salida la coordenada de los estímulos encontrados en orden. Un ejemplo del funcionamiento diseñado para esta entidad se muestra en la Figura 31.

Figura 30

Ejemplo funcionamiento codificador_prioridad_columnas

	1	2	3	4	5	6
CodFila	A01	ZZZ	ZZZ	A04	A05	ZZZ

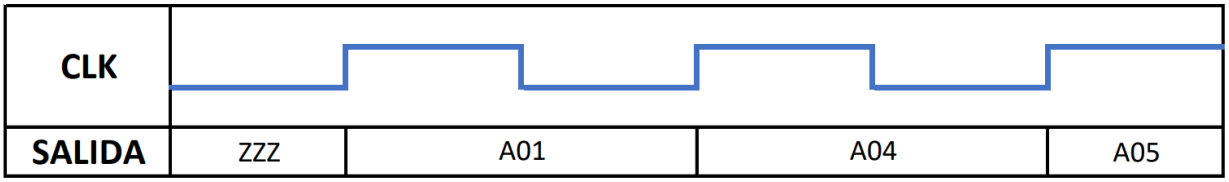
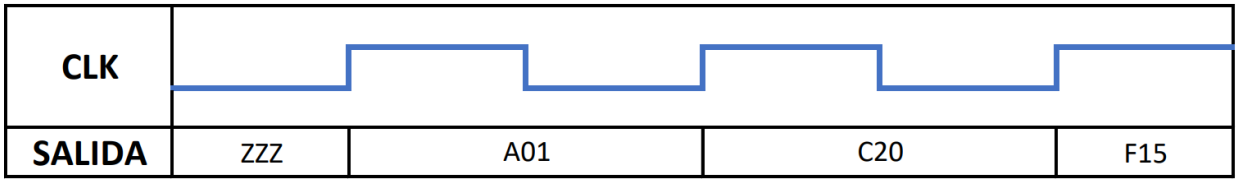


Figura 31

Ejemplo funcionamiento codificador_prioridad_filas

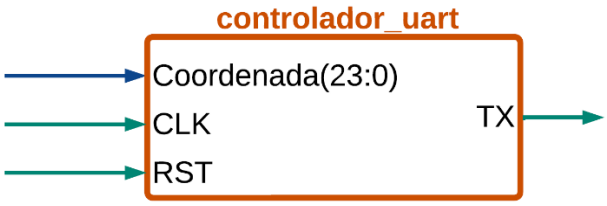
FilaA	FilaB	FilaC	FilaD	FilaE	FilaF
A01	ZZZ	C20	ZZZ	ZZZ	F15



Controlador UART. Para el diseño de esta entidad se debe tener en cuenta que la principal función de este componente será el aplicar el protocolo UART para establecer una comunicación con la SBC. Por esto es necesario que tenga de entrada el dato a enviar, que como estará codificado en ascii es requerido que esta entrada sea de tipo “STD_LOGIC_VECTOR” con tamaño de 24 bits. Además, se necesita entradas de control como “CLK” la cual será la entrada de señal de reloj fundamental para enviar los datos en orden y a una velocidad predeterminada. La otra señal de control “RST” será una señal digital para reiniciar los datos a enviar en caso de que exista algún fallo en la comunicación. El diseño de esta entidad esta ilustrada en la Figura 32.

Figura 32

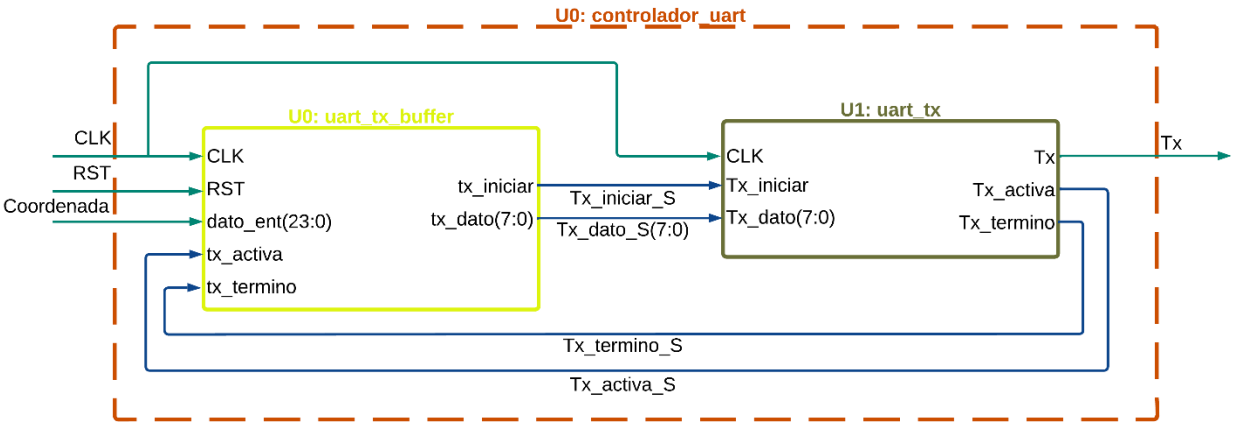
Entidad controlador_uart



En el diseño de la arquitectura, dado que la codificación siempre será más rápida que el envió de las coordenadas, resultará necesario contar con un buffer de transmisión. En este buffer se guardará temporalmente todas las coordenadas que vengan del codificador, como se puede ver en Figura 33 este buffer tendrá el nombre “uart_tx_buffer”. Además, para gestionar la velocidad y el protocolo en la transmisión de datos, se incorporará el componente “uart_tx”.

Figura 33

Arquitectura controlador_uart



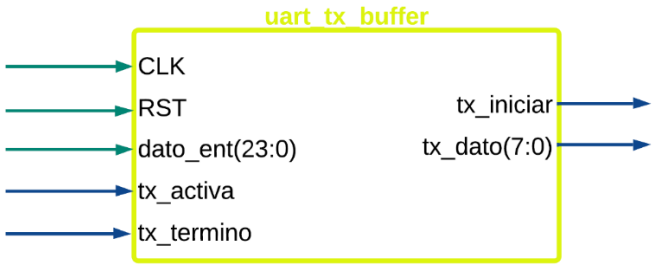
Uart Tx Buffer. Esta entidad además de las entradas mencionadas previamente va a necesitar dos entradas de realimentación desde el “uart_tx” (Véase Figura 33). Estas entradas serán utilizadas para controlar cuando cambiar el dato en su salida “tx_dato” y para saber la disponibilidad del canal de transmisión. Al saber la disponibilidad del canal de transmisión mandará la señal digital “tx_iniciar” al componente “uart_tx” para iniciar la transmisión del dato que se tiene en la salida. Cada una de estas entradas/salidas se las ilustra en la Figura 34.

La arquitectura será comportamental por lo que se necesita definir la función principal de esta entidad. Su función será de buffer de transmisión por lo que se va a construir una memoria de 70 bytes la cual necesitará de una señal de reloj. En cada flanco de subida dependiendo de en qué posición se encuentra la escritura y la lectura se realizará diferentes acciones.

Tanto la escritura como la lectura trabajan en paralelo por lo que se debe evitar choques que ocasionen que los datos se corrompan. Estos choques se pueden dar en caso de que la escritura sea más rápida que la lectura, por lo tanto, para escribir se debe cumplir las condiciones que exista espacio en memoria y la posición de lectura tenga una diferencia de al menos 5 espacios con la posición de escritura. Además, para evitar saturar el buffer en el caso de tener un estímulo mantenido se estableció la condición que el dato a escribir debe ser diferente al anterior dato escrito.

Figura 34

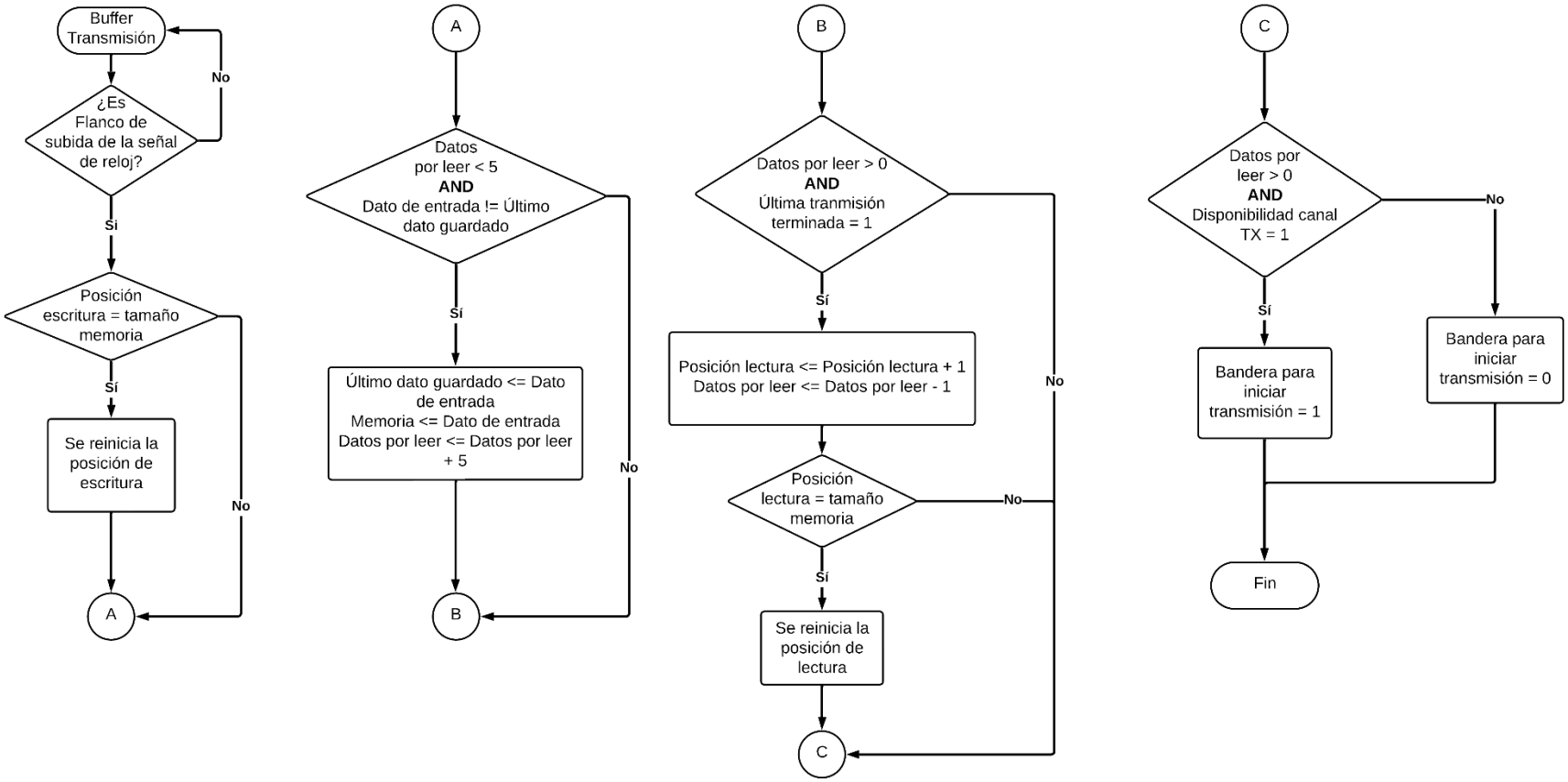
Entidad uart_tx_buffer



Ahora para el funcionamiento del proceso de lectura es importante también establecer condiciones para evitar fallos. Por esto para iniciar la lectura de una coordenada se debe tener datos por leer y el bloque de transmisión debe informar que termino su última transmisión. Este último evento permite mover los datos de memoria hacia la salida para que los tome el bloque de transmisión. Estos datos serán transmitidos al activarse la salida “tx_iniciar”, esto solo ocurre cuando se tiene disponibilidad en el canal. Cada una de estas condicionales se las ilustra en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 35.

Figura 35

Diagrama de flujo del funcionamiento del buffer de transmisión

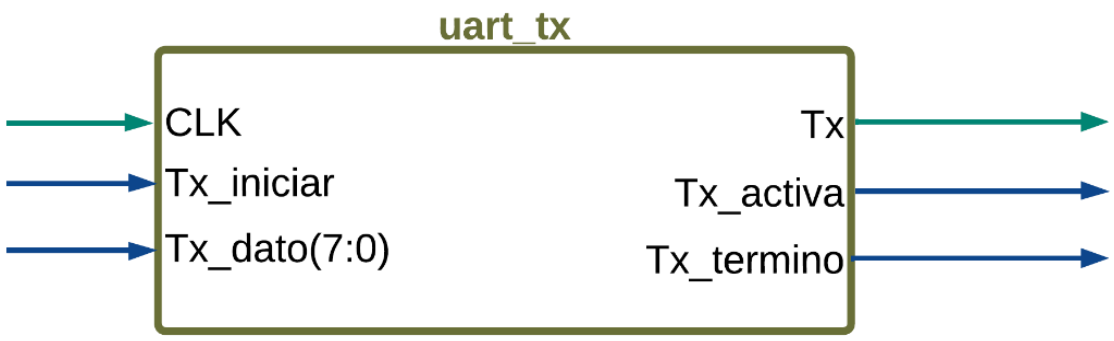


Uart Tx. Para esta entidad como se ve en la Figura 36 se va a tener la señal de reloj para controlar la velocidad de transmisión y para implementar el protocolo UART. La entrada “Tx_iniciar” tendrá una señal digital la cual indicará que debe iniciarse la transmisión del dato en la entrada “Tx_dato”. La salida “Tx” será el canal de transmisión de la comunicación serial, la salida “Tx_activa” y “Tx_termino” serán utilizadas como se mencionó en el buffer de transmisión, para indicar la disponibilidad del canal y finalización del dato enviado.

La arquitectura de esta entidad será comportamental donde el dato se enviará con las directrices del protocolo UART por lo que su diseño se basó en una máquina de estados finitos. Como se puede ver en el diagrama de estados de la Figura 37 los estados van a ser 5 en total, con 4 estados que van de acuerdo con el protocolo UART y un estado extra para dar un pulso de reloj entre caracteres transmitidos para evitar que el dispositivo que reciba los datos tenga dificultades para sincronizar correctamente el inicio y el final de cada byte.

Figura 36

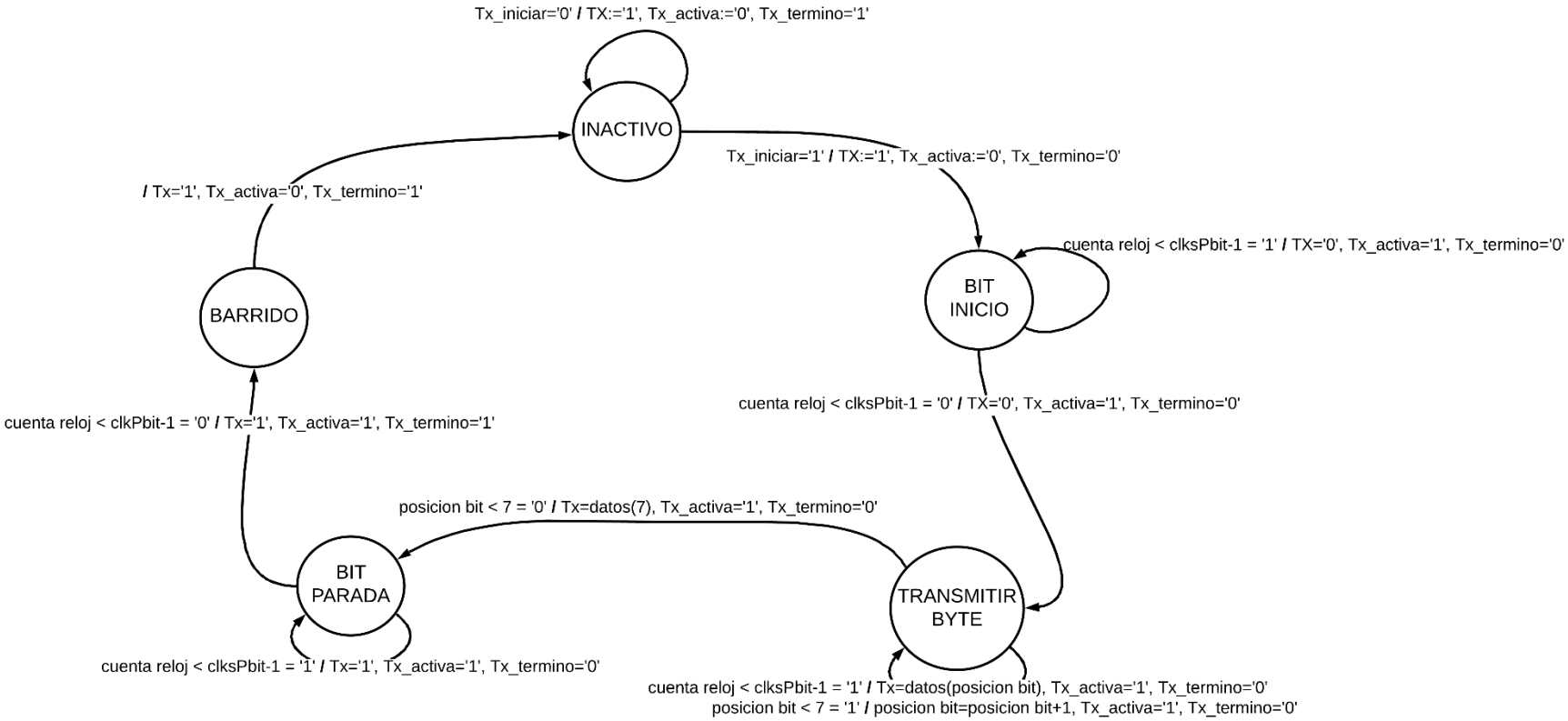
Entidad uart_tx



Como se puede ver en el diagrama de estados (Véase Figura 37) se utiliza mucho la variable “clksPbit”, esta variable servirá para establecer la velocidad de comunicación. Esta variable contabilizará los pulsos de reloj, determinando así el momento adecuado para cambiar de bit. En otras palabras, esta variable indicará cuantos pulsos de reloj son necesarios que dure el bit en la salida para que el receptor lo capte sin inconvenientes.

Figura 37

Diagrama de estados del bloque de transmisión



El cálculo de cuantos pulsos de reloj son necesarios, se obtiene de la relación de la frecuencia del reloj con la velocidad en bits por segundo de la transmisión. Para el cálculo de este valor se seleccionó una frecuencia de reloj común y una velocidad estándar del protocolo UART. Como se observa en la Ecuación 2 con 115.200 se tiene un valor de 434 pulsos por bit.

$$clksPbit = \frac{frecuencia\ reloj}{bps} = \frac{50\ MHz}{115.200} = 434{,}03 \approx 434 \qquad (2)$$

Con cada componente diseñado se procederá a la implementación del sistema en lenguaje VHDL para su posterior síntesis y ejecución sobre el FPGA seleccionado.

Implementación FPGA. Para la implementación del diseño en la FPGA se lo realizó mediante el software Quartus II Web Edition, debido a que esta versión es de acceso libre sin costo y además es la versión recomendada para la FPGA Cyclone II. El lenguaje de programación utilizado para cada entidad es VDHL, en la Figura 38 se puede observar la implementación del DPE. Con todas las entidades programadas se realizó una simulación del DPE para comprobar su funcionamiento y en caso de ser necesario hacer algún ajuste. Los archivos de cada entidad se los puede ver en el Apéndice B.

Figura 38

Implementación DPE

La simulación del DPE se lo realizó mediante la herramienta ModelSim-Altera, en esta simulación se probó la codificación con diferentes cambios en las entradas FilasSensores y ColumnasSensores. Los diferentes valores en las entradas fueron utilizados para comprobar el comportamiento del “codificador_ascii” y “codificador_prioridad”. En la Figura 39 se puede observar los resultados de un estímulo en el cruce de la fila “A” con la columna “1”.

Como se observa ni bien se produce el estímulo se codifica “A01” en la salida CodFila(1) del codificador_ascii. Como pueden existir varios estímulos el codificador de prioridad en el segundo flanco de subida coloca la coordenada del estímulo en la salida “COORDENADA” del codificador. Para comprobar el funcionamiento del codificador de prioridad se simuló estímulos en el cruce de la fila “A” con las columnas “2”, “14”, “25” y como se ve en la Figura 40 el codificador de prioridad se demoró un flanco de subida de reloj para comenzar a colocar en la salida del codificador las coordenadas en orden.

Figura 39

Simulación de funcionamiento codificador_ascii

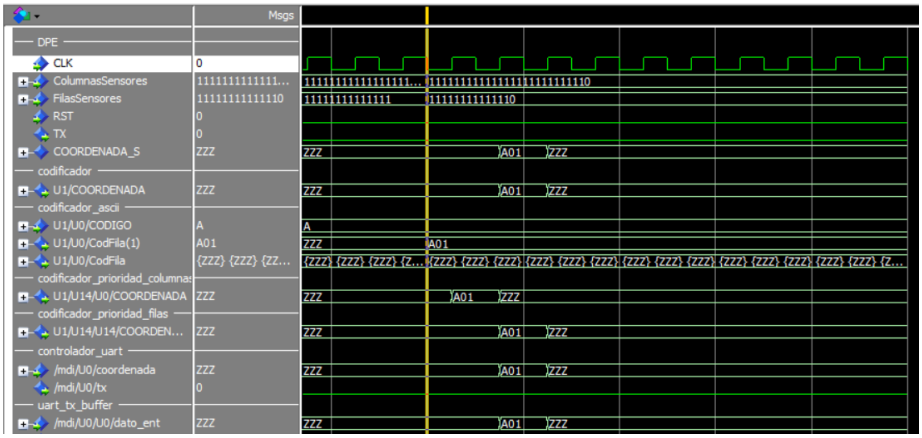
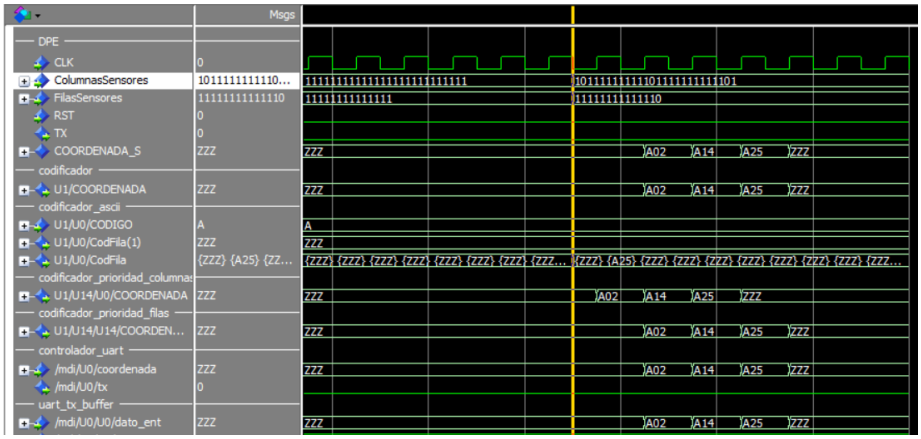


Figura 40

Simulación de funcionamiento codificador_prioridad



Con los mismos estímulos simulados anteriormente se verificará en el “uart_tx_buffer” que se guarden dichas coordenadas y en el “uart_tx” se verificará que la trama enviada sea la correcta. En la Figura 41 se puede observar cómo se guarda cada coordenada dentro del “uart_tx_buffer” para después mandar la señal digital para iniciar la transmisión. El “uart_tx” con dicha señal comienza la transmisión serial pasando por cada estado como se puede ver en la Figura 42, el estado de barrido al solo estar activo durante un ciclo de señal de reloj por la escala de tiempo no se logra visualizar por lo que se colocó el cursor en dicho estado para su visualización.

Figura 41

Simulación de funcionamiento del uart_tx_buffer

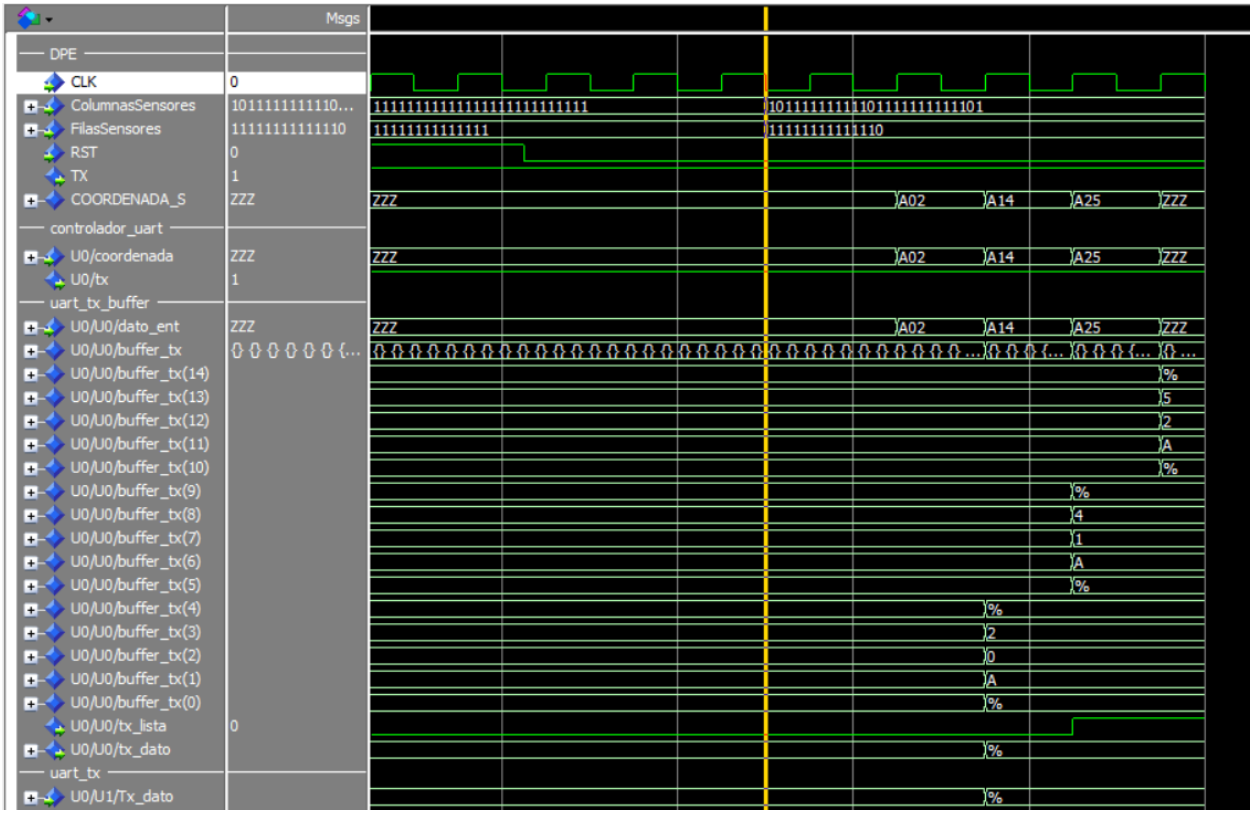
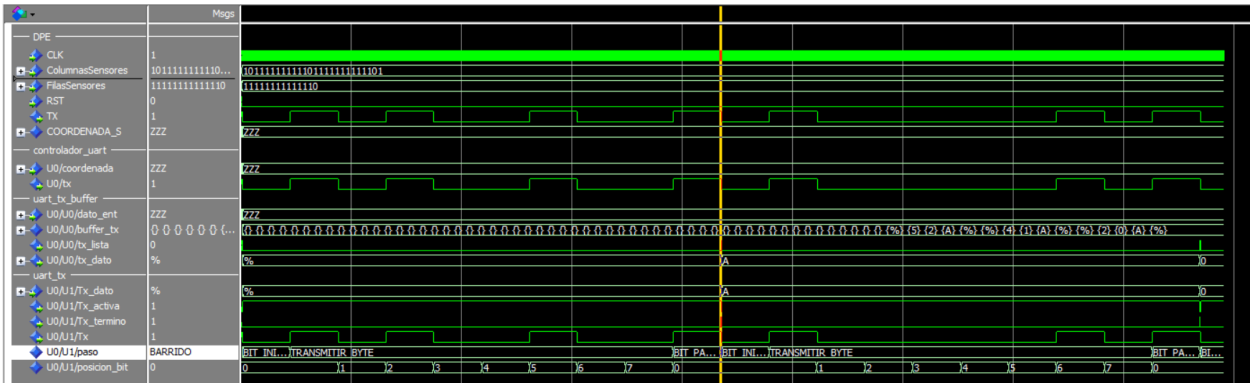


Figura 42

Simulación de funcionamiento del uart_tx



Una vez comprobado su funcionamiento en la plataforma de simulación, se procedió a cargar en la FPGA el diseño y se realizaron las conexiones respectivas hacia la matriz de fotosensores del muro interactivo. Para las señales de los sensores se realizó la conexión entre la placa PCB y las entradas de la FPGA como se ve en la Figura 43. Terminado el diseño e implementación del driver del periférico de entrada, a continuación se mostrará el controlador del periférico de salida para terminar con el diseño del controlador del sistema.

Figura 43

Conexión FPGA y placa PCB

Controlador del Periférico de Salida

Como se explicó en las consideraciones del sistema para el control del periférico de salida se utilizará una SBC. La SBC seleccionada fue la Raspberry Pi 4 la cual es muy

compacta y tiene una buena capacidad para manejar gráficos. Esta SBC seleccionada al ser una minicomputadora se requiere realizar algunas configuraciones mostradas a continuación.

Configuración del Computador de Placa Única. Actualmente la configuración de una SBC es sencilla por la gran cantidad de documentación que existe. La configuración incluye principalmente la instalación del sistema operativo y la instalación de drivers para los periféricos. Todas las configuraciones aplicadas a continuación serán las recomendadas por el fabricante y desarrolladores de aplicaciones basadas en Linux.

Instalación del Sistema Operativo. La instalación del sistema operativo es muy sencilla ya que los propios fabricantes de la placa Raspberry brindan gratuitamente su sistema operativo. Este sistema operativo es el recomendado por el fabricante por ser el más estable y eficiente de la placa. Como se observa en la Figura 44 la herramienta de creación de dispositivos booteables se encarga de realizar la instalación del sistema operativo de acuerdo a que placa se tenga.

Figura 44

Herramienta de creación de dispositivos booteables

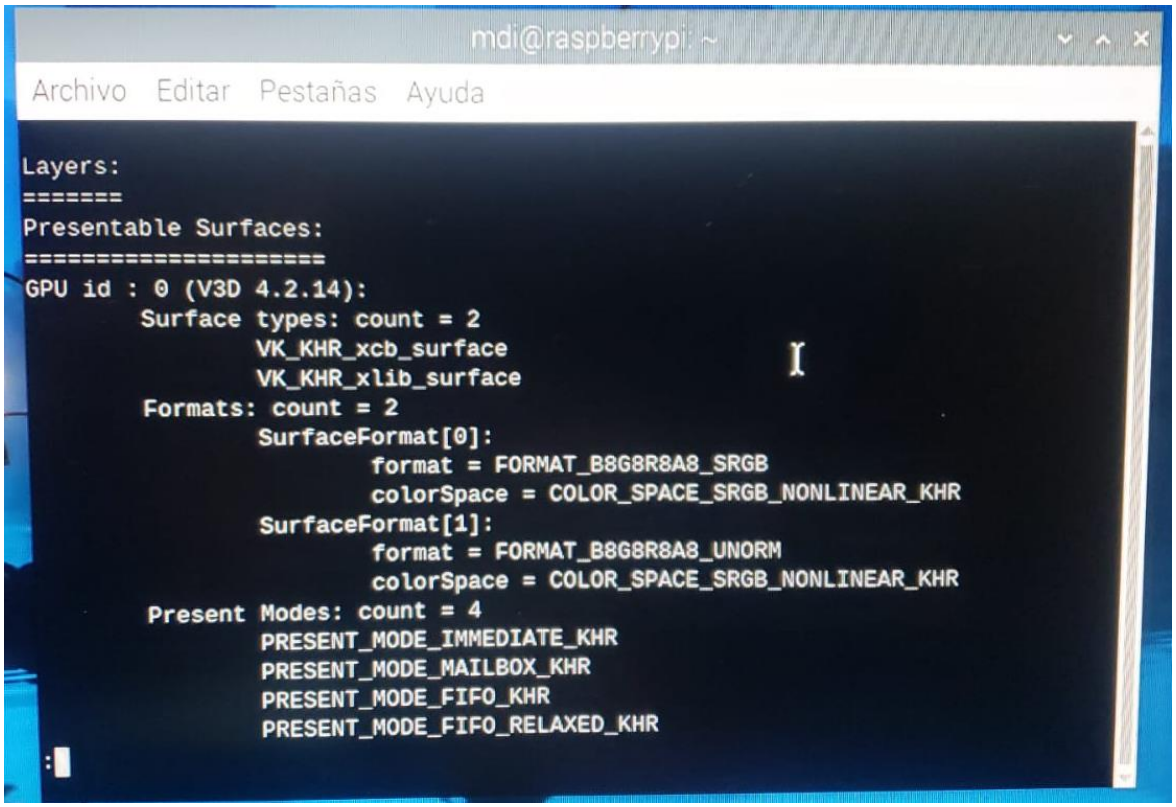
Instalación Drivers. Para el correcto funcionamiento de la aplicación de usuario es necesario tener los drivers para el control de puertos seriales y el driver de gráficos. Para el control de puertos seriales se utilizó el driver PL203, pero ya viene incluido con el sistema

operativo. En tanto que para controlar la interfaz HDMI para el envío de señales de vídeo,se utilizó la Api de Vulkan , por ser considerado como un driver con una buena optimización en ARM. Para utilizar Vulkan es necesario primero instalar la librería vulkan-tools. Con esta librería instalada se puede compilar esta API mediante “meson” (open source build system). Para la compilación se tendrá los parámetros “--libdir lib -Dplatforms=x11,drm -Dvulkan-drivers=broadcom -Dgallium-drivers=v3d,kmsro,vc4 -Dbuildtype=debug”.

Estos parámetros son utilizados para tener un gestor de renderizado directo de hardware broadcom con controlador vulkan3d. Una vez compilado para tener el máximo rendimiento posible se instala como en cualquier sistema basado en Linux, la versión instalada para el presente proyecto se muestra en la Figura 45.

Figura 45

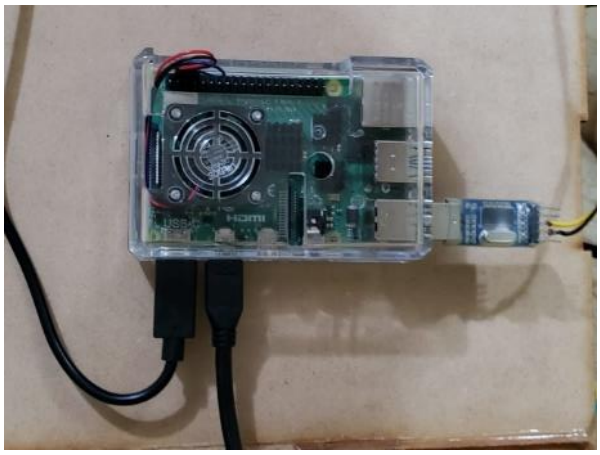
Versión del controlador Vulkan instalado



Implementación Controlador del Periférico de Salida. El último elemento restante del sistema es la SBC y para su implementación principalmente es necesario tener la configuración explicada previamente. Para el conexionado con el resto de los elementos es muy sencillo ya que para la conexión con el periférico de salida solo es necesario conectar un cable micro-HDMI a HDMI en sus respectivos puertos. Para la conexión con la FPGA será necesario tener un módulo adaptador USB a Serial como se observa en la Figura 46.

Figura 46

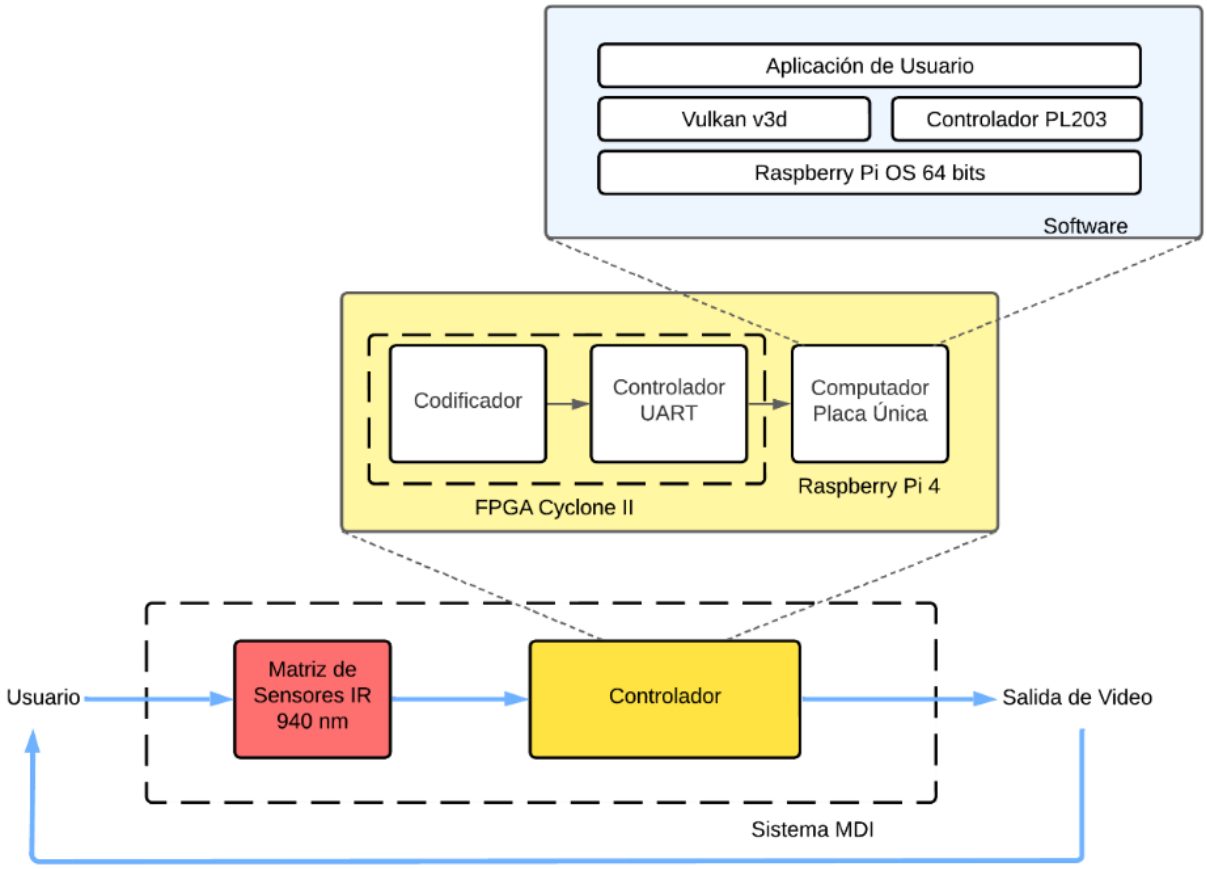
SBC implementada



Una vez que la plataforma de hardware ha sido implementada, la arquitectura del sistema quedaría configurada como lo ilustra la Figura 47. En ella se observa que el controlador está compuesto por una FPGA Cyclone II y una SBC Raspberry Pi 4. La SBC al tener una computadora embebida permite desarrollar aplicativos de renderización de imágenes de una forma más rápida. El diseño propone instalar el sistema operativo Raspberry Pi OS de 64 bits, sobre el que se instalaron las APIs Vulkan y PL203 para el controlador de vídeo y la comunicación serial. Esta base junto a la plataforma de desarrollo de aplicaciones phyton permitirá desarrollar y construir la aplicación de usuario. Esta será un videojuego que contenga los diferentes escenarios virtuales propuestos.

Figura 47

Modelo del sistema MDI considerando el hardware y software implementado



En este capítulo se ha abordado el diseño del periférico de entrada y controlador, elementos fundamentales del hardware del proyecto. Como se vio previamente, la aplicación de usuario operará sobre este hardware. El diseño de todo lo relacionado con esta aplicación de usuario se verá a continuación en el capítulo 4.

Capítulo 4: Diseño de Escenarios Virtuales e Integración con el Hardware

En este capítulo se abordará todo el proceso de desarrollo de los escenarios virtuales. Inicialmente se explica sobre diseño general de la aplicación de usuario. Luego se aborda cada escenario, su temática y la concepción de sus elementos visuales. Por último, se muestra todos los diagramas de flujo de los principales scripts creados.

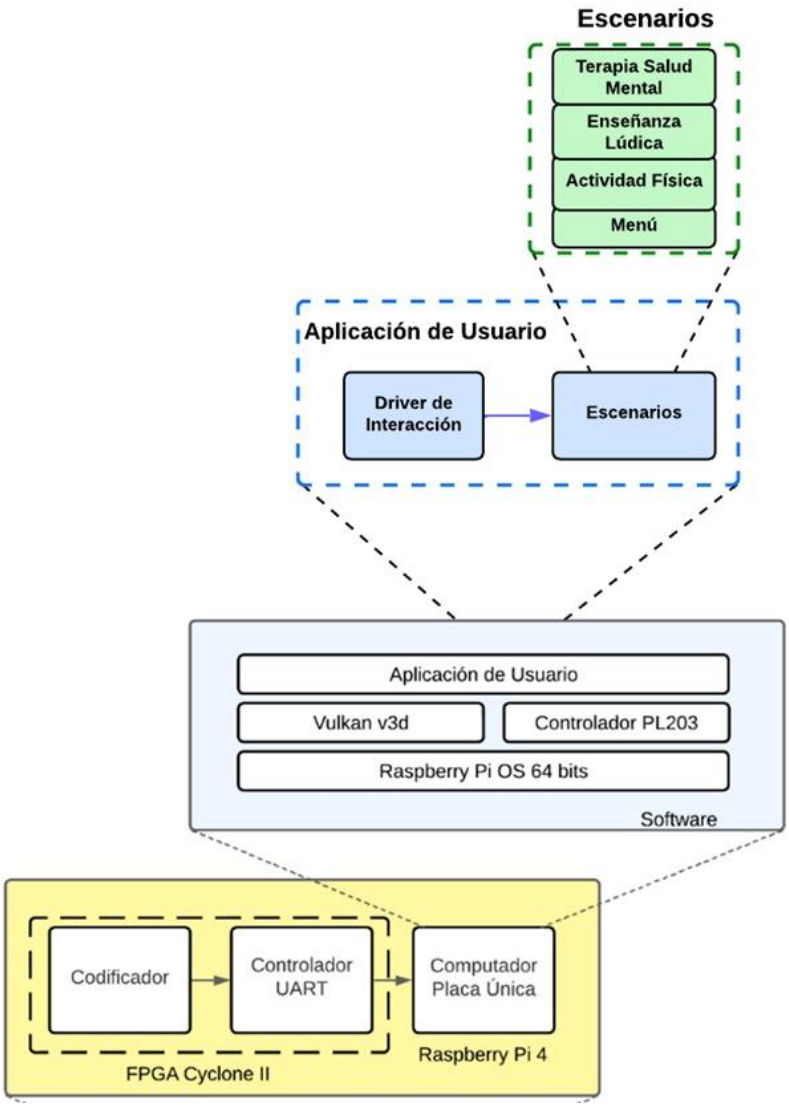
Diseño General de la Aplicación de Usuario

Una vez configurada la plataforma de hardware, es necesario desarrollar la aplicación de usuario del sistema. Como se señaló en el capítulo anterior, es la SBC, la encargada de ejecutar el aplicativo con los diferentes escenarios virtuales. Estos escenarios, son juegos proyectados en el muro con el cual va a interactuar el usuario final.

El aplicativo consta de un menú general que permitirá la navegación dentro de la aplicación y 3 juegos que estarán enfocados en incentivar la actividad física, enseñanza lúdica y terapia de salud mental. Para que el aplicativo permita la interacción con el usuario a través del uso y gestión de los periféricos de entrada y salida del sistema, es necesario construir el driver de interacción con las APIs del sistema. Un esquema general del desarrollo del aplicativo se visualiza en la Figura 48.

Figura 48

Estructura Aplicación de Usuario



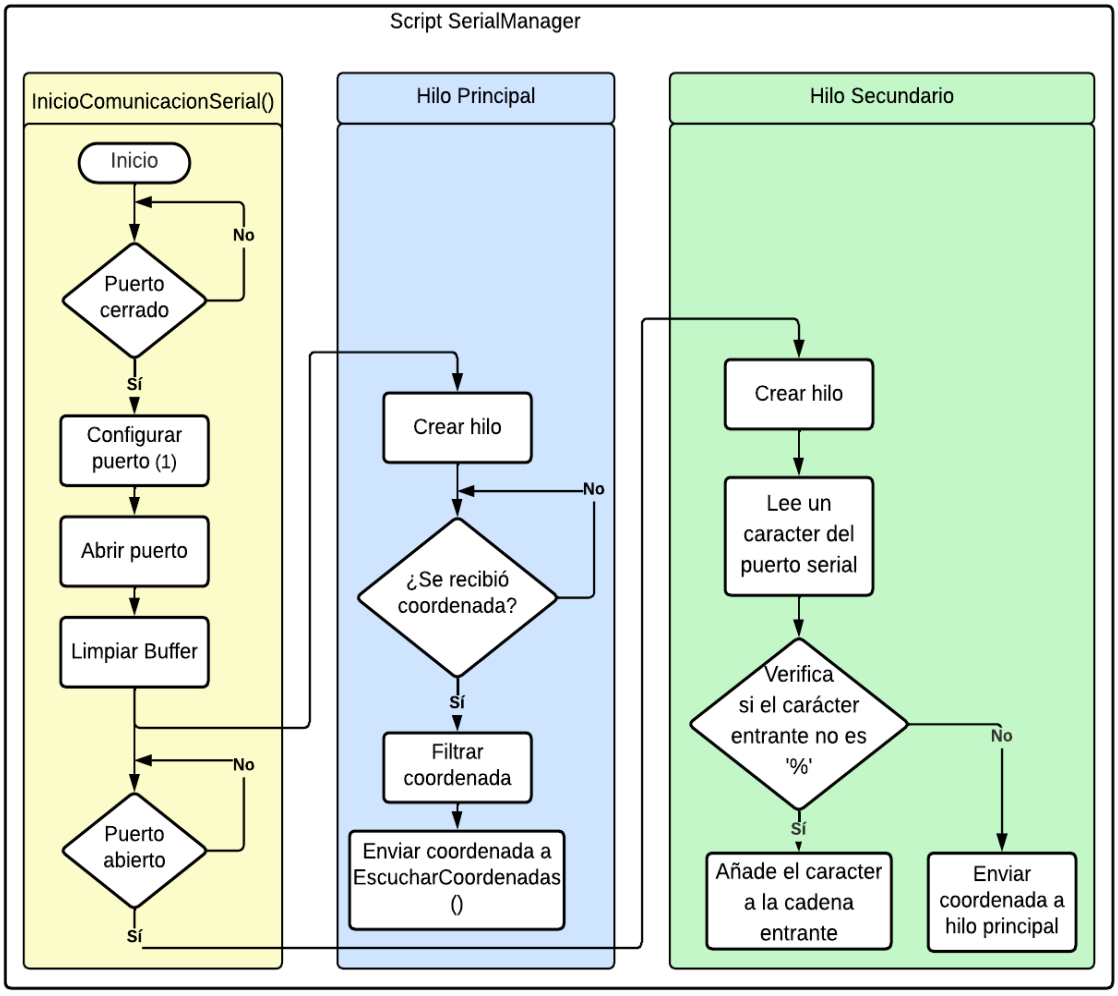
Driver de Interacción

El Driver de interacción es una parte crítica en el proyecto y se compone de varios scripts, para poder recibir los datos seriales provenientes de la FPGA. Para ello se optó por desarrollar un script llamado SerialManager que utilizará una programación en dos hilos. En la Figura 49 se puede visualizar de manera gráfica como trabaja el script a partir de su única función llamada InicioComunicacionSerial(). Esta función crea dos hilos que trabajan paralelamente. El *hilo principal* es el encargado de escuchar si el FPGA envía un

estímulo del usuario a través de la codificación de una coordenada completa. Si esto sucede, el dato es enviado a la función EscucharCoordenadas() que se encuentra en otro script y va a ser la encargada de la interacción con los escenarios virtuales. Por otra parte, el *hilo secu*ndario es el que recibe el caracter serial y lo añade a una cadena de caracteres, cuando le llega el caracter “%” significa que la coordenada está completa y envía el dato al hilo principal.

Figura 49

Diagrama de Bloques de Script SerialManager



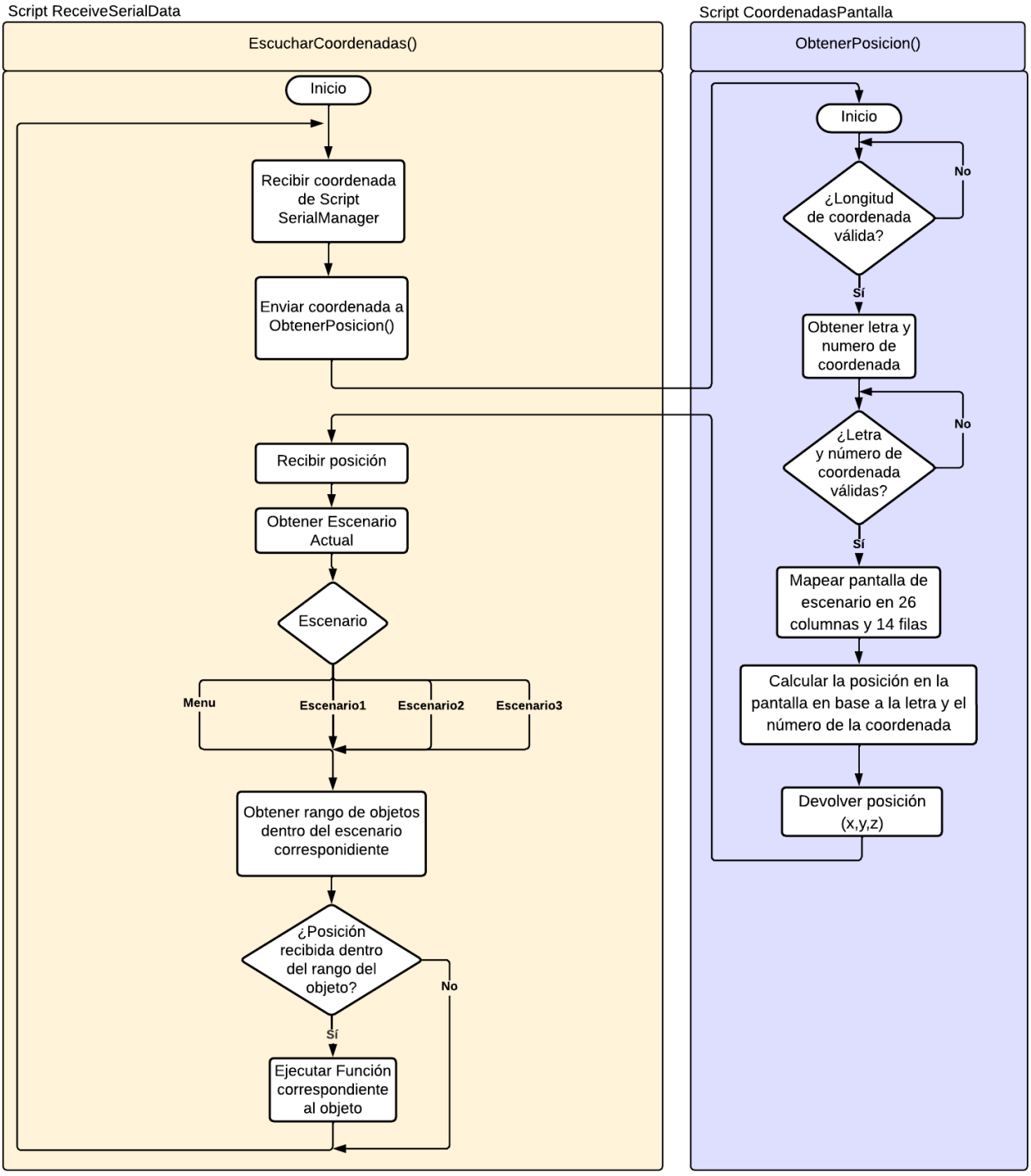
Nota: (1). - Nombre del puerto: /dev/ttyUSB0. Baudrate: 115200

Después de recibir una coordenada válida el driver utiliza dos scripts adicionales para poder llevar a cabo la interacción con éxito. En la Figura 50 se encuentran los

diagramas de flujo de cada script para poder visualizar como interactúan entre ambos para que en función de la coordenada recibida se pueda interactuar con los escenarios.

Figura 50

Diagrama scripts necesarios para la interacción



El script ReceiveSerialData recibe la coordenada proporcionada por el hilo principal del script SerialManager. Luego, obtiene la posición física (x,y,z) en la pantalla del escenario actual mediante la función ObtenerPosicion(), que es parte del script CoordenadasPantalla. Esta función hace dos validaciones de la coordenada proporcionada por el SerialManager para luego mapear la pantalla del escenario actual y devolver una posición física en base a la coordenada recibida.

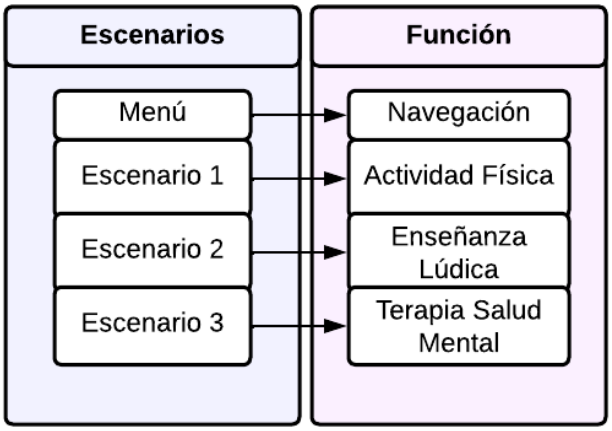
Si esta posición obtenida está dentro del rango de un objeto del escenario actual se ejecuta una función correspondiente a aquel objeto. De esta forma se obtiene la interacción del sistema con el usuario final. Gracias al driver de interacción se puede establecer una comunicación con los escenarios virtuales, escenarios que serán desarrollados mediante la plataforma de videojuegos seleccionada.

Diseño de los Escenarios Virtuales

Dado que cada escenario virtual tendrá una aplicación en diferentes aspectos de la vida humana: incentivar a la actividad física, enseñanza lúdica y terapia de salud mental. Cada escenario tendrá por tanto diferentes elementos dependiendo de la temática utilizada. La Figura 51 resume la funcionalidad de cada pantalla diseñada para la interacción con la aplicación de usuario.

Figura 51

Diagrama de Escenarios con su función asignada.

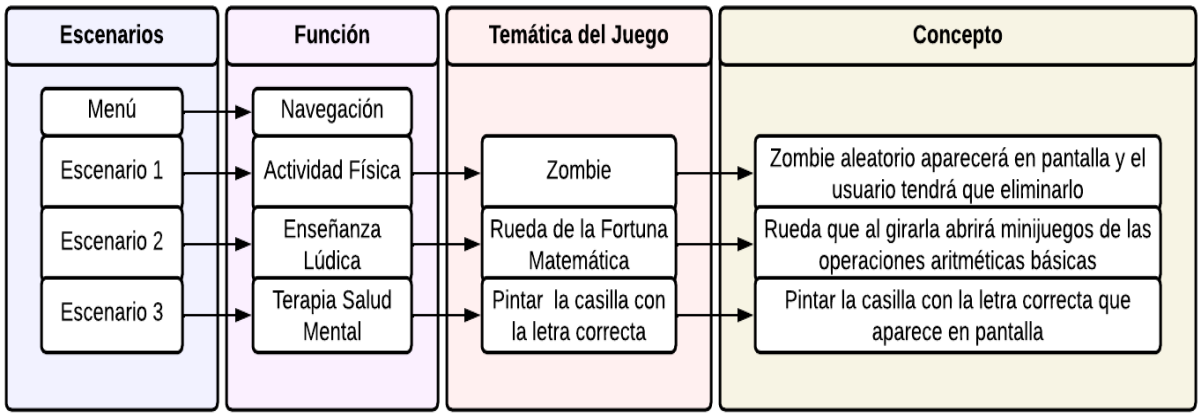


Selección de Conceptos y Temáticas para Escenarios Virtuales

Una vez revisadas algunas aplicaciones, se seleccionó las temáticas para cada uno de los escenarios virtuales. Un resumen de esta selección se muestra en la Figura 52. Para el escenario 1 en el cual se buscará incentivar la actividad física se tendrá una temática de zombies en donde se tendrá que eliminarlos, mientras que para el escenario 2 se podrá incentivar la enseñanza lúdica mediante una rueda matemática de la fortuna que tendrá minijuegos de las operaciones aritméticas. Finalmente, para el ultimo escenario se buscó capacitación con profesionales de la salud mental para buscar una manera de ayudar a la terapia de niños con trastornos de aprendizaje como la dislexia. Se llegó a la conclusión que un juego en cual se elija y se pinte de un color la letra correcta dentro de un conjunto de letras es un juego ideal para tratar este problema.

Figura 52

Diagrama de Escenarios con su temática y conceptos asignados.



Selección de la Plataforma de Desarrollo de Videojuegos

Habiéndose determinado la temática es necesario seleccionar la plataforma de desarrollo de los videojuegos, para ello a continuación, la Tabla 7, presenta un resumen comparativo entre las principales plataformas que existen. Después de revisar las características y capacidades mostradas, se seleccionó a Unity 3D como la mejor opción para este proyecto. Así también se optó por utilizar el lenguaje de programación C#, Unity

3D por su facilidad de uso y gran flexibilidad para crear juegos en múltiples géneros y plataformas. Además, el modelo de licencia gratuito para proyectos pequeños y una gran comunidad de soporte hacen de Unity 3D una plataforma ideal para principiantes en el desarrollo de videojuegos.

Tabla 7

Tabla comparativa entre las principales plataformas de desarrollo de videojuegos que se pueden encontrar

Característica	Unity 3D	Unreal Engine	GDevelop	RPG Maker
Lenguaje de Programación	C# [a]	C++ [b]	Sistema de eventos sin código [c]	JavaScript, Ruby[d]
Modelado y Animación	Soporte integrado para animaciones 2D y 3D[a]	Herramientas avanzadas para modelado, UV y “baking” [b]	No especificado	No especificado
Realidad Virtual y Aumentada	Soporte completo para RV y RA[a]	Soporte completo para RV y RA [b]	No especificado	No especificado
Multiplataforma	Desarrollo para más de 25 plataformas[a]	Alta portabilidad con soporte para múltiples plataformas [b]	Android, Navegador Web, Linux, MacOS, iOS [c].	PlayStation, Microsoft, Macintosh, Game Boy, Nintendo, entre otros [d]
Gráficos	Renderizado de alta calidad para juegos 2D y 3D[a]	Gráficos de alta calidad y rendimiento con tecnologías como Nanite y TSR [b]	No especificado	No especificado
Comunidad y Soporte	Amplia comunidad y excelente documentación[a]	Comunidad extensa y recursos de aprendizaje [b]	No especificado	No especificado

Característica	Unity 3D	Unreal Engine	GDevelop	RPG Maker
Licencia	Gratuita para proyectos personales o de bajo ingreso[a]	Gratuita hasta que el producto comercial genere ingresos [b]	Licencia MIT (Software Libre) [c]	Software privado [d]

Nota: [a]Recuperado de Fernández (2023) por TokyoSchool. [b]Recuperado de Bleger (2022) por Crehana. [c]Recuperado de GDevelop (s.f.) por GDevelop Inc. Recuperado de RPGMaker (s.f.) por RPGMaker

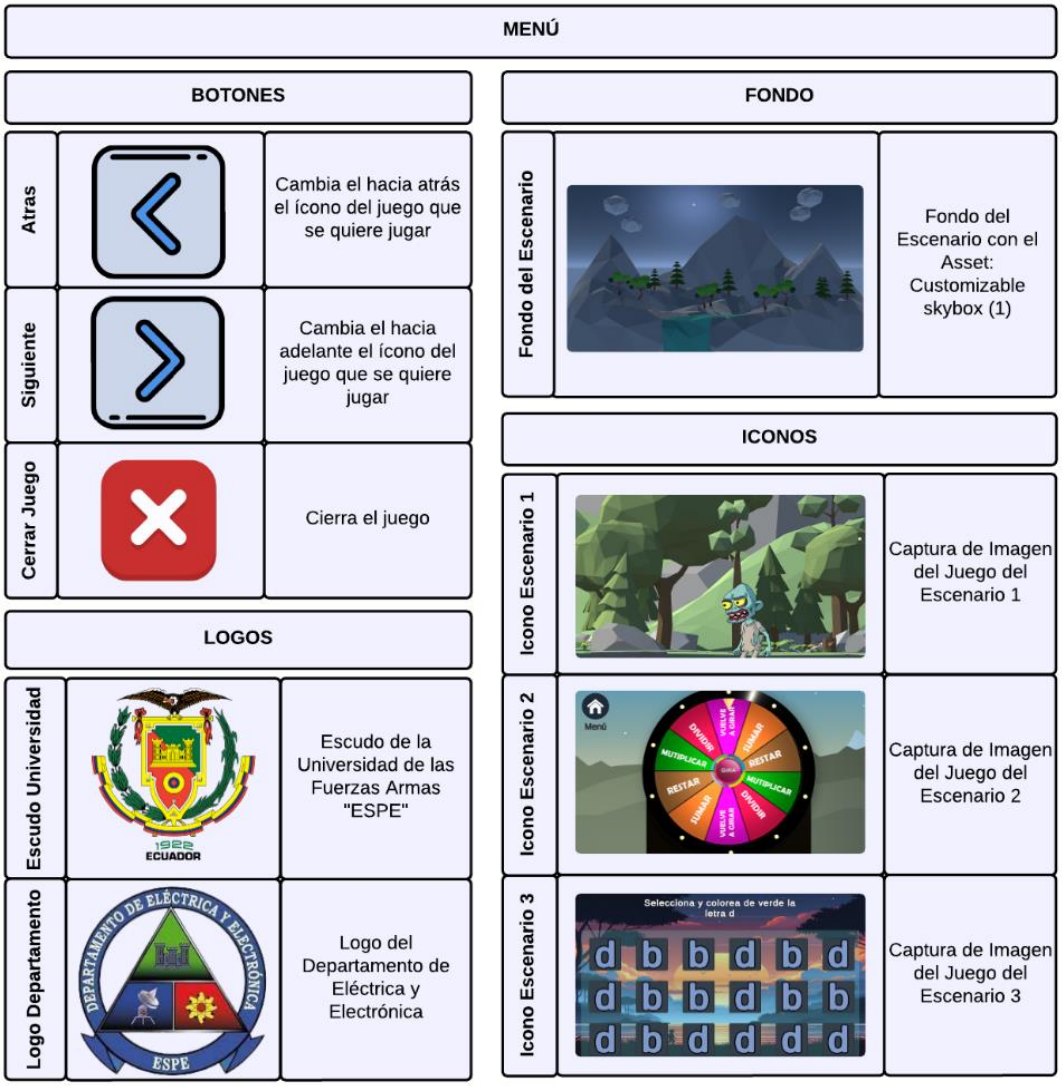
Creación de Elementos Gráficos y Visuales

Con la plataforma de videojuegos seleccionada se procede al diseño e implementación de cada elemento gráfico de los distintos juegos del sistema. Se debe mencionar que los elementos gráficos y visuales utilizados en los escenarios fueron de licencia gratuita o creados por los autores de este proyecto. La Figura 53 muestra detalladamente los elementos utilizados en el diseño de la pantalla Menú.

Se destacan 3 botones para poder elegir a que escenario se desea ir más uno para cerrar la aplicación, también se encuentra tanto el escudo de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” como el logo del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la ESPE. Finalmente, para el fondo del Menú se utilizó un Asset (que es la representación de cualquier ítem que puede ser utilizado en el juego) que fue descargado gratuitamente de la tienda oficial de Unity 3D con el nombre de: Customizable skybox y los 3 iconos de cada escenario para que el usuario final pueda elegir que juego quiere jugar.

Figura 53

Elementos gráficos y visuales utilizados en Escenario Menú

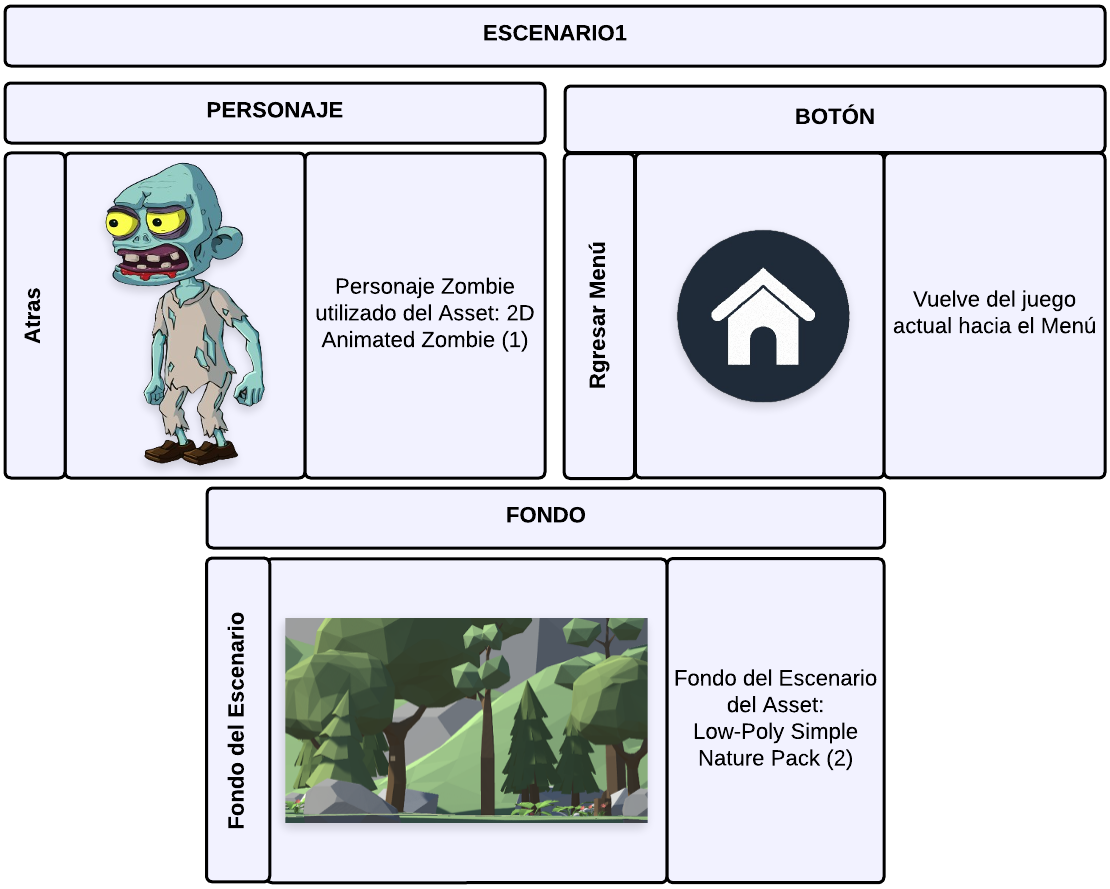


Nota: (1) Asset tomado de Unity Store (2020)

En el escenario 1 para el personaje del zombie se descargó el Asset: 2D Animated Zombie y para el fondo el Asset: Low-Poly Simple Nature Pack. Finalmente se integró un botón de Menú para regresar al escenario Menú una vez que el juego haya concluido. En la Figura 54 se visualiza de mejor manera lo antes dicho.

Figura 54

Elementos gráficos y visuales utilizados en el escenario 1.



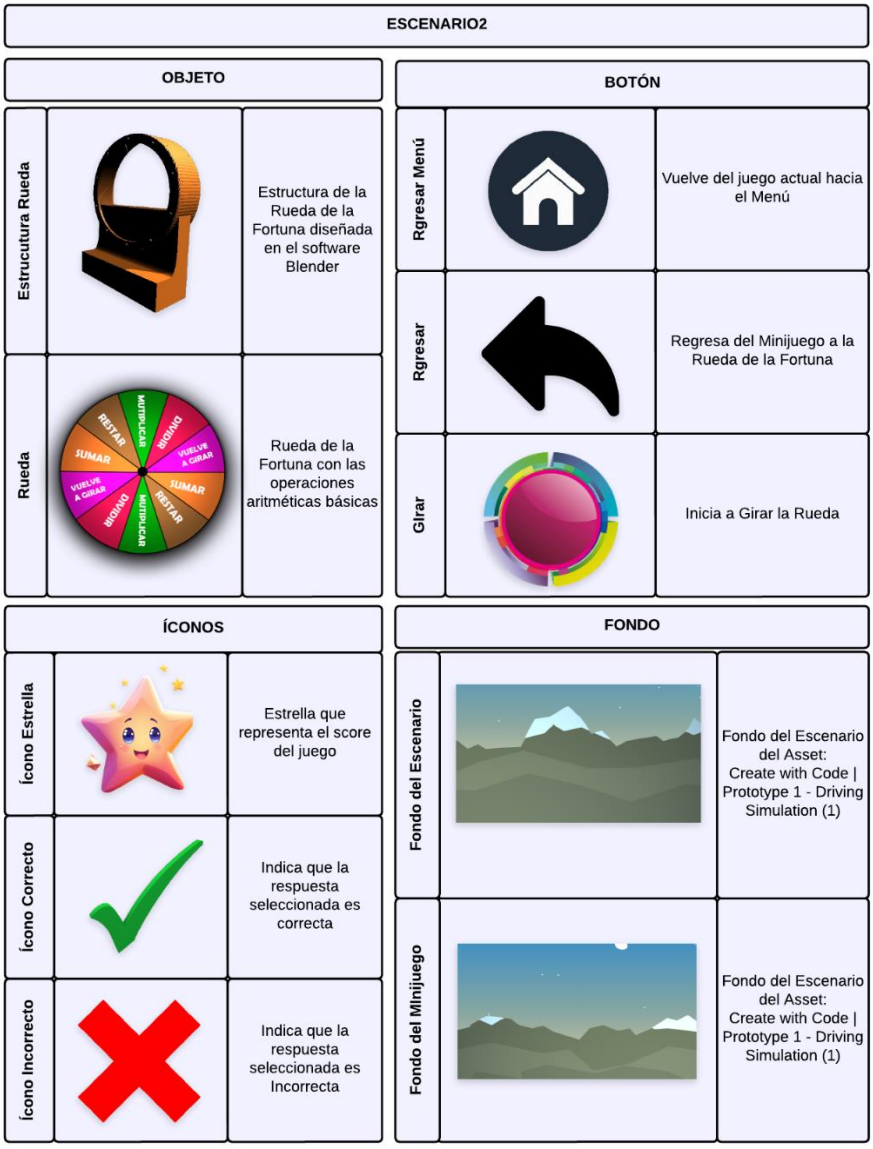
Nota: (1) Asset tomado de UnityStore (2020). (2) Asset tomado de Unity Store (2023)

El escenario 2 tiene como objetivo implementar una ruleta de juegos matemáticos básicos. Funciona como una rueda de la fortuna que gira, esperando un estímulo dado por el usuario, el que hará que se detenga y se seleccione a un minijuego con la operación aritmética básica a efectuarse. Los objetos y elementos se ilustran en la Figura 55. Adicionalmente tiene botones que permiten: regresar al escenario Menú, regresar al escenario de la rueda o hacer girar a la misma rueda dependiendo de la selección del usuario. Por otra parte se ubican los íconos que representarán al puntaje, si la respuesta a la operación es correcta o incorrecta y por último el escenario requiere los fondos de la

rueda como el del minijuego. Ambos fondos fueron descargados del Asset: Create with Code | Prototype 1 - Driving Simulation.

Figura 55

Elementos gráficos y visuales utilizados en el escenario 2.



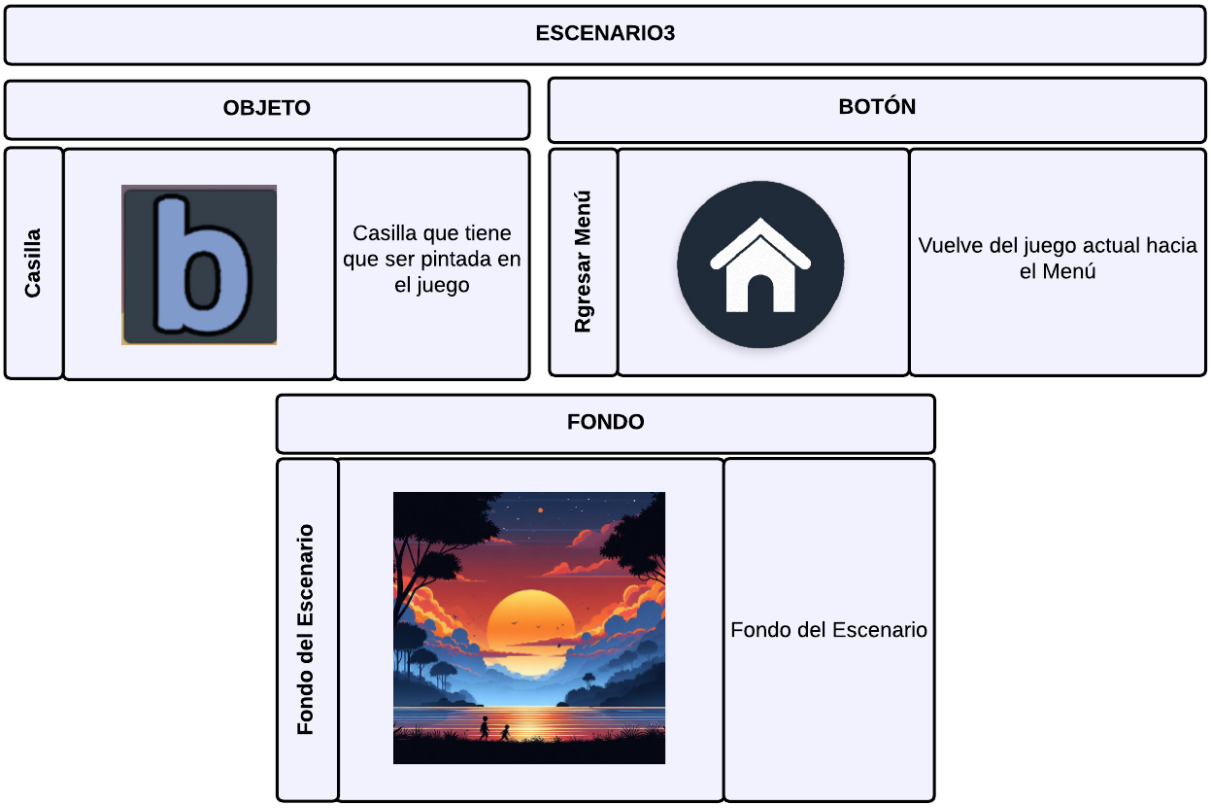
Nota: (1) Asset tomado de UnityStore (2019)

El último escenario, que es relacionado con la terapia mental es gráficamente sencillo como lo muestra la Figura 56. En ella se puede observar los 3 elementos visuales utilizados: a) El botón Menú para regresar del juego actual al Menú Principal, b)

la casilla que contendrá la letra que será pintada por el usuario final de acuerdo a la letra que se muestra en pantalla y, c) el fondo del juego.

Figura 56

Elementos gráficos y visuales utilizados en el escenario 3.



Integración de Elementos Gráficos en los Escenarios Virtuales

Una vez diseñados e implementados cada uno de los elementos visuales de los escenarios, se debe realizar el proceso de integración. Para ello se ha tomado en cuenta los principios recomendados por Martínez (2011) para el desarrollo de interfaces gráficas; principios que fueron detallados en el Capítulo 2 considerando principalmente que la aplicación sea lo más intuitiva posible. El proceso para la utilización que se ha utilizado es realizar un boceto de la pantalla, para luego integrarlos en la plataforma de desarrollo.

Así, en relación a la pantalla Menú, la Figura 57 muestra el boceto, en tanto que la Figura 58 muestra el resultado de la integración de la pantalla correspondiente.

Figura 57

Boceto de interfaz de Escenario Menú

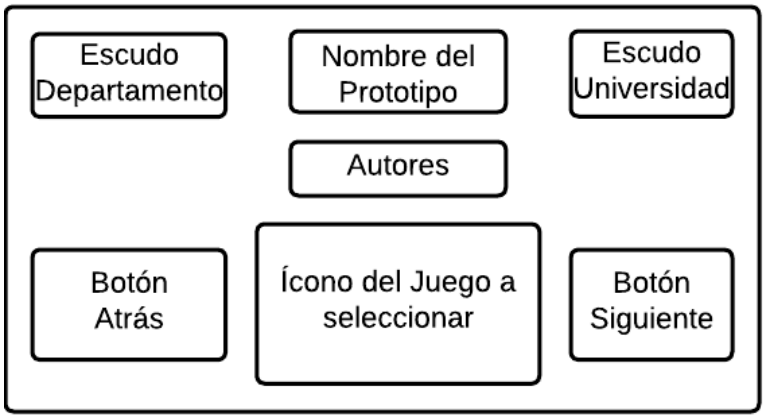


Figura 58

Diseño de interfaz de Escenario Menú

De forma similar para el escenario1, la Figura 59 muestra el boceto. En el caso de este escenario, se tendrá una zona en la que aparecerán un zombie aleatoriamente. Adicionalmente se dispondrá del botón para regresar al menú principal y un lugar donde

se muestra el puntaje obtenido. La Figura 60 muestra versión final del escenario con la integración de todos los elementos del escenario 1.

Figura 59

Boceto de interfaz de Escenario 1

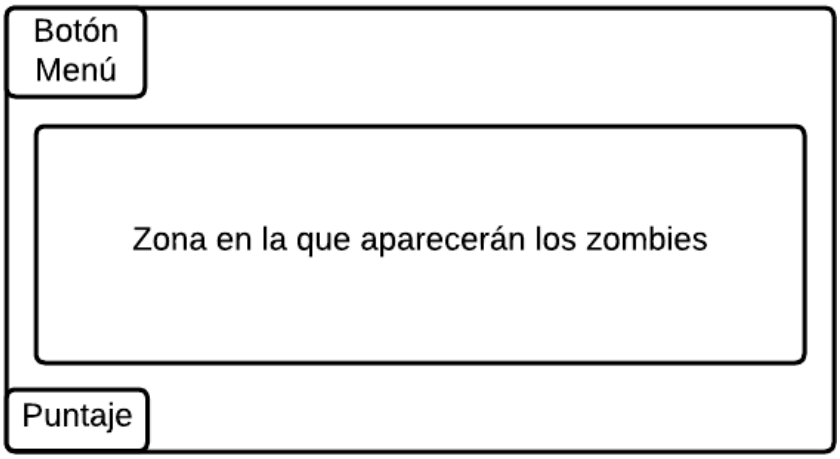


Figura 60

Diseño de interfaz de Escenario 1

Respecto al escenario 2, rueda matemática de la fortuna, la Figura 61 muestra un boceto. Este escenario tendrá una zona en la que se ubiquen la rueda de la fortuna con todas las operaciones aritméticas. Adicionalmente dispone de un botón para regresar al

menú principal y otro botón para que inicie a girar la rueda. La Figura 62 muestra la integración de todos los elementos del escenario 2.

Figura 61

Boceto de interfaz de Escenario 2

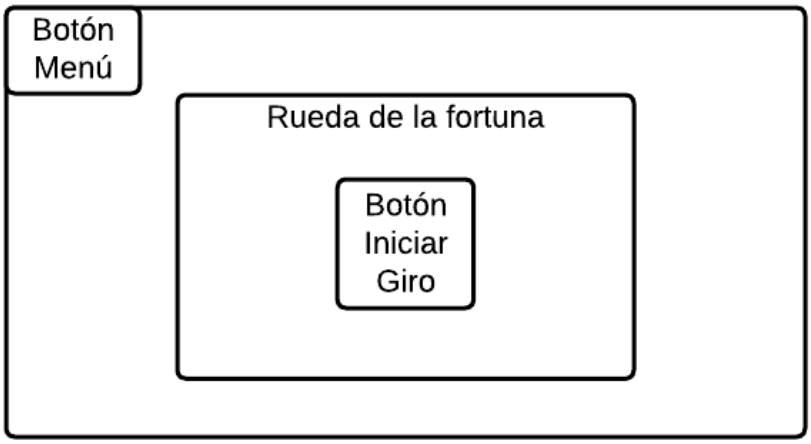


Figura 62

Diseño de interfaz de Escenario 2

En el caso de este escenario este llama a otra ventana que contiene un minijuego relacionado con la operación seleccionada al terminar de girar la rueda. La Figura 63 muestra el boceto de la pantalla del minijuego. En esta pantalla se ubica una zona en

donde se visualiza la operación a realizar. Adicionalmente se muestran unos recuadros de opciones múltiples en donde se muestran los posibles resultados que el usuario debe seleccionar. Si el usuario se equivoca sobre el recuadro seleccionado aparecerá una “equis”, en tanto que si el usuario acierta aparecerá un “visto”. Además, esta ventana dispondrá un botón para volver a la pantalla principal de la rueda del escenario 2 y de una zona en donde se vea el puntaje del juego. Finalmente, la Figura 64 muestra versión final del escenario con la integración de todos los elementos del minijuego.

Figura 63

Boceto de interfaz de minijuego

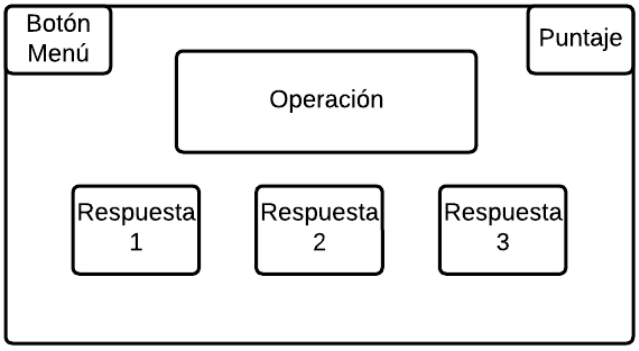
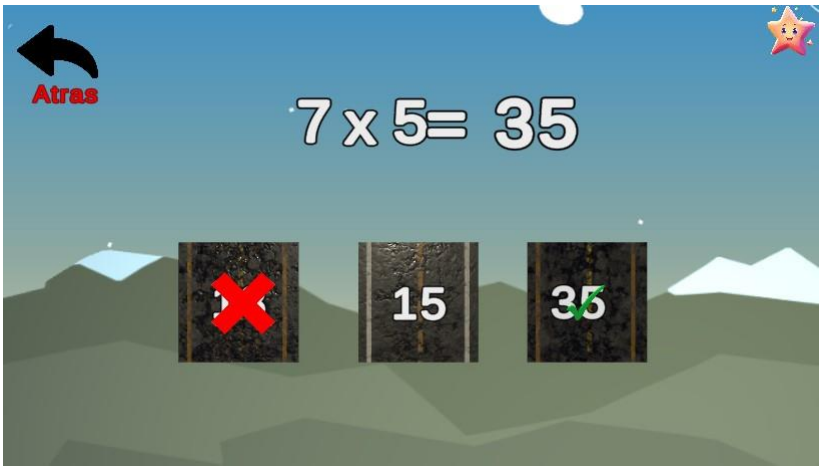


Figura 64

Diseño de interfaz de minijuego



Finalmente, el boceto del escenario 3, del aplicativo de terapia de dislexia, se muestra en la Figura 65. Este escenario tendrá una zona en donde se aparecerá un mensaje indicando que letra hay que pintar y una zona donde aparecerán todas las letras para que el usuario seleccione y un botón para regresar al menú principal. En la Figura 66 se muestra la versión final del escenario 3.

Figura 65

Boceto de interfaz de Escenario 3

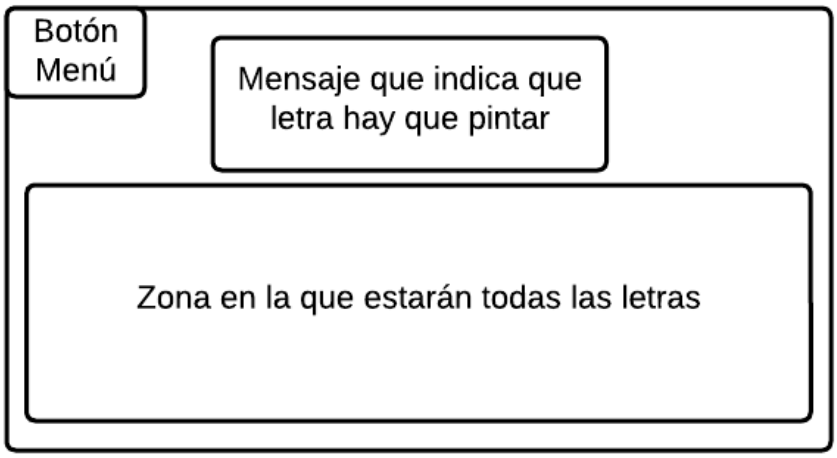


Figura 66

Diseño de interfaz de Escenario 3

Programación de los Escenarios Virtuales

La integración de los escenarios permite contar con las pantallas visuales de la aplicación, ahora se debe realizar la programación de los escenarios, lo que determina las acciones que ejecutará la aplicación de acuerdo a la selección realizada por el usuario. Como se indicó anteriormente, el driver de interacción, al recibir una coordenada, la transforma en una coordenada física (x,y,z) dentro de los escenarios. Si la coordenada recibida corresponde a una parte del escenario con quién se puede interactuar, se llamará a la función relacionada.

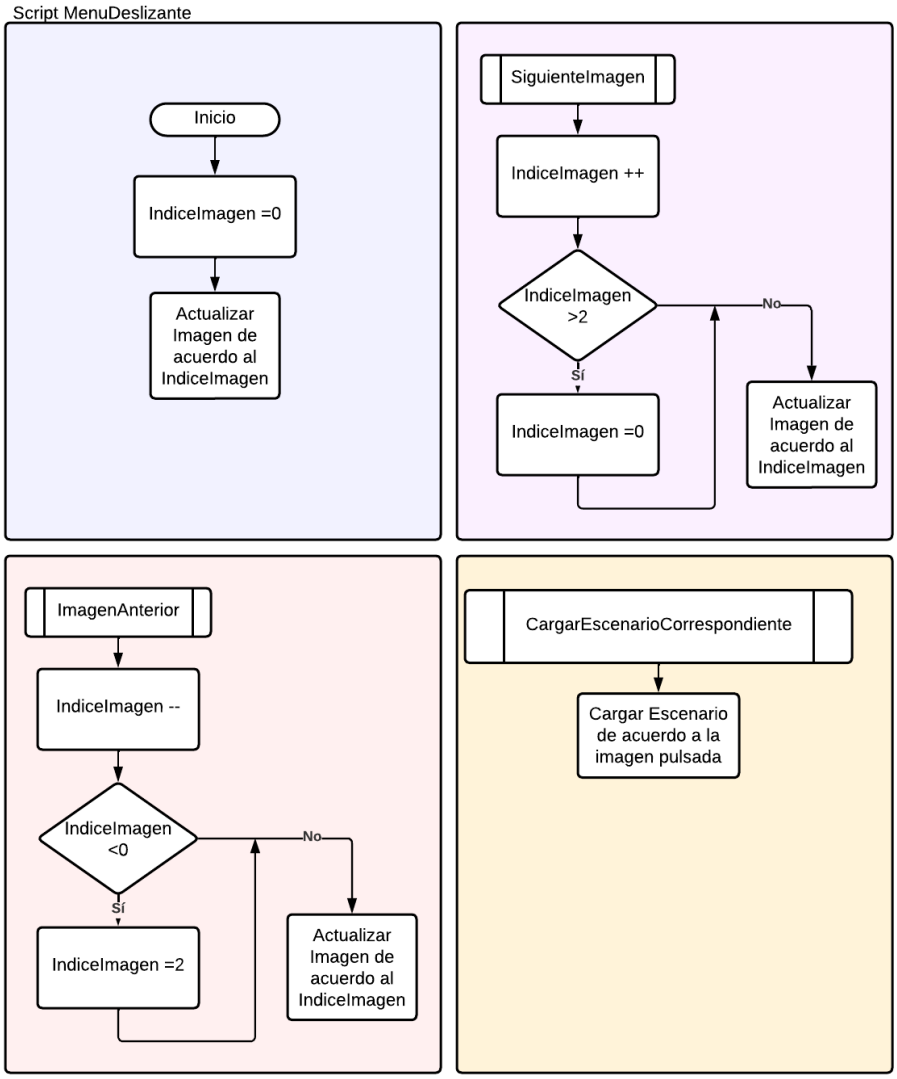
En esta sección se ilustrarán los diseños de las funciones de los objetos interactivos de cada escenario, diseños realizados en diagramas de flujo. Hay que mencionar que las funciones Inicio() y Update() son funciones definidas propias de Unity para cada escenario por lo que a través del driver de interacción no es necesario llamarlas. la función Inicio() se ejecuta apenas se inicia el escenario y la función Update() se ejecuta cuando ocurre cualquier cambio dentro del juego. El código resultado de la implementación de cada uno de los diagramas de flujos se encuentra en el Apéndice C.

Diagramas de Flujo Menú Principal

Para el Menú Principal se creó el script MenuDeslizante. En la Figura 67 se muestran las diferentes funciones que lo conforman. Se puede destacar las funciones ImagenAnterior() y SiguienteImagen() que sirven para elegir el escenario al que se desea ir, de esta manera el usuario podrá navegar entre todos los juegos y jugará con el que sea de su gusto.La función CargarEscenarioCorrespondiente() que es la que lleva al escenario elegido

Figura 67

Diagramas de Flujo utilizados para el escenario Menú

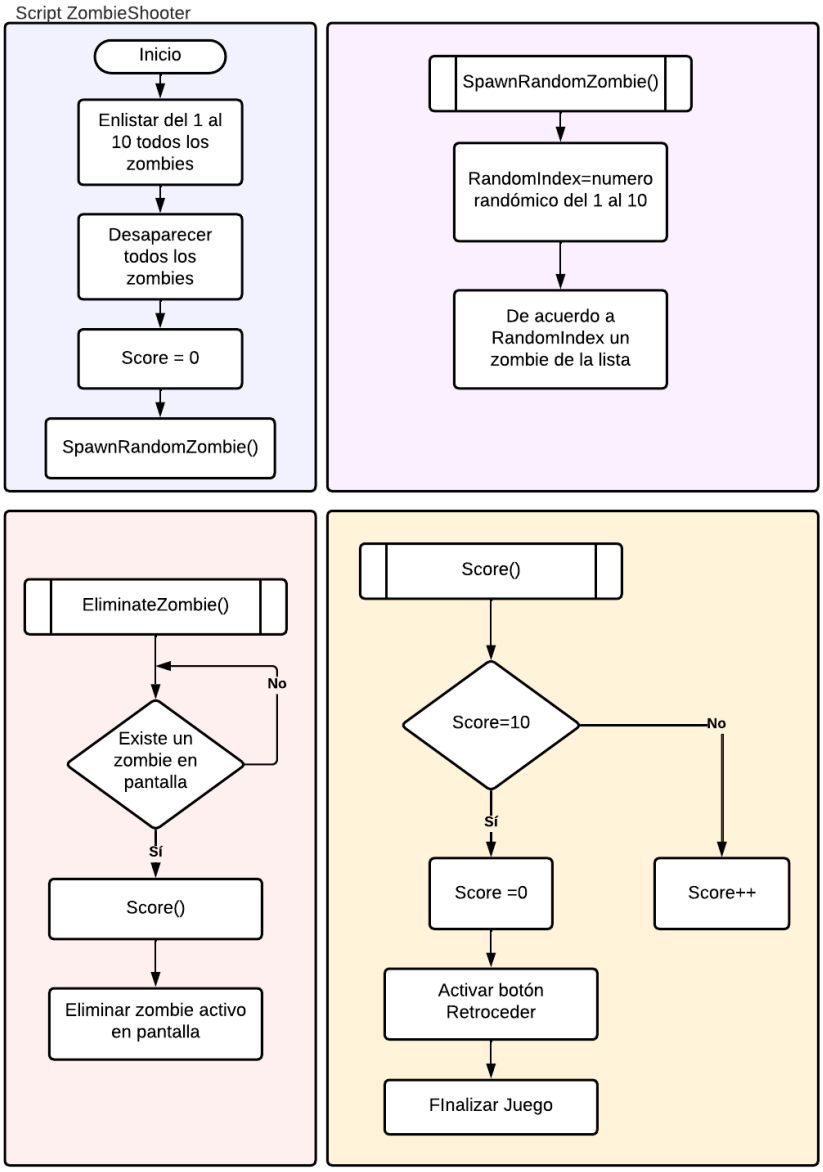


Diagramas de Flujo Escenario 1

En el escenario, es decir en el escenario donde se deben eliminar los zombies se creó el script ZombieShooter y en la Figura 68 se muestran las funciones más importantes para el juego. La función que hace aparecer un zombie randomicamente se llama SpawnRandomZombie(), eliminarlo con EliminateZombie(). Cuando el juego debe terminar la función Score() es la encargada de llevar la cuenta del puntaje para hacer terminar el juego.

Figura 68

Diagramas de Flujo utilizados para el escenario 1



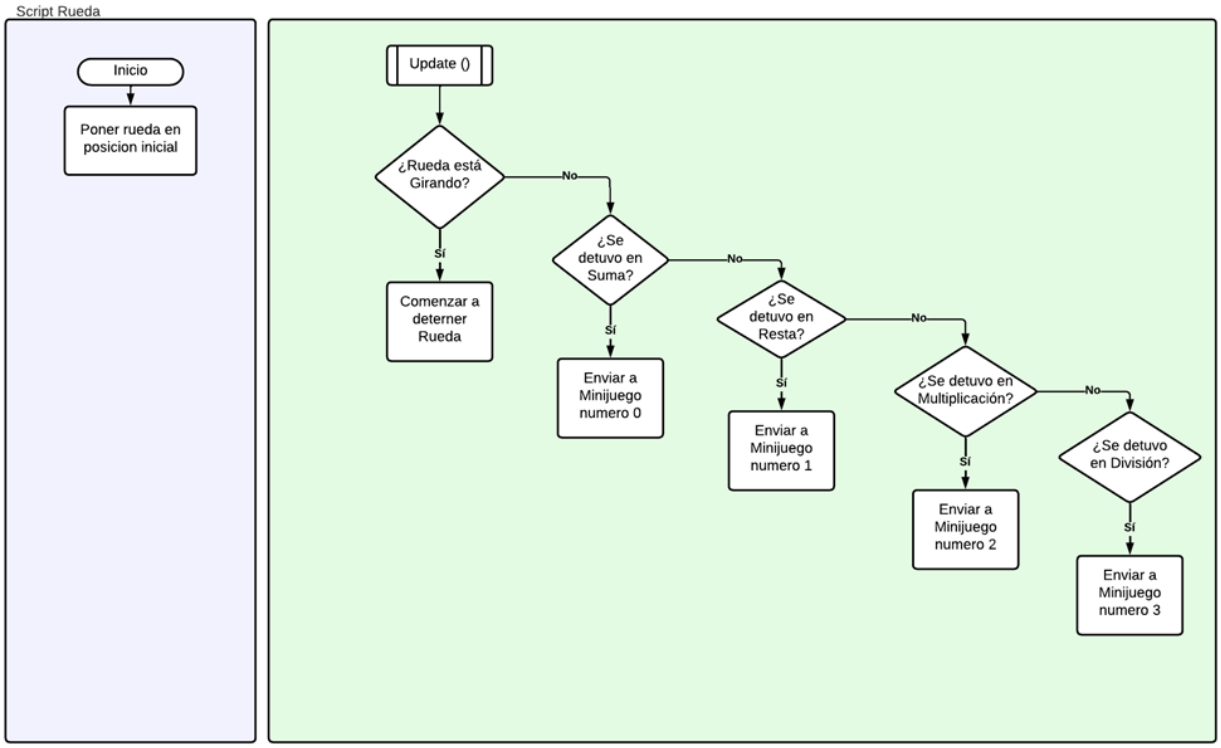
Diagramas de Flujo Escenario 2

Para el juego de la Rueda Matemática (Escenario 2) se utilizaron varios scripts para poder desarrollar el juego. Hay que tener en cuenta que de este escenario aparece otro escenario con un minijuego de operaciones básicas de aritmética. En la Figura 69 se muestra el diagrama de flujo del script Rueda que es el encargado de hacer funcionar la rueda matemática de la fortuna. La función Inicio() simplemente coloca la rueda en su

posición inicial mientras que la función Update() se encarga de hacer detener la rueda mientras está en movimiento y cuando finalmente se detiene envía un número al script Calcular dependiendo en que operación se detuvo y a raíz de eso se inicia el minijuego con la operación seleccionada por la rueda.

Figura 69

Diagramas de flujo utilizados en el script Rueda para el escenario 2



Las funciones programadas en el script Calcular se muestran en la Figura 70 y en la Figura 71. Se puede visualizar que al inicio el script recibe el dato del script Rueda y dependiendo del número recibido llama a la función Calcula indicándole que operación toca realizar. Enseguida se asigna valores aleatorios al número1 y número2 de la operación para luego dependiendo de la operación sumarlos, restarlos, multiplicarlos o dividirlos. Finalmente, se muestran en orden aleatorio tanto el resultado válido como las otras alternativas erróneas. Dependiendo de la interacción del usuario se ejecutarán las funciones que permiten la interactividad con el usuario.

Figura 70

Diagramas de flujo utilizados en el script Calcular para el escenario 2 (a)

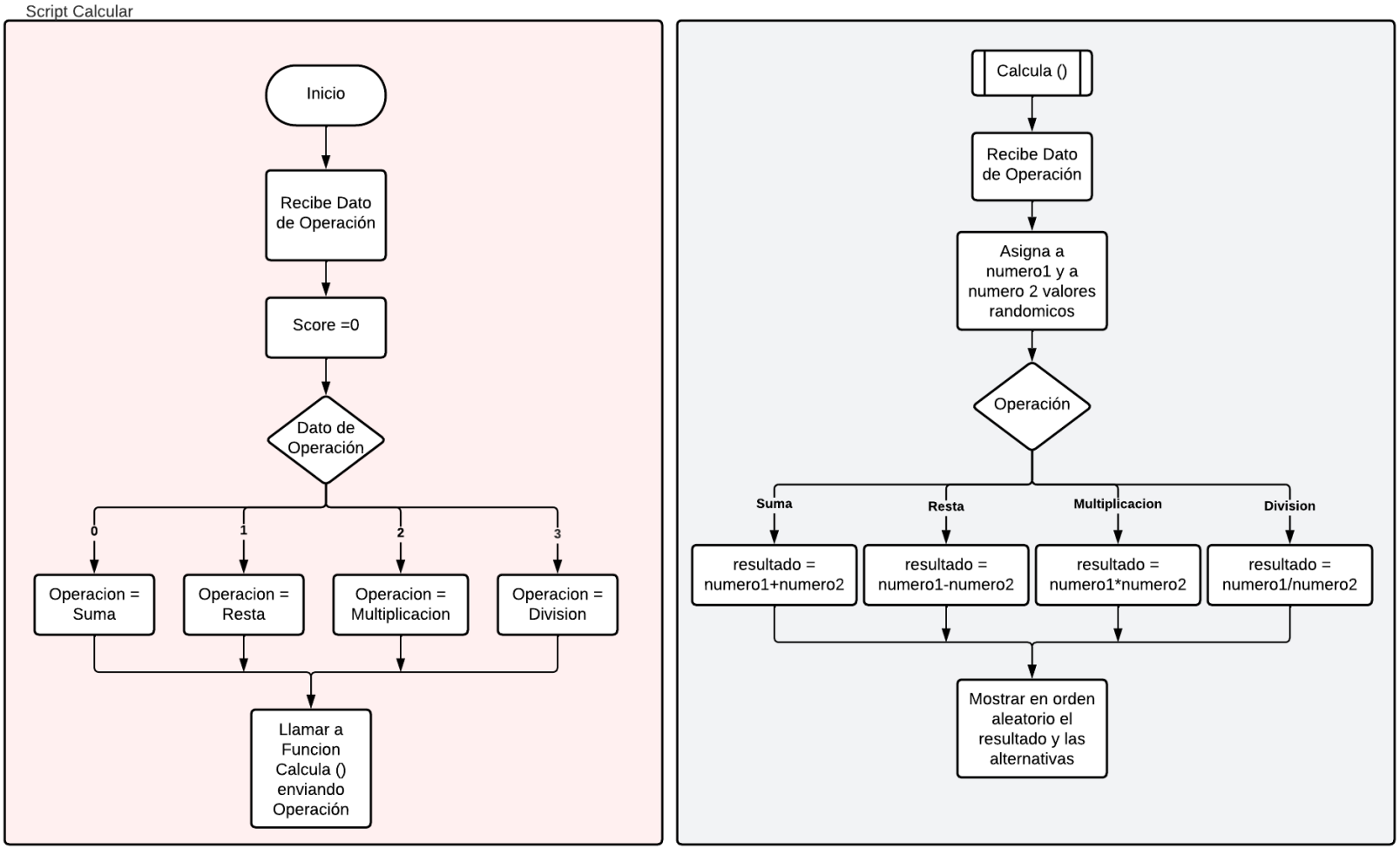


Figura 71

Diagramas de flujo utilizados en el script Calcular para el escenario 2 (b)

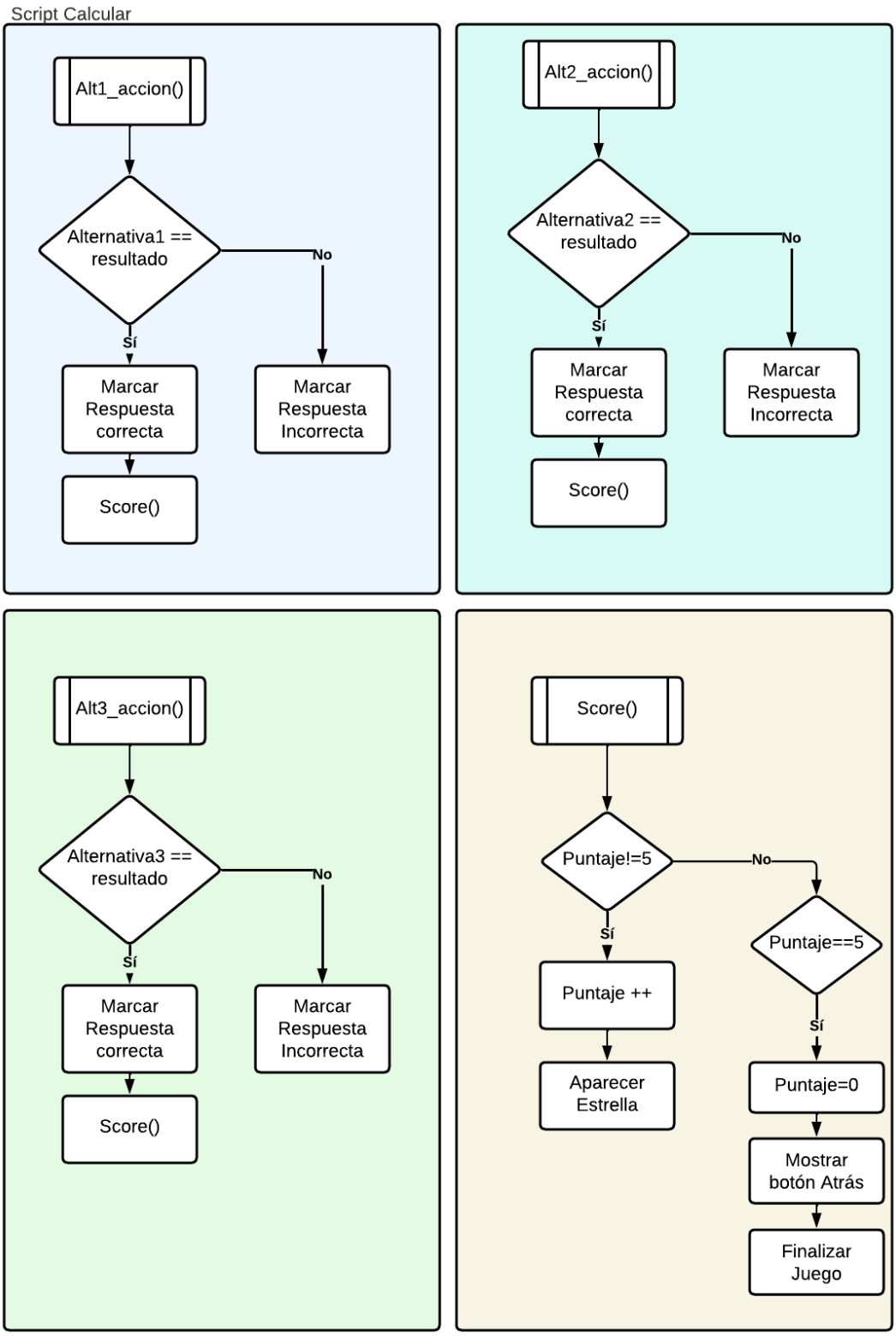
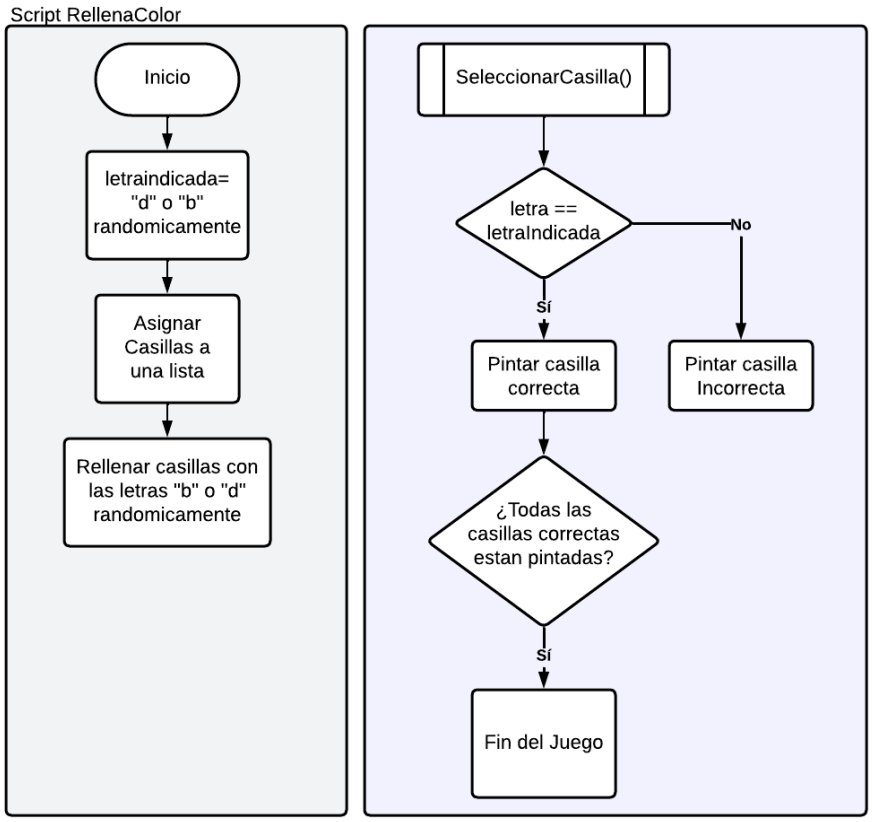


Diagrama de Flujo Escenario 3

Para el último escenario, relacionado con la dislexia, se creó el script RellenaColor. El diagrama de flujo del mencionado script se puede observar en la Figura 72. Este juego antes de iniciarse mostrará la letra que debe ser buscada en la sopa de letras. Los pares de letras que fueron considerados para el juego son: “d” y “b”, “u” y “n”, “p” y “q”, “j” e “i” y finalmente “h” y “n”. Así por ejemplo se pedirá que se busque la letra “d”, en una sopa de letras que contenga letras” d” y “b”. El llenado de estos dos caracteres será realizado de manera aleatoria. Cuando se selecciona la letra correcta se pinta la casilla de verde y cuando se selecciona la incorrecta se pinta la casilla de rojo. Cuando todas las casillas con las letras correctas están pintadas, finaliza el juego.

Figura 72

Diagramas de flujo utilizados en el script RellenaColor para el escenario 3



Este capítulo ha resumida el diseño e implementación del aplicativo que se ejecuta en el computador embebido del controlador del sistema. Una vez constuído el ejecutable y montado sobre la plataforma de hardware, se procederá a realizar las pruebas del sistema completo de muro digital interactivo. En el capitulo 5 se evaluará y se analizarán los datos obtenidos en las pruebas hechas al sistema.

Capítulo 5: Evaluación del Prototipo

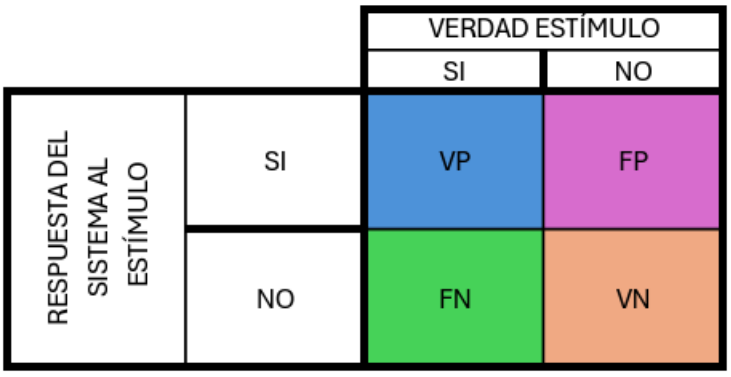
El presente capítulo presenta los resultados y el respectivo análisis de las pruebas realizadas en el prototipo propuesto por el presente proyecto. La evaluación del sistema se ha realizado de manera cuantitativa y cualitativa. En la evaluación cuantitativa se ha realizado la métrica de evaluación cuanto a la precisión, exactitud, tiempo de respuesta, consumo de potencia y costos del sistema. Para ello se ha considerado evaluarlo en diferentes condiciones: a) Diferente nivel de iluminación ambiental, b) diferente distancia de lanzamiento y c) diferente objeto utilizado para la estimulación del sistema. En tanto que la evaluación cualitativa ha considerado medir la facilidad de uso y experiencia del usuario, para lo que se ha diseñado y ejecutado una encuesta. Adicionalmente se ha estimado el consumo de potencia y el costo del sistema para proporcionar una referencia del desempeño del sistema.

Evaluación Cuantitativa

Para realizar la evaluación del prototipo se ha utilizado la clasificación binaria aplicando la teoría de la matriz de error. Esta teoría se presenta en la Figura 73.

Figura 73

Matriz de error ante la presencia de un estímulo.



Un verdadero positivo se presenta cuando el modelo responde que una condición es positiva y realmente lo es. Un verdadero negativo es cuando el modelo responde que

una condición que no es positiva y realmente no lo es. Por otro lado, un falso positivo es cuando el modelo indica que una condición es positiva cuando en realidad no lo es y un falso negativo es cuando el modelo indica que algo no es positivo cuando en realidad lo es.

En el caso del presente estudio, se utilizan dos variables de respuesta del sistema para determinar la precisión y el error del sistema. Por un lado, la respuesta al estímulo del toque del objeto sobre la pantalla, y por otro, la codificación correcta de la celda estimulada por el usuario. Para analizar estas posibilidades se ha considerado las situaciones que se podrían presentar en el uso del sistema y que se encuentran descritas en la Tabla 8. Situaciones que determinarán los VP, FP, VN y FN del sistema y que más adelante permitirán evaluar la precisión, la proporción de verdaderos positivos y el porcentaje de error del sistema. Como se puede observar en la Tabla 8, hay casos que son fácilmente clasificables de forma directa como el caso 1 y 5; en tanto que otros, requieren de un análisis detallado.

Tabla 8

Posibles casos de respuesta del sistema.

Caso	Estímulo	Respuesta del sistema	Clasificación de la matriz de error
1	Estímulo en coordenada específica	Codificación correcta de la celda estimulada	VP
2	Estímulo en coordenada específica	Codificación incorrecta de la celda estimulada	A definir
3	Estímulo en coordenada específica	Ausencia de respuesta del sistema	A definir
4	Ausencia de estímulo	Codificación de celda	A definir
5	Ausencia de estímulo	Ausencia de respuesta del sistema	VN

Para clasificar a que elemento de la matriz de error pertenece cada situación, se va a utilizar el análisis anidado, siendo la variable anidada(subordinada) la coordenada de

la celda estimulada. La Figura 74 representa este análisis. Por ejemplo, si el usuario estimula la celda A2 y el sistema le responde decodificando como celda estimulada la A1, si se considera únicamente la variable del estímulo, pues el sistema detectó la presencia de un estímulo de manera adecuada; sin embargo, no se puede considerar como respuesta correcta, ya que la codificación de la celda estimulada es incorrecta y por lo tanto se considera como FP. Por otro lado, si no hubo un estímulo y el sistema responde con una coordenada especifica entonces igualmente sería un FP. La Tabla 9 muestra de forma completa el análisis de todos los casos.

Figura 74

Matriz de error definida de variable estímulo y coordenada.

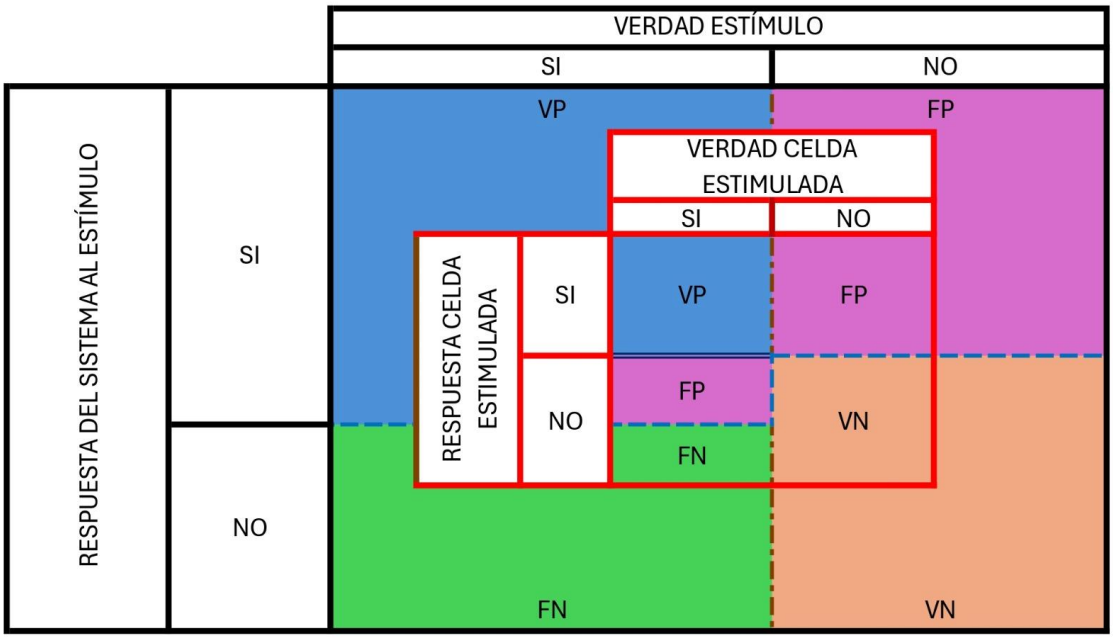


Tabla 9

Clasificación de posibles casos de respuesta.

Caso	Estímulo	Respuesta del sistema	Clasificación de la matriz de error
1	Estímulo en coordenada específica	Codificación correcta de la celda estimulada	VP

Caso	Estímulo	Respuesta del sistema	Clasificación de la matriz de error
2	Estímulo en coordenada específica	Codificación incorrecta de la celda estimulada	FP
3	Estímulo en coordenada específica	Ausencia de respuesta del sistema	FP
4	Ausencia de estímulo	Codificación de celda	FN
5	Ausencia de estímulo	Ausencia de respuesta del sistema	VN

Por otra parte, para medir el desempeño del equipo se tomaron medidas del tiempo de respuesta del sistema. Para medir la eficiencia energética se comparará con sistemas similares y finalmente se comparará el costo del sistema frente a productos comerciales.

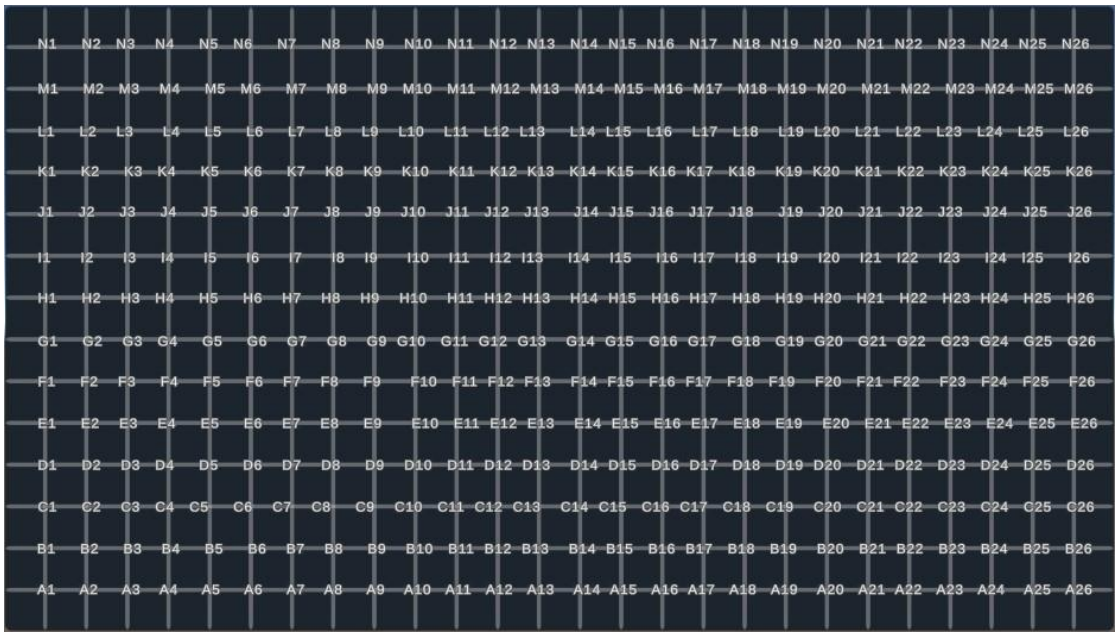
Evaluación de la precisión, exactitud y del error del prototipo

Con la finalidad de obtener la matriz de error de una manera exhaustiva se propuso montar un escenario de pruebas de estímulo sobre una grilla. La grilla dibuja una matriz de 14 filas y 26 columnas que representa una resolución de 364 coordenadas de la matriz de sensores infrarrojos que definen las celdas del muro interactivo. La

Figura 75 muestra el escenario implementado en Unity 3D en donde se rotuló cada una de las 364 coordenadas existentes en el sistema.

Figura 75

Pantalla para la evaluación del prototipo



Esta pantalla se la cargó en el sistema como si fuese un escenario y por tanto fue proyectado en el marco a través del periférico de salida. De esta manera se facilita la toma de datos para la evaluación del prototipo. Se realizaron pruebas de 20 estímulos por cada una de las 364 celdas, es decir, 7280 lanzamientos. Los lanzamientos se efectuaron a una distancia de 1 metro con una luz de ambiente aproximada de 550 lux. En la

Figura 76 se evidencia uno de los lanzamientos realizado durante las pruebas. Tomando como referencia la clasificación de los casos de respuesta, estas pruebas se enfocan en los casos 1, 2 y 3 de la Tabla 9. En tanto que para probar los casos 4 y 5 que no consideran estímulo, se realizaron pruebas dejando el sistema encendido por 5,5 horas durante el día para verificar si el sistema presenta alguna respuesta. Considerando que la prueba de estímulo dura alrededor 2,55 segundos en promedio (Ver Tabla 14), se pudo estimular el sistema 7.280 veces. Dando como resultado el número total de pruebas de 14.560. Los resultados clasificados por la matriz de error se resumen en la Tabla 10.

Figura 76

Evidencia pruebas FP, FN, VP y VN

Tabla 10

Datos obtenidos FP, FN, VP y VN

Parámetro	Cantidad	Porcentaje
VP	6.589	45,25%
FP	695	4,77%
VN	7.276	49,97%
FN	0	0%

De acuerdo con estos resultados se obtuvo un error del 4,77%. En este estudio el error está representado sólo por los falsos positivos ya que no existió ningún caso de falsos negativos. Por otra parte, la proporción de casos verdaderos es de un 95,22%, compuesto por un 49,97% de verdaderos negativos y un 45,25% de verdaderos positivos (Véase Figura 80). Con estos resultados se puede concluir que el sistema tiene un error de 4,8%; siendo únicamente un error tipo I ya que no presentó FN. Para el cálculo de la precisión se aplicó la Ecuación 3. Dando como resultado un 90,5%. Adicionalmente se calculó la exactitud mediante el uso de la Ecuación 4, dando como resultado 95,2%.

$$P = \frac{VP}{VP + FP} = \frac{6.589}{6.589 + 695}$$

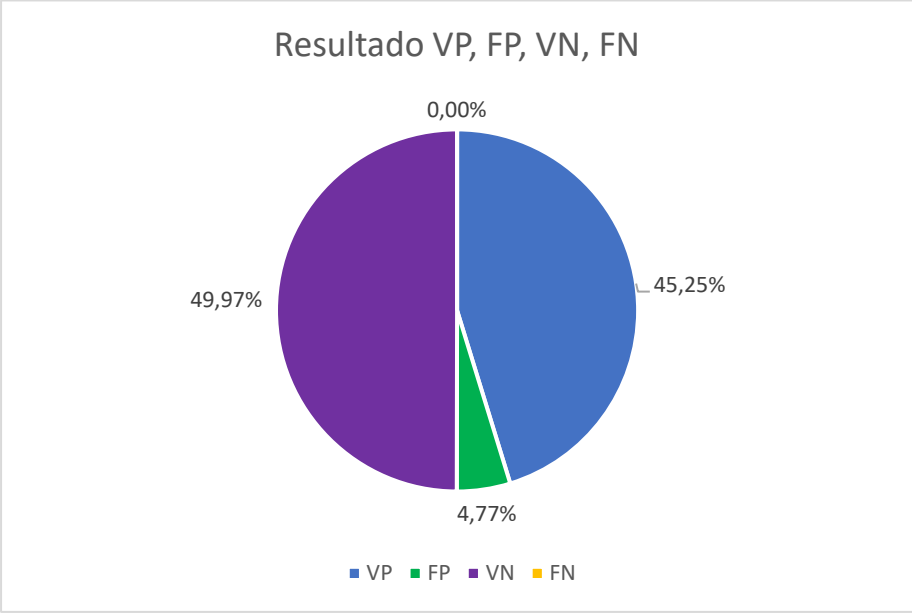
$$P = 0{,}905 = 90{,}5\% \qquad (3)$$

$$E = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN} = \frac{6.589 + 7.276}{14.560}$$

$$E = 0{,}952 = 95{,}2\% \qquad (4)$$

Figura 77

Resultados VP, FP, VN y FN.



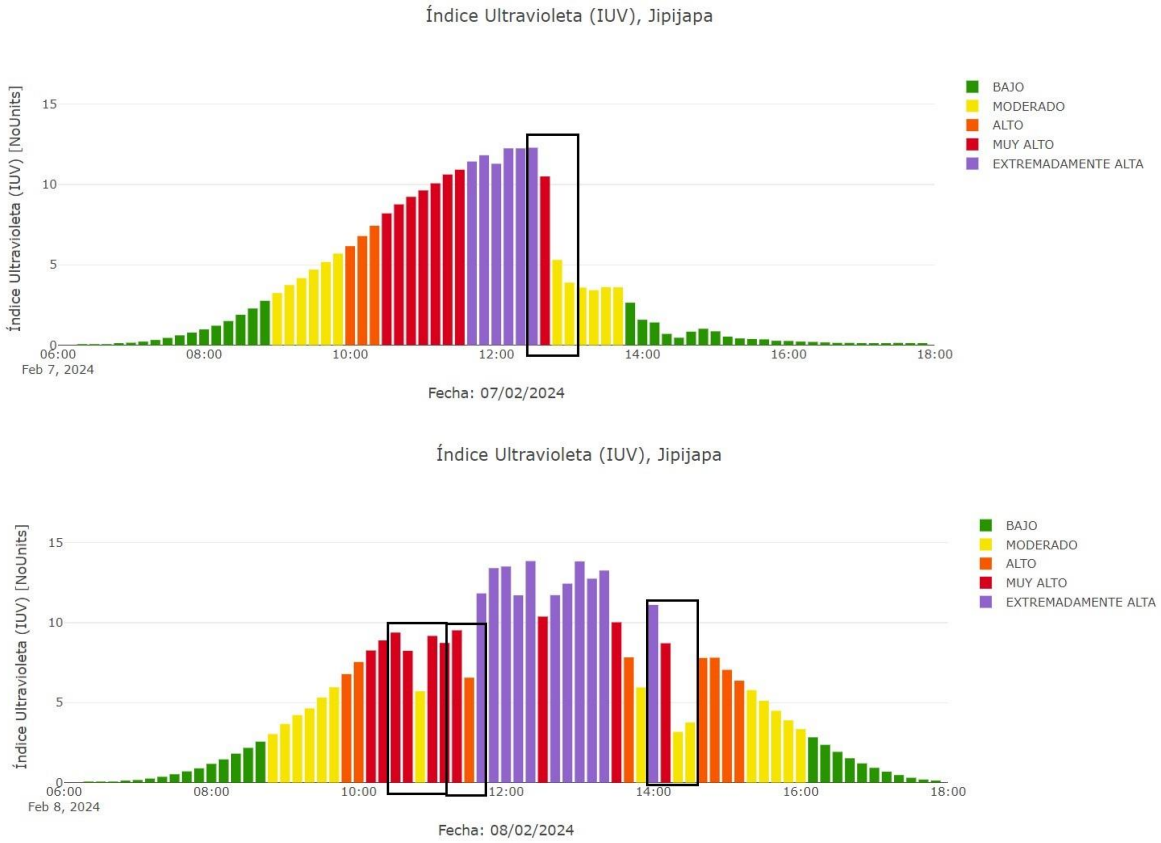
Es importante anotar que hubo la presencia de 1 falso positivo ocasionados por la codificación de una celda ante la ausencia del estímulo. Con el objeto de comprobar este fenómeno se expuso al sistema durante 25 horas adicionales sin realizar ningún estímulo y se observaron 3 respuestas del sistema con codificaciones de celda. Ante ello se percibió que la hora en la que se presentaban los errores era similar, siendo en las horas de mayor radiación solar (10am a 14pm).

Dentro de los FP se pudo observar que algunos de estos se produjeron por interferencia electromagnética por un cambio brusco del índice de radiación ultravioleta ambiental (IUV). Por eje (Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, 2024)mplo, el día 7 de febrero a las 13:27 horas se detectó la coordenada B17 sin haber realizado un estímulo. Analizando el IUV dado por la secretaría de ambiente del municipio de Quito (Véase Figura 78) podemos deducir que dicho FP se dio por un cambio brusco

de “muy alto” a “moderado”. De igual forma el día 8 de febrero se detectó 3 FP por estos cambios bruscos.

Figura 78

IUV del día 7 y 8 de febrero del 2024.



Nota: Fallos encontrados en las zonas delimitadas por rectángulos color negro. Adaptado de Radiómetro Jipijapa (2024) por Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito.

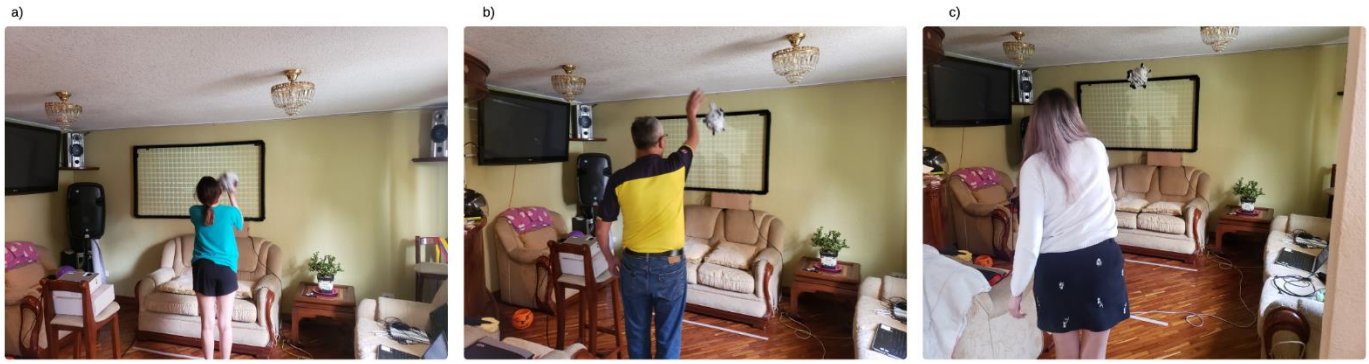
Evaluación del sistema con diferentes condiciones

A continuación, se detallan los resultados de las pruebas para: a) Diferente nivel de iluminación ambiental, b) diferente distancia de lanzamiento y c) diferente objeto utilizado para la estimulación del sistema. Para evitar el sesgo del resultado, ocasionado por las habilidades del usuario, se optó por probar con 5 usuarios de diferentes edades, y se les solicitó lanzar un objeto 10 veces a distancias de 1, 2 y 3 metros en ambientes con

diferente luminosidad ambiental considerando luz baja (< 4 lux), luz media (>4 lux y <600 lux) y luz alta (> 1200 lux). La Figura 79 se evidencia las pruebas realizadas con distintos usuarios.

Figura 79

Prueba para determinar la distancia ideal de funcionamiento del sistema.

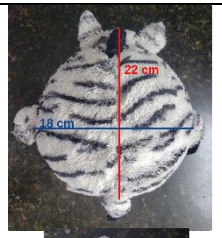
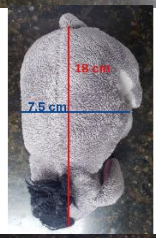


Nota: a) Lanzamiento a 1 metro. b) Lanzamiento a 2 metros. c) Lanzamiento a 3 metros.

Para estas pruebas hay que considerar que la resolución del muro es de 5,6 x 6 cm, y por ello el objeto ideal para probar la precisión sería uno de estas medidas. Sin embargo, cuando se probó con este objeto los usuarios tenían inconvenientes ya que no lograban apuntar a una celda específica. Por ello, considerando que los escenarios virtuales poseen elementos gráficos de mayores dimensiones que una celda, se optó por realizar pruebas con diversos objetos para determinar el más apropiado para el usuario. Los objetos usados se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11

Objetos propuestos para pruebas de evaluación.

Objeto	Descripción	Foto	Textura	Dimensión (largo x ancho x profundidad) o diámetro [cm]	Foto con las dimensiones
Peluche estándar	Peluche color blanco y negro. Forma redonda		Algodón y Poliéster Suave	18 x 22 x 16	
Peluche Pequeño	Peluche color morado oscuro y negro. Forma irregular		Algodón y Poliéster Suave	7,5 x 18 x 11	
Pelota PVC Normal	Pelota color morado. Forma redonda		Lisa	19,4	
Pelota PVC Pequeña	Pelota color naranja. Forma redonda		Lisa	5,4	

Para ello se realizó pruebas con la aplicación de los escenarios, a una distancia de un metro con luz media. Se ejecutaron 40 lanzamientos al marco, con 4 tipos diferentes de objetos de distinto tamaño y material, las características de estos objetos se pueden ver en la Tabla 11. La Figura 80 muestra una prueba con el objeto ideal que está denominado en el presente estudio como “Peluche estándar”.

Figura 80

Prueba para determinar el objeto con el que mejor reacciona el sistema

Las pruebas se realizaron en la aplicación de usuario comprobando el funcionamiento de los diferentes botones y eventos de los escenarios. Durante las pruebas se evidenció que había un error humano muy alto al interactuar con el objeto de dimensiones ideales, correspondiente a la “pelota de PVC pequeña” de 5,4cm de diámetro. Este error en el manejo se producía en varios casos cuando la pelota golpeaba en el punto de intersección de varias celdas. La Tabla 12 resume los resultados de estas pruebas. En ella se observa que el menor error lo tiene el “Peluche estándar” con un porcentaje de 5%. Por ello se decidió utilizar este objeto como el elemento de prueba de la aplicación con los 3 escenarios virtuales.

Tabla 12

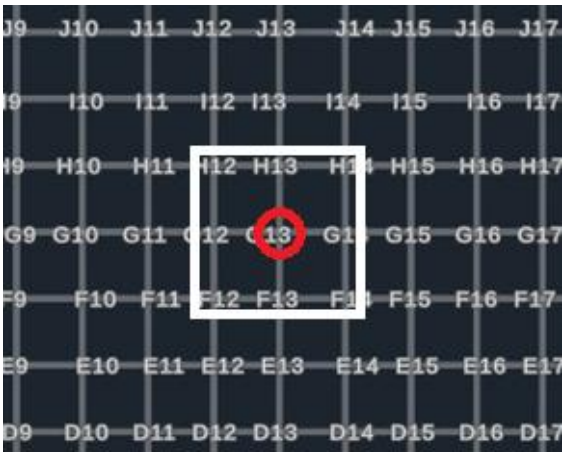
Resultados obtenidos con diferentes objetos.

Objeto	% Error
Peluche estándar	5 %
Peluche Pequeño	7,5 %
Pelota PVC Normal	12,5 %
Pelota PVC Pequeña	75 %

Consideración de las pruebas. Dado que el objeto seleccionado tiene una dimensión de 18 x 22 x 16 cm y la celda de 5,6 x 6 cms, por tanto el área que golpeará el peluche tendrá una dimensión de 3 x 3 celdas adyacentes. Esto se lo llamó área de tolerancia, y se efectúa ya que el sistema decodifica la primera celda detectada por el sistema, que no necesariamente será el centro del objeto. Un ejemplo visual de este fenómeno con el área de tolerancia se ilustra en la Figura 81.

Figura 81

Ilustración área de tolerancia.



Nota: Punto rojo es la coordenada apuntada y cuadrado blanco es el área de tolerancia.

Por lo tanto, para evaluar el comportamiento ante estímulos a diferentes distancias y niveles de iluminación ambiental, se estableció como un funcionamiento correcto si la respuesta esté dentro del área de tolerancia. Los resultados del análisis de estos datos se presentan en la Tabla 13, considerando como error que la celda detectada se encuentra fuera del área de tolerancia. De acuerdo con estos datos, el sistema se comporta poco funcional con un alto nivel de iluminación ambiental. En entornos con iluminación ambiental media y baja, se observa un incremento considerable de los errores a una distancia de 3 metros.

Tabla 13

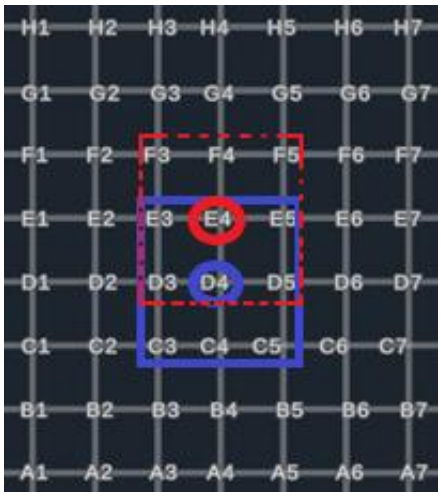
Resultados obtenidos a diferentes distancias y niveles de iluminación con objeto Peluche estándar.

Nivel Iluminación Ambiental	**Distancia**		
	1m	2m	3m
Baja (<4 lux)	16%	22%	32%
Media (>4 lux, <600 lux)	12%	28%	42%
Alta (>1200 lux)	36%	54%	66%

En la mayoría de los casos de error, se observó que el error tenía el patrón mostrado en la Figura 82. Al analizar este patrón, se deduce que el usuario cometió un error, y si bien debía apuntar a la celda “D4”, apuntó a la celda adyacente (“E4”). Entonces dadas las dimensiones del “Peluche estándar”, el sistema reconoció la celda(“F4”), que corresponde al área de tolerancia de la celda “E4”. Se deduce esto porque la coordenada de respuesta se encuentra a lado del área de tolerancia original y por tanto es muy probable que el sujeto de pruebas tuviera un error al apuntar (Véase Figura 82). En todo caso dicha falla en el apuntamiento no afecta considerablemente a la interacción del sistema, considerando que los elementos gráficos de los escenarios están constituidos por varias celdas adyacentes.

Figura 82

Ejemplo errores encontrados



Nota: Color azul: Área que se debía estimular; Color rojo: Area que el usuario estimuló.

Evaluación del tiempo de respuesta

Finalmente se realizaron pruebas de medición del tiempo de respuesta de cada uno de los escenarios virtuales de la Aplicación de Usuario. Para medir el tiempo de respuesta del sistema, se ha considerado el tiempo transcurrido desde que se aplica un estímulo al sistema hasta que el escenario responda con la ejecución de la acción seleccionada por dicho estímulo. Con la finalidad de tener un patrón de comparación, se probó el sistema con la SBC y además utilizando como controlador del periférico de salida a un computador portátil AMD Rizen 7 serie 5000 (Véase Tabla 16).

Para ello se realizó 10 mediciones sobre el menú principal y 10 por cada escenario virtual y se obtuvo un promedio por escenario. Evidentemente, los tiempos de respuesta dependen de la complejidad gráfico de los escenarios, como se muestra en la Tabla 14. Así, la ventana menú al no contener numerosos elementos gráficos no tiene demoras en responder. Por el contrario, el escenario de la rueda matemática de la fortuna, al presentar más elementos con diferentes texturas, su promedio fue mayor. Adicionalmente se calculó la media del sistema, siendo un valor de 2,55 segundos de tiempo de respuesta. El tiempo

de respuesta va ligado a que la capacidad gráfica de la SBC se satura al renderizar los elementos gráficos. Ver Apéndice D.

Tabla 14

Tiempos de respuesta promediados de cada escenario con SBC.

Escenario	Descripción	Promedio Tiempo Respuesta [seg]
0	Menú principal	1,07
1	Eliminar Zombies	2,59
2	Rueda de la fortuna matemática	4,1
3	Pintar la casilla con la letra correcta	2,45
Media		2,55

Tabla 15

Tiempos de respuesta promediados de cada escenario con computador portátil.

Escenario	Descripción	Promedio Tiempo Respuesta [seg]
0	Menú principal	0,67
1	Eliminar Zombies	0,7
2	Rueda de la fortuna matemática	0,69
3	Pintar la casilla con la letra correcta	0,67
Media		0,68

Consumo de Potencia

Para el consumo de potencia se registró la corriente y voltaje de cada elemento conectado a la fuente de alimentación durante la ejecución de la aplicación de usuario. La Tabla 16 nos indica que la placa PCB, que contiene los sensores, es el elemento que más

consume. Se puede observar que la FPGA y la SBC tienen un menor consumo. Siendo el consumo de potencia total del sistema de 11,99 vatios.

Tabla 16

Potencia individual de cada componente del prototipo

Elemento	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
Placa PCB	2,106	3,37	7,1
Raspberry Pi 4	0,606	5,19	3,15
FPGA Cyclone II	0,336	5,19	1,74
Total	3,048	-	11,99

Para determinar su eficiencia energética comparado con otras soluciones, se probó el sistema utilizando como controlador del periférico de salida a un computador portátil AMD Rizen 7 serie 5000. Obteniéndose un consumo de potencia de 73,84 vatios. Como se observa en la Tabla 17 el consumo total de potencia del prototipo es 6 veces menor comparado al utilizar un computador portátil. Además, se comparó el caso de los productos comerciales que poseen una pantalla integrada y se observó que el prototipo consume 21 veces menos que los sistemas con pantalla táctil integrada (Véase Tabla 18).

Tabla 17

Potencia comparada con cpu AMD Ryzen 7 en lugar de SBC

Elemento	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
Placa PCB	2,106	3,37	7,1
AMD Ryzen 7	3,332	19,5	65
FPGA Cyclone II	0,336	5,19	1,74
Total	5,774	-	73,84

Tabla 18

Potencia individual de cada componente

Elemento	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
Placa PCB	2,106	3,37	7,1
AMD Ryzen 7	0,606	5,19	65
Pantalla 70”	-	-	185
FPGA Cyclone II	0,336	5,19	1,74
Total	-	-	258,84

Costos Totales del Sistema

El costo total se presentará detallando los precios individuales de cada componente del sistema. La Tabla 19 resume los costos. En ella se observa que la estructura, la FPGA Cyclone II y la Raspberry Pi 4 son los elementos más costosos del sistema, representando una porción significativa del costo total. En contraste, la PCB y los elementos que van en ella tienen los costos más bajos. El costo total del sistema es de 262 dólares.

Tabla 19

Costo detallado del prototipo

Ítem	Costo $
Estructura	50,00
FPGA Cyclone II	50,48
Raspberry Pi 4	82,19
Sensores	35,64
PCB	6,94

Ítem	Costo $
Alambre cobre	6,00
Resistencias	1,60
Transistores	4,00
Fuente 5 V	12,20
Convertidor DC-DC reductor	2,95
Caja	10,00
Total	262,00

Además, se realizó una comparativa del costo si se tuviera como controlador del periférico de salida un computador portátil AMD Rizen 7 serie 5000. Obteniéndose un costo total de 1.079,80 dólares (Véase Tabla 20). El costo del prototipo con SBC representa el 24% del costo comparado con computador portátil.

Tabla 20

Costo detallado con computador portátil

Ítem	Costo $
Estructura	50,00
FPGA Cyclone II	50,48
Computador Portátil AMD Ryzen 7	899,99
Sensores	35,64
PCB	6,94
Alambre cobre	6,00
Resistencias	1,60

Ítem	Costo $
Transistores	4,00
Fuente 5 V	12,20
Convertidor DC-DC reductor	2,95
Caja	10,00
Total	1.079,80

Para ver la diferencia con los productos comerciales, se comparó los costos totales de los anteriores casos con productos comerciales. El prototipo con SBC representa el 23,84% del costo comparado con el precio del producto Polyboard. En comparación con el Multiball Mini, el prototipo con SBC representa el 3,89% de su precio (Véase Tabla 21).

Tabla 21

Comparación con productos comerciales

Ítem	Costo $
Prototipo con SBC	262,00
Prototipo con computador portátil	1.079,80
Polyboard interactive Flat Panel	1.099,00[a]
Multiball Mini	6.729,38[b]

Nota. [a]Recuperado de Amazon (2022) por Amazon Web Services Inc. [b]Recuperado de Raspberry (2019) por Raspberry Pi Ltd.

Evaluación Cualitativa

Para evaluar la facilidad de uso y la experiencia del usuario con el prototipo se realizó una encuesta de 13 preguntas de opción múltiple y 3 de opinión. Los diseños de la

encuesta con sus respectivas preguntas se encuentran en el Apéndice E. Su objetivo era recopilar datos sobre la percepción e interacción del usuario con el muro interactivo, centrándose en la comprensión, atractivo y satisfacción general. La encuesta fue administrada a cinco participantes seleccionados diversamente para representar diferentes edades y géneros.

Cada participante interactuó con el prototipo durante un período definido antes de completar la encuesta. Respondieron preguntas de opción múltiple y proporcionaron comentarios adicionales para profundizar la comprensión de sus experiencias. Las preguntas abordaron diversos aspectos, incluyendo la reacción general, comprensión de instrucciones y atracción de escenarios interactivos, además de sugerencias para mejoras.

Las preguntas de opción múltiple fueron valoradas del 1 al 5 siendo 1: muy negativo y 5: muy positivo. Para el caso de la evaluación global de la facilidad de uso se colocó una escala más grande del 1 al 10 siendo 1: Muy difícil y 10: muy fácil. Esto se realizó con el objetivo de tener una mejor percepción de como el usuario comprende los escenarios virtuales. Estas preguntas permiten recopilar datos cualitativos sobre la percepción y la experiencia del usuario, lo que facilitó el análisis comparativo entre los participantes con los diferentes escenarios interactivos. En tanto que las preguntas de opinión sirven como retroalimentación para una futura mejora del sistema.

En la pregunta sobre de facilidad de uso de los escenarios virtuales, un 100% de los participantes no encontraron dificultades en desarrollar las actividades (Ver Figura 83 y Figura 85) en los escenarios de “Eliminar Zombies” y “Pintar casillas con la letra correcta”. Por otro lado, en el escenario “Rueda de la fortuna matemática” un 40% de los participantes tuvieron problemas de interacción con elementos visuales (Ver Figura 84).

Figura 83

Resultados dificultades durante de la interacción en el escenario eliminar zombies

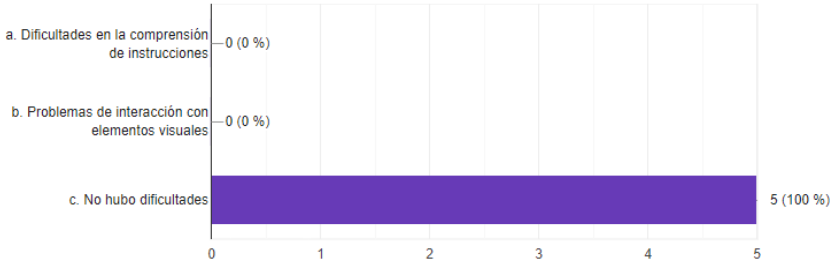


Figura 84

Resultados dificultades durante de la interacción en el escenario rueda de la fortuna matemática

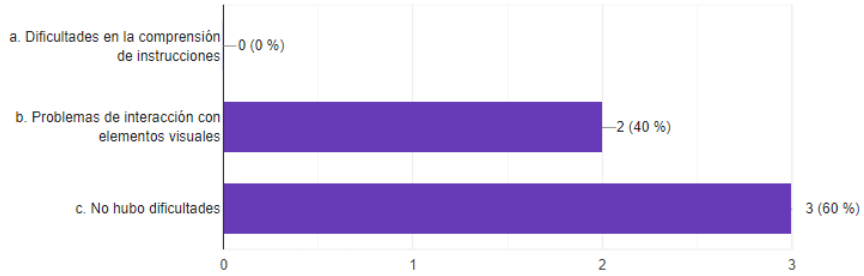
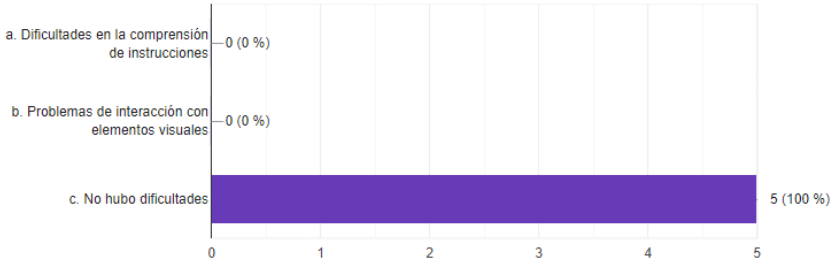


Figura 85

Resultados dificultades durante de la interacción en el escenario pintar casillas con la letra correcta



En la pregunta acerca de la experiencia al Interactuar con los Diferentes Escenarios, un 80% de los participantes percibió como un escenario muy divertido (Ver Figura 86) al escenario “Eliminar Zombies”. Mientras que para el escenario “Rueda de la fortuna matemática” un 20% de los participantes lo catalogaron como muy divertido y el

80% restante como divertido (Ver Figura 87). En el escenario “Pintar casillas con la letra correcta” se obtuvo un 60% como muy divertida y el 40% restante como divertida (Ver Figura 88).

Figura 86

Resultados experiencia al Interactuar con escenario eliminar zombies

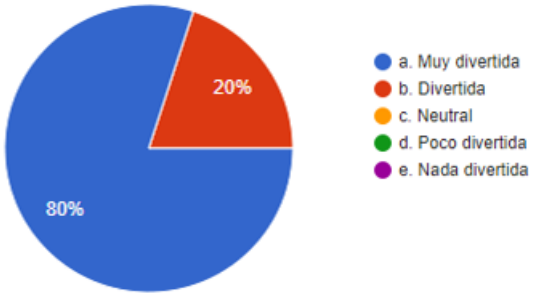


Figura 87

Resultados experiencia al Interactuar con escenario rueda de la fortuna matemática

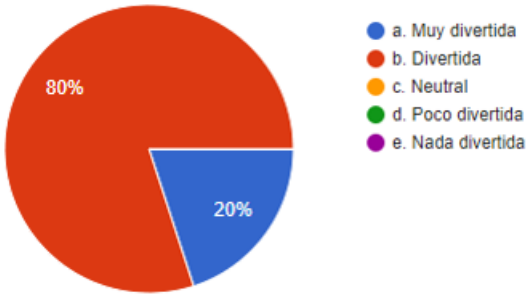
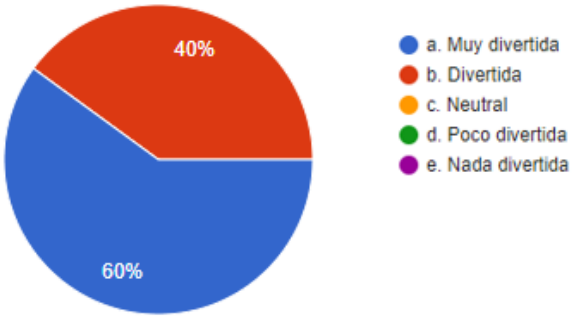


Figura 88

Resultados experiencia al Interactuar con escenario pintar casillas con la letra correcta



En tanto a la pregunta acerca del atractivo de los escenarios virtuales, se obtuvo que el 100% de los participantes de la encuesta encontraron atractivos todos los escenarios virtuales (Ver Figura 89). Por otro lado, en la pregunta que engloba la percepción global de la experiencia del usuario, un 80% de los encuestados tuvieron una experiencia muy positiva y el 20% restante la calificaron como positiva (Ver Figura 90). En el caso de la pregunta de facilidad de uso global el 40% la califico con 10 (muy fácil) y el restante 60% con 9 (Ver Figura 91).

Figura 89

Resultados de percepción de atracción a los escenarios virtuales

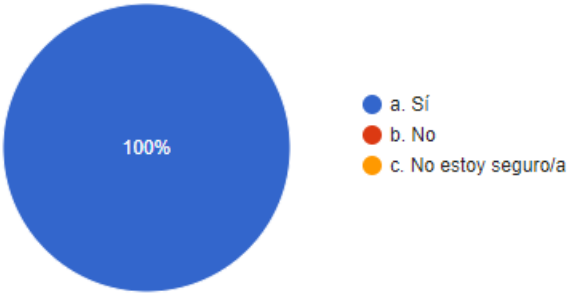


Figura 90

Resultados de percepción global de experiencia del usuario

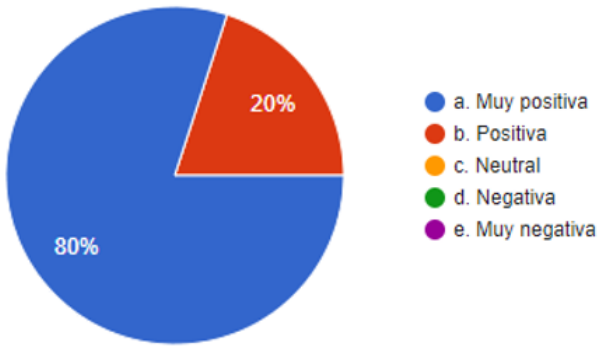
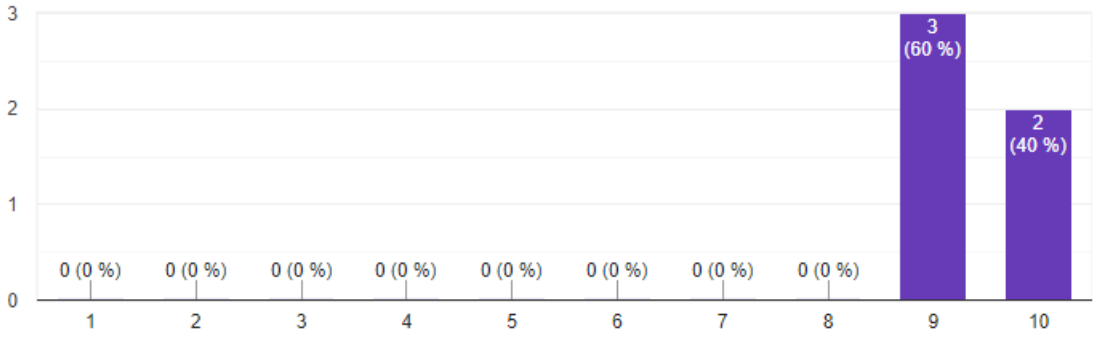


Figura 91

Resultados de facilidad de uso y comprensión de la aplicación de usuario



Análisis de Resultados

En primer lugar, se observa que el prototipo posee una exactitud del 95,2% y una precisión del 90,5% en condiciones de nivel de iluminación medio (aprox. 550 lux). Sin embargo, se encontró una mayor cantidad de fallos con una mayor distancia de lanzamiento y con niveles elevados de luz ambiental.

Además, se observó que cambios bruscos en la radiación ultravioleta ambiental pueden inducir errores, como falsos positivos. Estos errores se producen principalmente cuando el ambiente cambia de un nivel muy alto de radiación a un nivel moderado. Al analizar los errores producidos con el objeto “Peluche estándar” con 12% en luz media y

16% en baja iluminación, se observó que este incremento se dio por error humano, pero al tener elementos gráficos con una dimensión mayor al área de tolerancia, no se verá afectada la aplicación de usuario.

Comparando las dos soluciones indicadas en Tabla 22, el prototipo con SBC posee un mayor tiempo de respuesta. Sin embargo, el consumo de potencia es 6 veces menor a un prototipo con computador portátil. Por otro lado, el costo del prototipo del SBC representa un 24% del costo del prototipo con computador portátil, es decir es 4 veces más económico y 24 veces más económico que un dispositivo comercial. Características que pueden resultar interesantes para ciertas aplicaciones.

Tabla 22

Comparativa costo, tiempo de respuesta y consumo de potencia

Ítem	Costo $	Tiempo de Respuesta (seg)	Consumo Potencia (W)
Prototipo con SBC	262,00	2,55	11,99
Prototipo con computador portátil	1.079,80	0,68	73,84

En el análisis de la experiencia de usuario, la encuesta brinda información sobre cómo los usuarios percibieron el uso del muro interactivo. Con base en las respuestas de los 5 participantes, se pudo conocer que es lo que funcionó bien y lo que se podría mejorar en el prototipo. Gracias a estos hallazgos se puede tener una mejor idea sobre la experiencia general del usuario con el sistema. En la

Tabla 23 se puede apreciar la descripción de los hallazgos encontrados.

Tabla 23

Descripción de los hallazgos encontrados en la realización de la encuesta

Aspectos Clave de la Experiencia del Usuario	Descripción de los Hallazgos
Reacción y Participación al Interactuar con el Muro Interactivo	La mayoría (3 de 5) de los participantes describieron su reacción y participación como positiva o muy positiva, destacando su interés y disfrute al interactuar con el prototipo.
Facilidad de Comprensión de las Instrucciones	Las puntuaciones oscilaron entre 9 y 10 en una escala del 1 al 10. Esto sugiere una alta percepción de claridad en las instrucciones entre la mayoría de los participantes, con una mínima discrepancia
Atracción de los Escenarios Interactivos	Todos los participantes consideraron los diferentes escenarios interactivos como atrayentes, y la mayoría (3 de 5) no reportó dificultades significativas durante su interacción.
Experiencia de Interactuar con los Diferentes Escenarios	La mayoría de los participantes describieron su experiencia al interactuar con los diferentes escenarios como divertida o muy divertida, reflejando un alto nivel de satisfacción y disfrute durante su interacción con el prototipo.
Comentarios Adicionales	Aunque hubo pocos comentarios adicionales, uno de los participantes mencionó que encontró que uno de los escenarios reaccionaba un poco lento.

En este capítulo se ha detallado las pruebas realizadas sobre el prototipo tanto de manera cuantitativa como cualitativa. Dentro del campo cuantitativo se han expuesto la precisión, exactitud y tiempos de respuesta del sistema. Por el lado cualitativo, evaluó la facilidad de uso y experiencia de usuario. En conjunto, estos análisis permiten establecer las condiciones de funcionamiento óptimo del sistema, así como las limitaciones del prototipo. También gracias a su análisis se puede establecer las áreas potenciales de mejora. Esta información permitió obtener las conclusiones, recomendaciones y posibles trabajos futuros del presente proyecto, mismos que serán tratados en el capítulo siguiente..

Capítulo 6: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se cumplió con el objetivo general de implementar un prototipo de bajo costo de muro interactivo digital ejecutando 3 tipos de aplicaciones: una de actividad física, enseñanza lúdica y terapia de salud mental.
- Las ventajas principales del sistema es que el prototipo tiene un costo accesible ya que es 24 veces más económico que un modelo comercial. Además, el consumo de potencia es 21 veces menor que el comercial.
- La selección de la tecnología óptica infrarroja fue útil por su bajo costo y permitió tener la distancia deseada de detección. El prototipo al utilizar el espectro del infrarrojo, no presento interferencias por la luz emitida por el proyector y la luz ambiental. Sin embargo, ante la presencia de cambios bruscos en el índice de radiación ultravioleta, se presentaron fallas en forma de falsos positivos.
- El utilizar un ambiente de desarrollo multiplataforma como Unity 3D permitió una fácil migración entre aplicaciones ejecutadas sobre dispositivos con diferentes sistemas operativos. Lo que permitió facilitó la evaluación del prototipo tanto en corriendo sobre la SBC como en la computadora portátil.
- Se observó que el sistema presenta una proporción aceptable de Verdaderos Positivos (VP) y Verdaderos Negativos (VN). Además, se determinó que el sistema tiene un mejor comportamiento cuando opera con cortinas cerradas ya que al estar cerradas el sistema no se afecta por los cambios abruptos en el índice ultravioleta del ambiente. Otro factor determinante para el desempeño del sistema es el tipo de objeto lanzado ya que como se vio en el capítulo 5 dependiendo de la forma y su material se pueden producir errores en la coordenada recibida.

- Las pruebas concluyeron que, debido a la cantidad y texturas de los elementos gráficos, el sistema puede experimentar retardos en el tiempo de respuesta. Una posible solución sería la implementación de una SBC con capacidad de procesamiento mayor.
- Aunque el sistema mostró tiempos de respuesta decentes en general, se observaron demoras en escenarios con mayor carga gráfica, como el escenario 2 (Rueda de la fortuna matemática). Sin embargo, en promedio, el tiempo de respuesta se mantuvo en 2,55 segundos.
- La encuesta realizada reveló una percepción del 80% como muy favorable y el 20% como favorable en la experiencia del usuario. La mayoría de los participantes expresaron una reacción positiva y disfrute al interactuar con el sistema, destacando la claridad de las instrucciones y la atracción de los escenarios interactivos.

Recomendaciones

- Se recomienda utilizar un motor gráfico multiplataforma, así mismo unas APIs de uso libre y elementos gráficos con licencias gratuitas.
- En caso de requerir aumentar la diagonal del muro, se sugiere considerar el uso de sensores infrarrojos alternativos que sean menos susceptibles a la interferencia de la luz ultravioleta ambiental. Adicionalmente, esto podría mejorar la precisión del sistema en condiciones de iluminación ambiental variable.
- Para mejorar los tiempos de respuesta en escenarios con carga gráfica intensiva, se recomienda utilizar una SBC con una mayor capacidad de procesamiento y más memoria RAM. Esto permitirá una ejecución más fluida de los escenarios interactivos y una mejor experiencia de usuario.

- El sistema presenta alteraciones en existencia de una alta variación del índice de radiación ultravioleta, se recomienda su uso en espacios alejados de ventanas o interactuar en espacios donde la luz solar no incida directamente sobre el sistema.
- Se recomienda interactuar con el sistema con objetos grandes cuya textura no refleje la luz de manera significativa, ya que esto puede mejorar la precisión del sistema y la experiencia de juego. Los objetos con superficies mates o texturizadas pueden reducir el efecto de la luz ambiental y facilitar la detección de estímulos por parte del sistema. Esta recomendación garantizará una interacción más fluida y precisa con el muro interactivo, mejorando así la satisfacción del usuario y la inmersión en el juego.

Trabajos Futuros

Para futuros trabajos, se sugiere explorar otras tecnologías para evaluar posibles mejoras en comparación con nuestro prototipo. También, sería necesario analizar el rendimiento de la tecnología alternativa bajo diferentes condiciones de iluminación ambiental. Además, se recomienda considerar la actualización de la SBC utilizada en el prototipo. La integración de una SBC con mayor capacidad de procesamiento y memoria RAM permitiría manejar más elementos gráficos con diferentes texturas, logrando una ejecución más fluida de escenarios interactivos. Esto resultaría en tiempos de respuesta más rápidos y una experiencia de usuario mejorada, especialmente en escenarios complejos o con mayor carga gráfica.

Por último, se podría investigar y probar diferentes objetos para la interacción con el muro interactivo, centrándose en aquellos con características específicas que mejoren la experiencia del usuario. Se sugiere explorar especialmente el uso de objetos más grandes con texturas no reflectantes y material suave, garantizando así una experiencia positiva del usuario. Este enfoque permitiría adaptar el diseño del sistema para una variedad más amplia de aplicaciones y contextos de uso, mejorando así su versatilidad y capacidad para satisfacer diversas necesidades de usuarios y entornos.

Bibliografía

AfterAcademy. (19 de Enero de 2020). *Data Transmission Modes*. What are the Data Transmission Modes in a network?: https://afteracademy.com/blog/what-are-the-data-transmission-modes-in-a-network/

Alegría, F. (2020). Generational Gap in Learning. *Journal of the European Institut for Multidisciplinary Studies on Human Rights & Sciences*, 4-10. https://knowmadinstitut.org/es/2020/09/brecha-generacional-del-aprendizaje

Amamzon.com,Inc. (2023). *Shop*. https://www.amazon.com/ref=nav_logo

Amazon.com, Inc. (2024). *Polyboard interactive Flat Panel*. https://www.amazon.com/Polyboard-Ultra_8255-Interactive-Available-55inch_ULTRA-8255/dp/B09LCD2LJY/ref=sr_1_22_sspa?crid=ZFMIPGNLG6G7&keywords=infrared+touch+frame&qid=1705363817&s=electronics&sprefix=frame+infrared%2Celectronics%2C140&sr=1-22-spons&ufe=ap

ams-OSRAM AG. (2022). *Emitters and detectors for infrared (IR) touchscreens.* https://www.yumpu.com/en/document/read/28046831/emitters-and-detectors-for-infrared-ir-touchscreens-application-note

Arduino. (2023). *Arduino SRL*. https://arduino.cl/producto/arduino-uno/

Arroyave, J. C., Gamboa, J. A., & Unamuno, E. A. (2021). Análisis y desarrollo de interfaz gráfica de usuario (GUI). *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, 14*(8), 73-84. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiG8Y32gdSCAxU_TDABHVglDPQQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Fdialn

et.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F8590613.pdf&usg=AOvVaw3N0uC95WMbLt6AfWb9vGeg&opi=89978449

BananaPi Team. (2023). *Banana Pi M5*. https://wiki.banana-pi.org/Banana_Pi_BPI-M5

Bastian, P. (2001). *Electrotecnia.* AKAL.

BenQ Corporation. (02 de 03 de 2021). *Centro de Conocimiento*. ¿Qué son los lúmenes en un proyector?: https://www.benq.com/es-mx/centro-de-conocimiento/conocimiento/que-son-los-lumenes-en-un-proyector.html

Bleger, M. (2022). *Crehana*. https://www.crehana.com/blog/estilo-vida/que-es-unreal-engine/

Cala, R., Díaz, L., Nora, E., & Tituaña, J. (2018). El Impacto del Uso de Pizarras Digitales Interactivas (PDI) en el Proceso de Enseñanza Aprendizaje. *Información Tecnológica*, 61-70. https://doi.org/dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500061

Coley, G. (2013). *BeagleBoard.* https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf

Core Electronics. (s.f.). Core Electronics: https://core-electronics.com.au/attachments/localcontent/C2917_16466de81f0.pdf

Dang, Q. (2018). Touchscreen: an Engineered Harmony between Humans and Machines. *USC Viterbi School of Engineering*. https://illumin.usc.edu/touchscreen-an-engineered-harmony-between-humans-and-machines/

de Oliveira, F. F., Ferreira, M. M., & Furst, A. (2013). Estudo da usabilidade nas interfaces homem-máquina. *e-xacta, 6*(2), 93-105. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v6i2.1079

Electricity Magnetism: Sensores Infrarrojos. (23 de Octubre de 2023). Electricity Magnetism: https://www.electricity-magnetism.org/es/sensores-infrarrojos/

ETT CO., LTD. (s.f.). *Manual of IR Sensor Switch E18-D80NK-N.* https://datasheetspdf.com/pdf/1311838/ETT/E18-D80NK-N/1

Fernández, E. (2023). *Características de Unity: el motor de videojuegos para tus proyectos*. https://www.tokioschool.com/noticias/caracateristicas-unity/

Fernández, M. J., Angós, J. M., & Salvador, J. A. (2001). Interfaces de usuario: Diseño de la visualización de la información como medio de mejorar la gestión del conocimiento y los resultados obtenidos por el usuario. *La representación y organización del conocimiento : metodologías, modelos y aplicaciones.* Madrid. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1456152

Gandol Casado, F., Carrillo Álvarez, E., & Prats Fernández, M. Á. (2012). Potencialidades y limitaciones de la pizarra digital interactiva: Una revisión crítica de la literatura. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación, 40*, 171-183. https://recyt.fecyt.es/index.php/pixel/article/view/61443/37456

Gateworks Corporation. (s.f.). Energy & Samrt Grid: https://www.gateworks.com/smart-grid/

Gateworks Corporation. (s.f.). Smart Factory: https://www.gateworks.com/smart-factory/

GDevelop Inc. (s.f.). *Objetos para tus juegos 2D o 3D*. https://gdevelop.io/es-es/features

Hernández Reyes, J. L. (2011). *Dispositivos Lógicos Programables.* Facultad de Ingeniería de la UNAM. Diseño de Circuitos Digitales con Dispositivos Lógicos Programables: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/658/8/A8.pdf

Hoye, T., & Kozak, J. (2010). Touch screens: A pressing technology. *Tenth Annual Freshman Engineering Sustainability in the New Millennium Conference April.*

Intel Corporation. (s.f.). FPGA Industrial Application Overview: https://www.intel.com/content/www/us/en/industrial-automation/programmable/applications/overview.html#tab-blade-4-1

Intel Corporation. (s.f.-a). Cyclone II Device Family Data Sheet: https://datasheet.octopart.com/EP2C5T144C8-Altera-datasheet-7627975.pdf

Intel Corporation. (s.f.-b). Cyclone V Device Datasheet: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1179795/INTEL/5CSEMA5F31C6N.html

Jagtap, U., Chopde, A., Karanje, R., & Latne, T. (2018). Infrared Touch Screen Sensor. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, 6*(5). https://doi.org/http://doi.org/10.22214/ijraset.2018.5235

Lattice Semiconductor Corp. (s.f.). *ECP5 and ECP5-5G Family .* https://cn.sifangmeida.com/static/upload/file/20230701/1688225282765063.pdf

Liang, J.-R., Lin, K.-C., Chen, H.-C., & Wang, W.-J. (2018). Turn Any Display Into a Touch Screen Using Infrared Optical Technique. *IEE Access, 6*, 13033-13040. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812756.

Liu, Q., Yang, X., & Song. (2021). An Infrared Touch System for Automatic Behavior Monitoring. *Neurosci. Bull.*, 815-8130. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12264-021-00661-4

Marín De La Rosa, J. M. (2007). *ESTUDIO DE LA SENSABILIDAD DE FILTROS E IIR EN PRESENCIA DE S.E.U.* Universidad de Sevilla. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11375/

Marín, J. (s.f.). Field Programmable Gate Array (FPGA). *Universidad de Sevilla*. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11375/fichero/MEMORIA%252FFPGAs.pdf

Martínez de la Teja, G. M. (2007). Ergonomía e interfases de interacción humano-computadora. *IX Congreso Internacional de la Ergonomía*, *8.* México, DF.

Martinez, A., & Segovia, I. (2014). Una experiencia de aprendizaje con la pizarra digital interactiva en educación infantil. *Revista de Medios y Educación, 45*, 125-136. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36831300009

Martinez, W. (2011). Graphical user interfaces. *WIREs Computational Statistics, 3*(2), 119-133. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wics.150

Microchip Technology Inc. (s.f.). Pro ASIC FPGA: https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds/fpgas/proasic-3-fpgas#ProASIC%203e

Moreno, C., Alconada, C., & Dulac, J. (2018). Teaching the use of ict to older people: an account of an experience.

MultiBall, Inc. (2024). *MultiBall Mini*. ttps://shop-multi-ball.com/products/test-mb

Nam, H., Seol, K.-H., Lee, J., Cho, H., & Jung, W. (2021). Review of Capacitive Touchscreen Technologies: Overview, Research Trends, and Machine Learning Approaches. *Sensors, 21*(14). https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21144776

Nawazi, F. (2020). *Circuits-Diy.* https://www.circuits-diy.com/hw201-infrared-ir-sensor-module/

Orphanides, A. K., & Nam, C. S. (2017). Touchscreen interfaces in context: A systematic review of research into touchscreens across settings, populations, and

implementations. *Applied Ergonomics, 61*, 116-143. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.01.013

Ortiz, A., Jordán, J., & Agredal, M. (2018). Gamificación en educación: una panorámica sobre el estado de la cuestión. *Gamificación en educación: una panorámica sobre el estado de la cuestión*, 1-17. https://doi.org/10.1590/S1678-4634201844173773

Pérez Conde, C. (1996). *Sensores Ópticos.* Valencia, España: Universitat de Valencia.

PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN SPI/I2C/UART/UART. (06 de Abril de 2018). Comparación entre protocolos de comunicación en serie: https://udaytdf.wixsite.com/udaytdf/post/protocolos-de-comunicaci%C3%B3n-spi-i2c-uart-uart#:~:text=USART%20---%3E%20Receptor%20y%20Transmisor%20Sincr%C3%B3nico%20Universal%20y,uso%20de%20sus%20relojes%20internos%20independientes%20para%20funcionar.

Qualcomm Technologies Inc. (s.f.). *96boards.* https://www.96boards.org/documentation/consumer/dragonboard/dragonboard410c/hardware-docs/

Raspberry Pi Ltd. (2019). *Raspberry.* https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf

Raspberry Pi Ltd. (2023a). *Documentation*. Raspberry Pi hardware: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html

Raspberry Pi Ltd. (2023b). *Raspberry Pi*. Success stories: https://www.raspberrypi.com/success-stories/?solution%5B0%5D=raspberry-pi-

4&solution%5B1%5D=raspberry-pi-3b&solution%5B2%5D=raspberry-pi-3a&solution%5B3%5D=raspberry-pi-3

RPGMaker Inc. (s.f.). *RPGMaker*. https://www.ecured.cu/RPG_Maker

RS Components Ltd. (16 de 06 de 2023). Guide to Single Board Computers: https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/single-board-computers-guide

Sánchez, M. (2018). Catálogo y Propuesta de Implementación de APPS en Educación Física. *Universidad Politécnica de Madrid*.

Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito. (2024). *Radiómetro JIPIJAPA*. https://iuv.quito.gob.ec/estaciones/detalles/ef645c7942e446939788172424aac88c/%C3%8Dndice%20Ultravioleta%20%28IUV%29?parameter_id=9ea6b8ecd8c84919a86c08272b933c55

Shen, Z., Zhejun, L., Reika, S., & Takami, T. (2017). Super Large Screen Games with Interactive Floor Display. *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, (págs. 1-2). Nagoya. https://doi.org/10.1109/GCCE.2017.8229460

Suto, S., Watanabe, T., Shibusawa, S., & Kamada, M. (2018). Multi-Touch Tabletop System Using Infrared Image Recognition for User Position Identification. *Sensors, 18*(5), 1559. https://doi.org/10.3390/s18051559

Suyama, M., Hayashi, F., & Sasaki, T. (2017). Analysis of Information Provision Methods for Indoor Navigation Using Interactive Floor Projection. *(SII), 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, (págs. 1010-1015). Taipei. https://doi.org/10.1109/SII.2017.8279355.

Texas Instrumetn Incorporated. (2018). *Solve Point-of-Load Power Design Challenges in Single Board Computer Applications.*

Torres, F., & Fernández, C. (2011). *Sensores y detectores. Automatización.* Universidad de Alicante.

Unity Inc. (2019). *Create with Code* | *Prototype 1*. https://assetstore.unity.com/packages/templates/tutorials/create-with-code-prototype-1-driving-simulation-145891

Unity Inc. (2020). *2d Animated Zombie*. https://assetstore.unity.com/packages/2d/characters/2d-animated-zombie-184521

Unity Inc. (2020). *Customizable skybox*. https://assetstore.unity.com/packages/2d/textures-materials/sky/customizable-skybox-174576

Unity Inc. (2023). *Low poly simple nature pack*. https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/landscapes/low-poly-simple-nature-pack-162153

Velazco, Y., & Garcia, G. (2008). Metodología para el Diseño y Desarrollo de Interfaces de Usuario del SIIPOL. La Habanna: Universidad de las Ciencias Informáticas . https://repositorio.uci.cu/jspui/bitstream/ident/TD_1091_08/1/TD_1091_08.pdf

Villarán, A. (2015). Sistema de Desarrollo para el Microcontrolador PIC18F452. *ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN*. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11301/fichero/Memoria%252FCapítulo+2.pdf+

Vishay Intertechnology, Inc. (2024). *High Power Infrared Emitting Diode.* https://www.vishay.com/docs/81009/tsal6100.pdf

Xilinx Inc. (s.f.). *Artix 7.* https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds181_Artix_7_Data_Sheet

Zeidman, B. (2009). *Introduction to CPLD and FPGA Design.* Chalkboard Network.

Apéndices

Todos los anexos se encuentran en la carpeta del proyecto de investigación en formato digital. Cada uno de los anexos se detallan continuación:

- Apéndice A: Contiene un archivo con la descripción del proceso de implementación del periférico de entrada.
- Apéndice B: Contiene el código de implementación de los archivos de la FPGA.
- Apéndice C: Contiene el enlace a una carpeta compartida del proyecto Unity con archivos de programación de la aplicación en usuario.
- Apéndice D: Contiene un documento con los resultados de las pruebas de medición de los tiempos de respuesta de los diferentes escenarios de la aplicación.
- Apéndice E: Contiene un documento con los resultados de la corrida de la encuesta realizada.