

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO Y MODELADO DE
COMPONENTES PARA CONTROL DE
FLUJO Y NIVEL FPC PARA INTEGRAR UN
SIMULADOR VIRTUAL CON REALIDAD
AUMENTADA Y CONTROL A DISTANCIA
POR TELEINGENIERÍA**

APLICACIÓN EN ITCA-FEPADE SEDE CENTRAL

DOCENTES INVESTIGADORES PRINCIPALES
TÉC. JUAN JOSÉ GUEVARA VÁSQUEZ
LIC. LUIS ERNESTO ELÍAS MORALES

DOCENTES COINVESTIGADORES
TÉC. RAISA FABIOLA RAMÍREZ REYES
TÉC. CARLOS GEOVANY MELÉNDEZ MOLINA

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN Y
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ITCA-FEPADE SEDE CENTRAL**

ENERO 2023

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO Y MODELADO DE
COMPONENTES PARA CONTROL DE
FLUJO Y NIVEL FPC PARA INTEGRAR UN
SIMULADOR VIRTUAL CON REALIDAD
AUMENTADA Y CONTROL A DISTANCIA
POR TELEINGENIERÍA**

APLICACIÓN EN ITCA-FEPADE SEDE CENTRAL

DOCENTES INVESTIGADORES PRINCIPALES
TÉC. JUAN JOSÉ GUEVARA VÁSQUEZ
LIC. LUIS ERNESTO ELÍAS MORALES

DOCENTES COINVESTIGADORES
TÉC. RAISA FABIOLA RAMÍREZ REYES
TÉC. CARLOS GEOVANY MELÉNDEZ MOLINA

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN Y
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ITCA-FEPADE SEDE CENTRAL**

ENERO 2023

Rector

Ing. Carlos Alberto Arriola Martínez

Vicerrector Académico

Ing. Christian Antonio Guevara Orantes

**Director de Investigación
y Proyección Social**

Ing. Mario W. Montes Arias

**Dirección de Investigación
y Proyección Social**

Ing. David Emmanuel Ágreda Trujillo

Inga. Ingrid Janeth Ulloa de Posada

Téc. Alexandra María Cortez Campos

Sra. Delmy Roxana Reyes Zepeda

**Directora de Escuela de
Ingeniería de Computación**

Inga. Marta Corina Quijano de García

**Director de Escuela de Ingeniería
Eléctrica y Electrónica**

Ing. Carlos Roberto García

003.3

D611 Diseño y modelado de componentes para control de flujo y nivel FPC para integrar un simulador virtual con realidad aumentada y control a distancia por teleingeniería [recurso electrónico] / Juan José Guevara Vásquez, Luis Ernesto Elías Morales, Raisa Fabiola Ramírez Reyes, Carlos Geovany Meléndez Molina y Juan José Cáceres Chiquillo.-- 1ª ed. -- Santa Tecla, La Libertad, El Salv. : ITCA Editores, 2023. 1 recurso electrónico (49 p. : il. col. ; 28 cm.)

Datos electrónicos (1 archivo : pdf, 4 MB). – <https://www.itca.edu.sv/produccion-academica/>

ISBN: 978-99961-39-97-0 (Impreso)

ISBN: 978-99983-69-10-8 (E-Book, pdf)

1. Simulación por computadores digitales - Equipo.
2. Control de procesos industriales - Automatización.
3. Sistemas de control digital. I. Guevara Vásquez, Juan José, 1978-, coaut. II. Título.

Autor

Téc. Juan José Guevara Vásquez

Co Autores

Lic. Luis Ernesto Elías Morales

Téc. Raisa Fabiola Ramírez Reyes

Téc. Carlos Geovany Meléndez Molina

Ing. Juan José Cáceres Chiquillo

Tiraje: 13 ejemplares

Año 2023

Este documento técnico es una publicación de la Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE; tiene el propósito de difundir la Ciencia, la Tecnología y la Innovación CTI, entre la comunidad académica, el sector empresarial y la sociedad, como un aporte al desarrollo del país. Para referirse al contenido debe citar el nombre del autor y el título del documento. El contenido de este Informe es responsabilidad de los autores.



Atribución-No Comercial
Compartir Igual
4.0 Internacional

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons. No se permite el uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, cuya distribución debe hacerse mediante una licencia igual que la sujeta a la obra original.

Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE
Km 11.5 carretera a Santa Tecla, La Libertad, El Salvador, Centro América
Sitio Web: www.itca.edu.sv
TEL: (503)2132-7423

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.1.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	5
2.2.	ANTECEDENTES / ESTADO DE LA TÉCNICA.....	5
2.3.	JUSTIFICACIÓN	7
3.	OBJETIVOS.....	7
3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	7
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4.	HIPÓTESIS.....	8
5.	MARCO TEÓRICO	8
5.1	SISTEMA AUTOMÁTICO INDUSTRIAL	8
5.2	EL CONTROL DE PROCESOS	9
5.3	SENSORES Y TRANSDUCTORES	9
5.4	VÁLVULA PROPORCIONAL.....	11
5.5	MEDIDORES DE FLUJO	12
5.6	ESTEREOSCOPIA.....	12
5.7	REALIDAD	13
5.8	VIRTUALIDAD	13
5.9	SISTEMAS DE APLICACIONES DE REALIDAD VIRTUAL	14
5.10	REALIDAD MIXTA	15
5.11	REALIDAD VIRTUAL.....	15
5.12	REALIDAD AUMENTADA	15
5.13	TECNOLOGÍA REQUERIDA PARA TRABAJAR CON REALIDAD AUMENTADA	15
6	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	16
7	RESULTADOS.....	35
8	CONCLUSIONES.....	35
9	RECOMENDACIONES.....	36
10	GLOSARIO.....	36
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
12	ANEXOS.....	39
12.1	ANEXO 1. SCRIPT SOLUCIÓN DE ECUACIÓN DIFERENCIAL 3 UTILIZANDO EL MÉTODO DE EULER CON MATLAB	39
12.2	ANEXO 2. MODELO SIMULINK DEL ENTRENADOR DE FLUJO Y NIVEL DE ACUERDO CON LA ECUACIÓN DIFERENCIAL 3.....	41
12.3	ANEXO 3. INTEGRACIÓN DEL MODELO DEL ENTRENADOR FPC CON UN CONTROLADOR PID EN SIMULINK.....	42
12.4	ANEXO 4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO CIRCUITO DE CONTROL DE VÁLVULA PROPORCIONAL BURKERT TYPE 1094.....	43
12.5	ANEXO 5. DISEÑO DEL PCB DEL CIRCUITO DE CONTROL DE LA VÁLVULA PROPORCIONAL	44
12.6	ANEXO 6. CIRCUITO DE SYSCON Y FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL CONTROLADOR ELECTRÓNICO	45
12.7	ANEXO 7. CIRCUITO DE ESCALAMIENTO DE ENTRADAS DIGITALES	46
12.8	ANEXO 8. CIRCUITO DE SALIDA DIGITAL 7 PWM DE 8 + 2 CANALES	47
12.9	ANEXO 9. CIRCUITO DE SALIDAS ANALÓGICAS DE 4 CANALES.....	48
12.10	ANEXO 10. MATRIZ PARA DEFINICIÓN DE PRIVILEGIOS DE USUARIOS DE LA PLATAFORMA DE TELEINGENIERÍA	49

1. INTRODUCCIÓN

En este informe se describe el proceso que se llevó a cabo y los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto de investigación “Diseño y modelado de componentes para control de flujo y nivel FPC para integrar un simulador virtual con realidad aumentada y control a distancia por teleingeniería”, desarrollado de forma multidisciplinaria por la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica con la Escuela de Ingeniería en Computación, de ITCA-FEPADE Sede Central.

Esta investigación se ubica en el área de control de procesos industriales, modelado en 3D y diseño de aplicaciones cliente-servidor. El objetivo principal fue crear los componentes de hardware y software a integrar en un simulador virtual con realidad mixta, que permita el desarrollo de prácticas de laboratorio a distancia en tiempo real en un entrenador de control de procesos industriales de flujo y nivel de fluidos FPC.

La Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica desarrolló las siguientes actividades. Se analizaron las características físicas de los componentes del entrenador para generar un modelo matemático que describe su funcionamiento. De forma paralela se crearon modelos en 3D de los componentes físicos del entrenador y se ensamblaron para obtener un gemelo digital. Se determinaron las características y fenómenos físicos del proceso de control de flujo y nivel para diseñar un modelo matemático del entrenador de proceso de control de flujo y nivel y evaluar su comportamiento. Se estudiaron los parámetros eléctricos de funcionamiento de los dispositivos del entrenador existente para su sustitución por otros que permitan ser controlados de forma remota. Se elaboró el diagrama esquemático del controlador electrónico que permite la gestión remota del entrenador y un prototipo de circuito de control de la válvula proporcional de flujo que forma parte del entrenador de flujo y nivel.

La Escuela de Ingeniería en Computación desarrolló las siguientes actividades. Aplicación de tecnologías empleadas en el uso y programación de realidad aumentada. Se diseñó el prototipo inicial de aplicación administrativa de teleingeniería y simulador virtual que integra realidad aumentada. Se construyó la base de datos Big Data que almacenará la información de las prácticas realizadas por los usuarios del sistema de simulación, para su análisis con Business Intelligence. Se renderizaron los elementos en 3D que conforman el entrenador de flujo y nivel.

Entre los resultados obtenidos se encuentran los modelos en tres dimensiones de las piezas del entrenador; el modelo matemático que será utilizado en la construcción del simulador virtual; la estructura y el diagrama esquemático del circuito del controlador electrónico que permitirá la gestión a distancia del entrenador en tiempo real por medio de una red de datos y un prototipo del circuito excitador de una válvula proporcional de flujo que controla el paso del fluido en el sistema.

Los resultados de este proyecto serán el fundamento para la implementación de una *Plataforma de Teleingeniería* con un ecosistema de aprendizaje basado en simulación y posterior experimentación real a distancia. Con la implementación del proyecto se proveerá una solución que permita optimizar el tiempo de acceso a los equipos para las prácticas de control de procesos industriales, registrar las actividades que los estudiantes lleven a cabo y generar métricas que permitan al docente identificar conductas y aprendizajes para tomar acciones pedagógicas con las que se puedan alcanzar las competencias de una manera más efectiva.

Se concluye que es posible modelar un sistema de control de procesos industriales para predecir su comportamiento, crear componentes en 3D de un entrenador real para crear un simulador virtual con realidad mixta, así como diseñar circuitos de control inteligente para el manejo a distancia. La población estudiantil podrá realizar sus prácticas de una manera inmersiva de forma virtual con el uso de tecnología y aprovechar la Realidad aumentada. Adicionalmente se podrá retroalimentar a los docentes para que puedan efectuar acciones que minimicen los errores y problemas de los estudiantes incrementando significativamente la calidad de la enseñanza.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En las instituciones educativas, sucede con bastante regularidad que los equipos especializados para prácticas de laboratorio son escasos ya que son de alto costo y mantenimiento. Esto tiene como inconveniente que la cantidad de horas efectivas que los estudiantes pueden pasar frente a estos equipos es muy reducida dificultando su proceso de aprendizaje. Al planteamiento anterior es necesario agregar que debido a la pandemia por COVID-19 se debieron implementar medidas de distanciamiento físico entre estudiantes y docentes, limitando aún más el acceso físico a los equipos de laboratorio.

El empleo de asistentes virtuales, así como la educación virtual en general, es muy demandada y al mismo tiempo exigida como una herramienta de apoyo para el aprendizaje. La educación virtual ha tenido que afrontar muchos retos, desde la actualización de competencias de IT por parte de docentes y alumnos, así como la disminución de la brecha digital que posee el país. Otro factor que ha afrontado la educación a nivel mundial es la competencia que existe con la cantidad de material de ocio que el alumno encuentra en la red, desviándolo de su objetivo principal por el que hace uso de equipo informático o móvil al momento de sus clases.

Actualmente la mayoría de Las instituciones educativas no cuentan con herramientas tecnológicas que ayuden al aprendizaje de los alumnos de una manera inmersiva, en la que el uso de simuladores se vuelve un lujo por su elevado costo que estos presentan, teniendo que limitarse únicamente con aulas virtuales, videos, documentos en PDF u otro formato multimedia.

El proyecto busca proveer una solución que permita optimizar el tiempo de acceso a los equipos para las prácticas de control de procesos industriales, registrar las actividades que los estudiantes lleven a cabo y generar métricas que permitan al docente identificar conductas y aprendizajes para tomar acciones pedagógicas con las que se puedan alcanzar las competencias de una manera más efectiva.

2.2. ANTECEDENTES / ESTADO DE LA TÉCNICA

En el área de los laboratorios de control de procesos y simulación, ITCA-FEPADE ha venido investigando y documentando desde el año 2020 el diseño de una plataforma de Teleingeniería para el control de procesos industriales, concretamente para el proceso de control de temperatura de un fluido (H₂O), este proceso de investigación se ha desarrollado en etapas similares a las que se establecen en la descripción de este proyecto, por lo que el equipo de investigadores de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica ya cuenta con la experiencia base que le permite dar un paso más adelante e incorporar a la plataforma existente el control de un nuevo proceso como el de flujo y nivel. Actualmente, ya se cuenta con la experiencia base para poder modelar un proceso industrial, generar las ecuaciones que describen su funcionamiento y simular en software de alto nivel (Matlab y Simulink) los modelos creados, esto es de vital importancia para la creación de un simulador que utiliza la tecnología de realidad aumentada, Big Data, Inteligencia artificial y Business Intelligence que se está proponiendo. En su componente de hardware, se han diseñado los circuitos de interfaz para sensores, drivers y sistemas de control que utilizan protocolos de comunicación que son estándar en la electrónica de sistemas embebidos como I2C, SPI y Ethernet. Adicionalmente, los docentes investigadores de la Escuela de Ingeniería en Computación fueron los responsables del diseño de la plataforma de gestión y administración de las prácticas de laboratorio a distancia, por lo que cuentan con la experiencia necesaria para incorporar un módulo que permita hacer la gestión remota del entrenador de flujo y nivel a la plataforma existente.

Existen diversos tipos de dispositivos que proporcionan las capacidades necesarias en función del tipo de solución a implementar. Por tanto, respondiendo a la demanda creciente de dispositivos para aplicaciones de Realidad Aumentada, el mercado cuenta con una oferta cada vez más variada.

Hoy en día la empresa Microsoft con su dispositivo de realidad virtual llamado HoloLens es un referente con lo que a realidad mixta concierne. Este va por su segunda versión y es utilizado para las áreas de fabricación, atención sanitaria y educación. Su precio en el mercado varía de acuerdo con la función que se oriente, el más económico cuesta en promedio USD \$4,339.17 y puede ser utilizado con realidad aumentada.

Se cuenta con una variedad de aplicaciones de paga que se pueden instalar en el dispositivo proporcionados por Microsoft Dynamics 365, las cuales son una línea de productos de aplicaciones empresariales inteligentes de planificación de recursos empresariales y gestión de relaciones con los clientes.



Fig. 1. Diferentes formas de aplicación con la HoloLens 2 de Microsoft en la industria y educación.

Fuente: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>

Actualmente, en el mercado existe una amplia variedad de dispositivos para Realidad Aumentada cuyo funcionamiento es similar al de HoloLens, pero en diferente calidad y rendimiento, lo que los vuelve en algunos, casos económicos o de mayor costo. Ejemplo de ellos son: Oculus Quest 2, Magic Leap, Daqri Smart Helmet.



Oculus Quest 2



Magic Leap



Daqri Smart Helmet

Para nuestro proyecto se usa un Smartphone con un modelo genérico, ya que dentro de la población estudiantil existe una amplia gama de marcas y modelos con las que el simulador debe ser compatible. Por lo tanto, se utilizó un smartphone con las siguientes características:

- Pantalla de 5.8" a 6".
- Poseer giroscopio.
- Sistema Operativo Android 8.0 como mínimo.

Junto con el hardware descrito anteriormente, se requirió de una aplicación que permite cargar la plataforma con todas las simulaciones de las prácticas del módulo a impartir. Una vez iniciada la aplicación se elige la práctica y posteriormente el dispositivo móvil es ubicado de tal manera que pueda leer una marca impresa, código QR u otra personalizada, para iniciar con el desarrollo de la simulación.



Fig. 2. Usuario utilizando una simulación de realidad aumentada en el mantenimiento de maquinaria.

Fuente: <https://www.edsrobotics.com/blog/realidad-aumentada-que-es/>

2.3. JUSTIFICACIÓN

Debido al problema de pandemia que se vive en el mundo, las aulas y talleres se han visto trasladados hacia los hogares de la población estudiantil, quienes se han visto obligados a enfrentar esta situación utilizando sus propios recursos. Sin embargo, no todos los alumnos cuentan con los recursos necesarios, especialmente cuando se trata de equipo especializado. Esto repercute en el aumento de la deserción estudiantil por desmotivaciones respecto a la educación que perciben que se les imparte.

En tal situación se requiere de un mecanismo que ayude a la población estudiantil a realizar sus prácticas de una manera inmersiva de forma virtual con el uso de tecnología y aprovechar al máximo la Realidad aumentada. Adicionalmente, con la implementación de las tecnologías descritas, es posible retroalimentar a los docentes para que puedan efectuar acciones que minimicen los errores y problemas de los estudiantes incrementando significativamente la calidad de la enseñanza en la institución.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y modelar componentes para control de flujo y nivel integrando un simulador virtual con realidad aumentada y control a distancia en tiempo real por teleingeniería.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica:

1. Analizar las características y fenómenos físicos del proceso de control de flujo y nivel para diseñar un modelo matemático del entrenador de proceso de control de flujo y nivel y evaluar su comportamiento.
2. Analizar los parámetros eléctricos de funcionamiento de los dispositivos del entrenador para su sustitución por otros que permitan el control remoto.
3. Elaborar un diagrama esquemático de un controlador electrónico que permita la gestión remota del entrenador.
4. Construir un prototipo de un circuito de control de la válvula proporcional de flujo que forma parte del entrenador de flujo y nivel.

Escuela de Ingeniería en Computación:

1. Aplicar tecnologías empleadas en el uso y programación de realidad aumentada.
2. Diseñar un prototipo de aplicación administrativa de teleingeniería y simulador virtual que integra realidad aumentada.
3. Construir una base de datos Big Data que almacenará la información de las prácticas realizadas por los usuarios del sistema de simulación para su análisis con Business Intelligence.
4. Renderizar elementos en 3D que conforman el entrenador de flujo y nivel.

4. HIPÓTESIS

La virtualización y acceso remoto a los laboratorios optimiza los recursos de las instituciones educativas mejorando la calidad de la enseñanza y ampliando la oferta educativa y a su vez contribuye en la disminución del riesgo de contagios por enfermedades como el COVID-19.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 SISTEMA AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

Un sistema automático industrial es un conjunto de dispositivos eléctricos, mecánicos, electrónicos, o la combinación de ellos, los cuales pueden estar interconectados entre sí para controlar un proceso [1].

El objetivo de este sistema es que la variable que se desea controlar se mantenga dentro de un margen de error, y en otros casos más críticos que sea cero.

El error se define como la diferencia entre el valor medido (variable de proceso) y el valor deseado o de referencia (Set Point). Cuando el error es diferente de cero se utiliza esta información para realizar ajustes en tiempo real para reducir o eliminarlo lo más pronto posible teniendo en cuenta que esto depende de la estrategia de control que se está utilizando y de la naturaleza del proceso que se desea controlar.

La automatización es la tecnología que se encarga de aplicar la electrónica, mecánica e informática en un sistema o proceso que se desea controlar, estos sistemas pueden ser:

- Máquina-herramientas para procesar partes metálicas.
- Robots industriales.
- Sistemas de inspección automáticos para el control de calidad.
- Maquinaria para procesos industriales.

5.2 EL CONTROL DE PROCESOS

El control de procesos consiste en dos funciones claramente diferenciadas: la adquisición de datos y el control. Para producir un producto que sea de alta calidad de forma consistente es necesario un estricto control del proceso de producción.

El control de proceso es el control automático de una variable de salida al detectar la amplitud del parámetro de salida del proceso y comparándolo con el nivel deseado o establecido y retroalimentando una señal de error para controlar una variable de entrada [2].

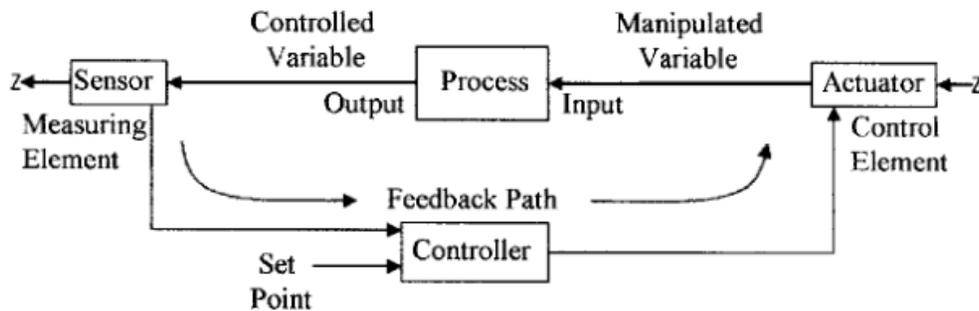


Fig. 3. Diagrama típico de un proceso controlado.

En todo proceso hay una serie de insumos, es decir, desde productos químicos hasta mercancías sólidas. Estos son manipulados en el proceso y un nuevo producto químico o compuesto emerge en la salida. Las entradas y salidas controladas del proceso se denominan variables como se muestra en la fig. 3. En una instalación de control de procesos, el controlador no está necesariamente limitado a una variable por lo que puede medir y controlar muchas variables. La mayoría de las variables controladas representan a seis u ocho dispositivos como por ejemplo los cilindros de un motor de combustión.

5.3 SENSORES Y TRANSDUCTORES

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. Por ejemplo, si se está midiendo la temperatura con un sensor resistivo, la cantidad que se mide es temperatura y el sensor transforma la entrada en cambios en la resistencia eléctrica. Por lo general se utiliza el término transductor en lugar de sensor.

Un transductor se define como el elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado, por lo que los sensores son en realidad transductores. Sin embargo, un sistema de medición puede utilizar transductores, además de sensores, en otras partes del sistema para convertir señales de una forma dada en otra distinta. Por otra parte, el término digital se utiliza cuando los sistemas ofrecen salidas que son digitales por naturaleza.

Los siguientes términos describen las características de funcionamiento de los transductores y de los sistemas de medición:

- **Intervalo y extensión:** define los límites entre los cuales puede variar la entrada.
- **Error:** es la diferencia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la cantidad que se mide:

$$\text{error} = \text{valor medido} - \text{valor real}$$

- **Exactitud:** es el grado hasta el cual un valor producido por un sistema de medición puede estar equivocado. Es, por lo tanto, la suma de todos los errores posibles más el error en la exactitud de la calibración del transductor.
- **Sensibilidad:** es la relación que indica cuanta salida se obtiene por unidad de entrada, es decir, salida/entrada. Por ejemplo, un termómetro de resistencia puede tener una sensibilidad de $0.5\Omega/^{\circ}\text{C}$.
- **Error por histéresis:** se produce cuando los transductores producen salidas distintas a partir de la misma cantidad medida ya sea por incremento o decremento continuo.
- **Error por no linealidad:** se supone que, en su intervalo de funcionamiento, la relación entre la entrada y la salida del transductor es lineal. Sin embargo, esto no es así, por lo que este error se define como desviación máxima respecto a la línea recta.
- **Repetibilidad/reproducibilidad:** describe la capacidad del transductor para producir la misma salida después de aplicar varias veces el mismo valor de entrada. El error relacionado consiste en no obtener la misma salida después de aplicar el valor de entrada, se representa como un porcentaje del intervalo total de salida:

$$\text{repetibilidad} = \frac{\text{val. max} - \text{val. min}}{\text{intervalo total}} * 100$$

- **Estabilidad:** es la capacidad que posee un transductor para producir la misma salida cuando se usa para medir una entrada constante en un período.
- **Banda/tiempo muerto:** es el intervalo de valores de entrada para los cuales no hay salida.
- **Resolución:** es el cambio mínimo del valor de entrada capaz de producir un cambio observable en la salida.
- **Impedancia de salida:** cuando un sensor produce una salida eléctrica se conecta con otro circuito electrónico, es necesario conocer su impedancia de salida ya que esta se va a conectar en serie o en paralelo. Si no se toma en cuenta la impedancia de salida al conectar el sensor, el funcionamiento del sistema puede verse afectado

Sensores capacitivos de proximidad

Son sensores que no requieren del contacto físico con el material a detectar. Los sensores de proximidad capacitivos permiten la detección tanto de materiales conductivos como no conductivos, se usan principalmente para detectar materiales como plásticos, líquidos, materiales granulados, etc. (fig. 4)



Fig. 4: Sensor de proximidad capacitivo.

En las aplicaciones de sensores de proximidad capacitivos la sensibilidad de estos depende de las características del material objeto. Estas características de los metales, plásticos, líquidos, etc. a detectar influyen en la distancia de detección y el punto de conmutación del sensor [3].

5.4 VÁLVULA PROPORCIONAL

Las válvulas proporcionales controlan la presión o el caudal de un sistema proporcionalmente a la señal eléctrica de entrada.

El embrague impulsor de la válvula es inversamente proporcional al flujo de aceite y la presión que se maneja en ella, es decir, que un aumento de la corriente resulta en la disminución del flujo de aceite del embrague y por tanto de la presión.

El aceite de la bomba fluye por el centro del carrete de la válvula, pasa el orificio y la bola, y continúa hacia el drenaje. El resorte de la válvula desplaza el carrete de la válvula hacia la izquierda, bloqueando el conducto entre el embrague impulsor y la bomba, mientras abre el conducto entre el embrague impulsor y el drenaje. El flujo de la bomba al embrague impulsor se bloquea. El aceite del embrague impulsor fluye y pasa el carrete de la válvula al drenaje (Fig. 5).

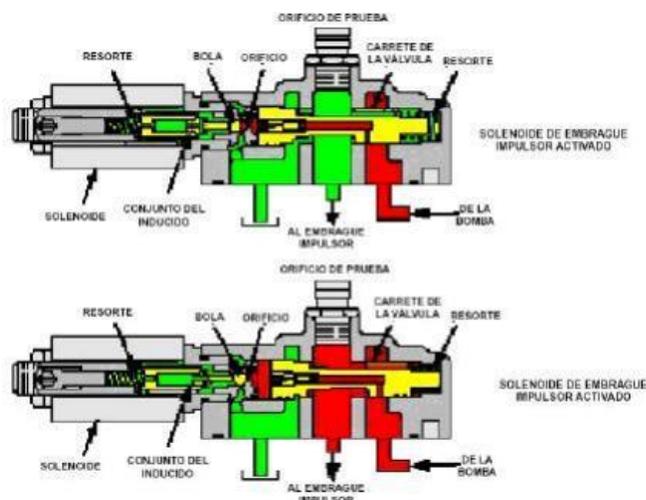


Fig. 5. Estructura interna de una válvula proporcional.

Cuando se desactiva el solenoide del embrague impulsor, el resorte mueve el conjunto del pasador contra la bola. La bola bloquea el flujo de la bomba, a través del orificio, al drenaje. La presión de aceite aumenta en el extremo izquierdo del carrete de la válvula y lo mueve a la derecha contra el resorte. El carrete de la válvula bloquea el conducto entre el embrague impulsor y el drenaje, y abre el conducto entre el embrague impulsor y la bomba. El aceite de la bomba fluye y pasa el carrete de la válvula al embrague impulsor. En este tipo de válvula, un aumento de la corriente resulta en una disminución del flujo al embrague, y por lo tanto de la presión [4].

5.5 MEDIDORES DE FLUJO

Los medidores de flujo son instrumentos que controlan, miden o registran la tasa de flujo, el volumen o la masa de un gas o líquido. Aportan un control y/o monitoreo preciso de lo que pasa por un caño o una tubería, incluyendo agua, aire, vapor, aceite, gases y otros líquidos. Los medidores de flujo específicos para una aplicación permiten a los gestores de instalaciones, contratistas de control, ingenieros consultores y otras partes interesadas:

- Entender y controlar las operaciones de flujo.
- Identificar y mejorar las eficiencias.
- Abordar los problemas del equipo y el uso irresponsable.

Los medidores de presión diferencial miden el flujo de líquido dentro de una tubería introduciendo una constricción que cree una caída de presión. Los sensores de presión miden la presión antes y después de la constricción. La caída de presión resultante que se produce a lo largo de la constricción es relativa a la tasa de flujo al cuadrado; mientras mayor sea la caída de presión, mayor es la tasa de flujo. Los medidores de presión diferencial son adecuados para aplicaciones que incluyen filtros, intercambiadores de calor, dispositivos de prevención de reflujo, tuberías y conductos, entre otros. Una razón clave por la que los gestores de las instalaciones prefieren los medidores DP se debe a que no tienen partes móviles, lo que significa que requieren un mantenimiento mínimo [5].

5.6 ESTEREOSCOPIA

Realidad Aumentada o Realidad Mixta son términos que aparecieron hace relativamente poco tiempo, ambos parten desde uno que es bastante más antiguo, el de realidad virtual. Este concepto, aunque se comenzó a llamar así en los años 80, tiene más tiempo, pues las primeras investigaciones en este campo se hicieron en los años 50 y las primeras máquinas de realidad virtual estuvieron disponibles a principios de los 60. Las primeras máquinas estaban basadas, como en la actualidad, en la **estereoscopia** o *visión estereoscópica*. Consiste en disponer de dos imágenes desde dos puntos de vista distintos, cada una de las cuales corresponde al punto de vista de uno de los ojos, y al mostrarle a cada ojo su correspondiente imagen por separado, el cerebro las ordena creando la sensación de tridimensionalidad. El uso de la estereoscopia es mucho más antiguo que la realidad virtual, en la siguiente imagen podemos ver dos fotografías para ser vistas en 3D mediante un visor estereoscópico, las imágenes datan de 1875 y forman parte de una colección del fotógrafo Robert N. Dennis que está compuesta por algo más de 42 mil imágenes estereoscópicas y que puede consultarse de forma digital en la página web de colecciones digitales de la Biblioteca Pública de New York. [6]



Fig. 6. Fotografía de 1857 lista para ser vista en 3D mediante un visor estereoscópico.

5.7 REALIDAD

El concepto de realidad hace referencia a todo lo existente, es decir, a todo lo que no forma parte de la imaginación y que tiene la propiedad de existir porque puede ser percibido por alguno de los sentidos o por la razón. La realidad es un concepto debatido en filosofía, sociología y psicología, puesto que se han generado debates en diferentes espacios culturales y académicos con respecto a qué es real y qué no. Hoy en día, la realidad está considerada como un conjunto de sujetos y objetos que interaccionan en un sistema; el concepto de realidad ha estado presente en el desarrollo humano y es una de las incógnitas por resolver [7].

5.8 VIRTUALIDAD

La virtualidad hace referencia a la capacidad de reproducir un efecto, aunque no se produzca en tiempo real o presente. A su vez, se encuentra asociada con lo que tiene existencia de forma aparente, por ejemplo, los medios de mensajería instantánea, las capacitaciones en plataformas digitales, la comunicación por medio de correos electrónicos, todo esto de forma telemática, que se hace en tiempo real, pero sin presencialidad. En informática se habla de una realidad construida con sistemas digitales, orientada hacia el diseño e implementación de esquemas informáticos y en la interacción persona-computador, respectivamente, como en Realidad Virtual RV. Esto quiere decir que los modelos tradicionales de comunicación, de interacción, de entretenimiento y hasta de trabajo se han venido modificando gracias a la era digital que se ha estado generando a escala mundial. Esto lleva a reaprender sobre los contenidos que, en su mayoría, ya no son impresos o transmitidos de forma convencional, sino que para acceder a ellos se requieren habilidades tecnológicas. En la figura 7 se muestran algunos beneficios de la virtualidad [7].



Fig. 7. Beneficios de la virtualidad.

5.9 SISTEMAS DE APLICACIONES DE REALIDAD VIRTUAL

Existen diferentes tipos de aplicaciones para el uso de la RV inmersiva en sistemas operativos, vía internet:

- Sistema operativo Android: Google Play.
- Sistema operativo iOS: Vr-iPhone.
- Para Apps con sistema operativo Windows Phone: Microsoft Store.
- Videos inmersivos en 360º por medio de YouTube y en Vimeo: Canal de RV.
- Uso de fotografías esféricas inmersivas: Street View y Flickr 360°.



Fig. 8. Fotografía de montaña esférica inmersiva, compatible con las Google Cardboard.

Una vez explorados los diferentes tipos de contenidos que se tienen a disposición, se debe recordar que, para utilizarlos a nivel educativo, de forma inmersiva, además de tener en cuenta las edades mínimas a partir de las cuales es apropiado o no el uso de cada visor de RV, siempre se deberá revisar y valorar previamente la adecuación de los contenidos que se les van a ofrecer a los estudiantes, sobre todo si son menores de edad. El *Pan European Game Information (PEGI)* es un sistema europeo para clasificar el contenido de los videojuegos y otro tipo de software de entretenimiento. Se aplica en 25 países sin tener relación alguna con la Unión Europea; en Colombia no se conoce ningún referente en estos temas, aunque es importante tenerlo para el control de contenidos. Tampoco se sabe de un sistema de control para usos académicos. [7]

5.10 REALIDAD MIXTA

La Realidad Mixta MR representa un concepto un poco más complejo. En la MR ya no se superpone información sobre el mundo real, sino que se fusiona el mundo físico con el mundo digital. Esto quiere decir que, si tenemos un elemento, como puede ser una silla modelada en 3D, vamos a poder colocarla en el mundo físico y esa silla va a “ser consciente” del mundo que le rodea: va a entender dónde está el suelo y, si pasa alguien por delante, va a tapar dicha silla. Esto no sucedía con la AR, por lo que ahora la sensación es mucho más inmersiva: le afecta la iluminación del entorno y todo se va adaptando de forma que se puede llegar a tener un mundo indistinguible que mezcle lo físico y lo digital. Se trata de una tecnología que está empezando ahora, pero para la que “es fundamental empezar a comprender desde ya todos los conceptos y desarrollos de la VR para adaptarnos a esta nueva ola que está por llegar.” [8]

5.11 REALIDAD VIRTUAL

La Realidad Virtual RV describe al conjunto de tecnologías inmersivas que buscan posicionar al usuario dentro de entornos virtuales simulados por ordenador. Dependiendo del objetivo que se pretenda alcanzar con las simulaciones, es posible que las imágenes sean realistas o no. Para llevarse a cabo, la RV hace uso de dispositivos llamados lentes o cascos de realidad virtual. Estos hacen posible que los usuarios perciban escenarios en 360° con alta definición.

La incorporación de audio y sensores de movimiento, permiten una interacción única con el entorno, lo que le da a la experiencia una característica realista muy útil. Ya que un usuario puede volverse protagonista de un escenario sin salir de un entorno controlado, las aplicaciones en el entretenimiento solo son limitadas por la imaginación.

A nivel industrial, operadores pueden familiarizarse con entornos de riesgo sin exponerse, médicos pueden practicar procedimientos complejos, equipo técnico asistir a distancia y mucho más. Antes de profundizar más en esta tecnología, es importante no confundirla con la RA (realidad aumentada). [9]

5.12 REALIDAD AUMENTADA

El termino Realidad Aumentada RA se usa para describir una serie de tecnologías que permiten combinar en tiempo real contenido generado por ordenador con video en directo. Tradicionalmente, se diferencia de la realidad virtual RV en que esta implica la creación de entornos 3D completos, mientras que la RA usa diferentes tecnologías de hardware para crear una composición aumentada basada en el mundo real. [10]

5.13 TECNOLOGÍA REQUERIDA PARA TRABAJAR CON REALIDAD AUMENTADA

Para realizar cualquier tipo de RA visual, es imprescindible un buen ordenador con una cámara; en la actualidad muchos ordenadores ya las traen incorporadas, sin embargo, al estar integradas en el equipo resulta complicado moverlas y enfocar de modo que, aunque su equipo incorpore una cámara conviene adquirir una cámara web USB. La Realidad Aumentada es la combinación de dos tecnologías, la visión artificial y los motores gráficos. [10]

Motor Gráfico

El motor gráfico se ocupa de renderizar los contenidos, típicamente en 3D, que muestra la Realidad Aumentada. La visión artificial se ocupa de que la ubicación de los contenidos aumentados sea la correcta en la escena, para que la composición sea coherente y entendible por el usuario. El principal elemento que interviene en la parte gráfica sería el renderizado. Este proceso consiste en la interpretación por parte del ordenador de una escena de tres dimensiones para crear una imagen bidimensional. La información que se procesa para realizar el render es la geometría del modelo 3D, las características de su superficie (color y material), la iluminación de la escena y la posición de la cámara.

Visión Artificial

Las técnicas de visión artificial que se aplican en Realidad Aumentada son muy variadas, y se denominan principalmente tecnología de seguimiento o tracking. Existen muchos tipos, por ejemplo, el tracking facial, que permite detectar y seguir la posición de una cara, o el tracking de texturas, que posiciona una imagen de referencia en un sistema de coordenadas tridimensional. Las técnicas de visión artificial más novedosas que se emplean actualmente incorporan sensores activos basados en luz estructurada, tracking SLAM o tracking 3D. Para que una experiencia de Realidad Aumentada sea satisfactoria, debe funcionar en tiempo real. Esto quiere decir que cada uno de los dos módulos debe hacerlo también, y ambos son muy exigentes con el uso de los recursos computacionales. Así que el módulo de render debe ser capaz de pintar unas 60 imágenes por segundo, y el módulo de tracking de igual modo, ser capaz de analizar y extraer la información de 60 imágenes por segundo. [11]

6 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Metodología empleada por la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

I. Interpretación y análisis del proceso industrial del entrenador de Flujo y Nivel

A partir del diagrama del laboratorio de control de procesos de fluidos para flujo y nivel que se muestra en la figura 9.

El entrenador FPC de flujo y nivel tiene como objeto controlar el nivel del fluido que circula por el sistema y que se almacena temporalmente en el tanque 2. Es un sistema dinámico en donde el fluido se encuentra en constante movimiento en modo nivel por control de flujo.

El sistema funciona de la siguiente manera: la bomba(M) funciona a máxima potencia haciendo circular un fluido a razón de aproximadamente 10 l/min. Al cerrar la válvula SV2 y abrir la válvula SV1 el fluido pasa del tanque 1 al 2 acercándolo al nivel deseado. Un control PID correctamente ajustado, se encarga de regular el paso del fluido por medio de la válvula de control de flujo CONTROL VALVE, la cual se cierra de forma proporcional. El nivel de cierre o apertura de la válvula es controlado midiendo la altura del fluido en el tanque 2 por medio del sensor ultrasónico ULTRA SONIC SENSOR, el cual indica al controlador PID cuanto nivel de fluido falta o sobra para alcanzar el nivel deseado. Este proceso se repite constantemente mientras el sistema funciona y debe responder satisfactoriamente a los cambios de nivel efectuados por el operador o por fluctuaciones que pueden producirse al abrir parcial o totalmente la Válvula 1 (MANUAL VALVE 1) y válvula 2 (MANUAL VALVE 2).

Un sensor capacitivo (OF-LS) tiene como finalidad indicar cuando el nivel de fluido en el tanque 1 está por encima del nivel de normal de operación y se corre riesgo de desborde.

Un modo de funcionamiento adicional se consigue abriendo la electroválvula SV1 lo cual deja sin efecto la regulación de la válvula de control de flujo por lo que ahora la regulación del fluido se efectúa mediante la variación de la potencia de la bomba de agua.

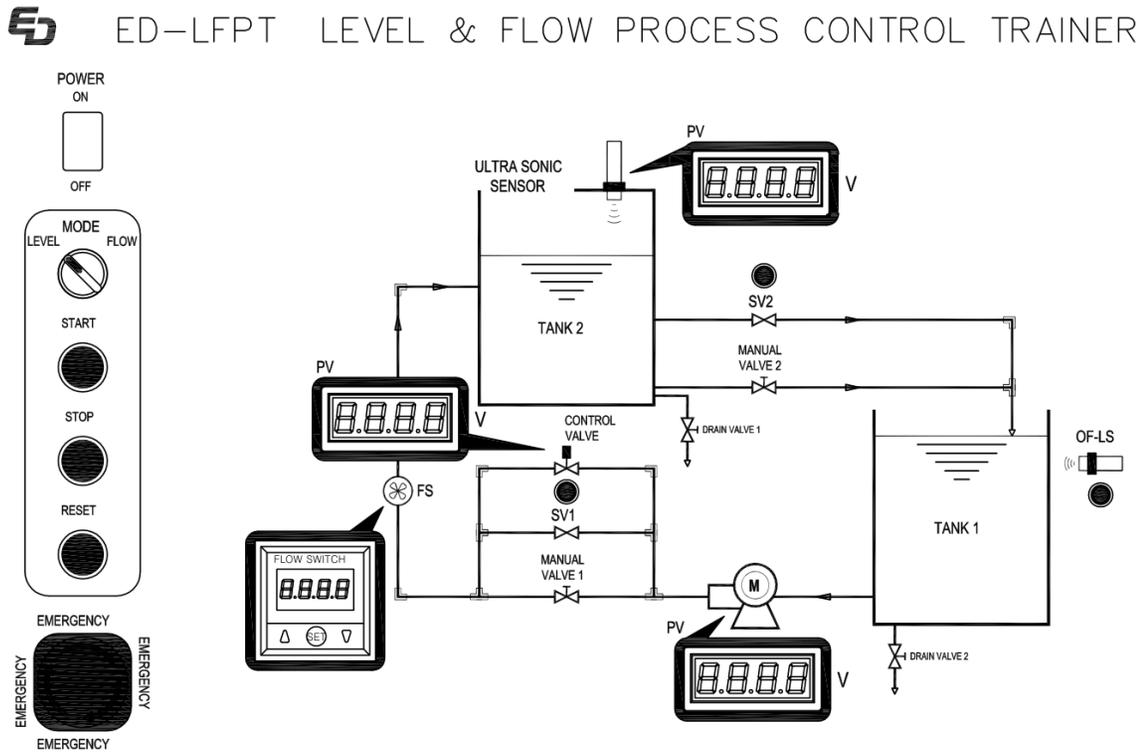


Fig. 9. Diagrama de proceso del entrenador FPC de flujo y nivel.

II. Elaboración de tablas de especificaciones de operación de dispositivos y características de funcionamiento del entrenador de flujo y nivel.

Dispositivos activos en el proceso:

- **Bomba de agua**

Funciona con voltajes DC de 12V o 24V, de acuerdo con especificaciones del fabricante, la potencia se regula variando la tensión de entrada del circuito controlador de 0V a 10V. Sin embargo, en el laboratorio se comprobó que el controlador original no tiene una respuesta adecuada a las variaciones de tensión por lo que se diseñará un circuito apropiado y que realice la regulación de la potencia de la bomba a partir de una señal PWM de 24V.



Fig. 10. Bomba de agua LANG ECOCIRC D5vario-38/700B.

- **Válvula de control de flujo**

Es una válvula proporcional de grado industrial que regula el paso del fluido (agua) a partir de una señal de control que puede ser 0-10V, 0-20mA o 4-20mA. En el laboratorio, se comprobó la efectividad de la regulación a partir de un voltaje de entrada variable de 0-10V.



Fig. 11. Válvula proporcional para agua Burkert type 1094.

- **Medidor de flujo**

Es un medidor de flujo desde 2 l/min hasta 16 l/min de grado industrial que produce una salida de voltaje proporcional de 0V a 10V en función del flujo medido.



Fig. 12. Sensor de flujo SMC PF2W720 con display.

- **Sensor ultrasónico**

Es un sensor de proximidad remoto de estado sólido que funciona con 24VDC, que utiliza el método de medición del retardo del eco para determinar la distancia entre él y una superficie u objeto por lo que requiere que este pueda reflejar las señales de sonido.



Fig. 13. Sensor de ultrasónico 3RG6343.

El sensor genera una señal de sonido cónica de 5° y posee tanto una distancia mínima de 200 mm y máxima de 1000 mm para generar mediciones precisas.

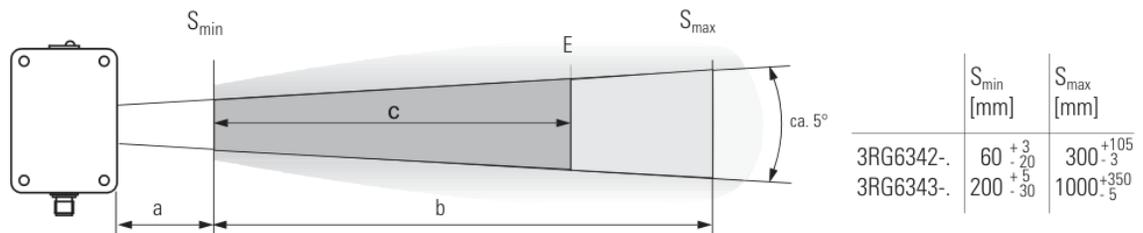


Fig. 14. Distancia mínima y máxima en mm de mediciones del sensor de ultrasonido 3RG6343 de Pepperls+Fuchs.

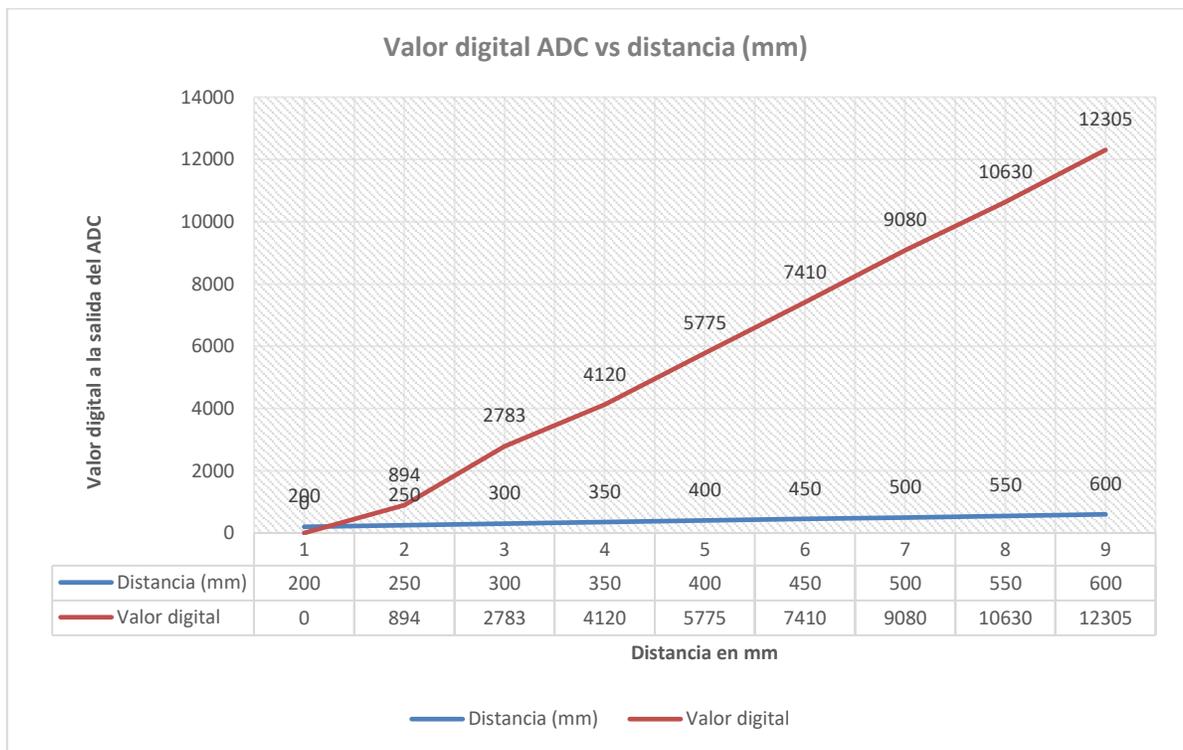
El voltaje de salida del sensor será entonces, proporcional a la distancia del objeto detectado en el rango de 0V a 10V. De manera que, si el objeto está ubicado a 200 mm el voltaje de salida será 0V, mientras que si está a más de 1000 mm la salida será de 10V.

En el laboratorio, se pudo comprobar que la relación de distancia vs voltaje de salida es lineal lo cual puede observarse en la tabla 1 en donde se aplicó un escalamiento de 1/3 al voltaje de salida del sensor.

Tabla. 1. Relación distancia vs voltaje de salida del sensor de ultrasónico 3RG6343 al cual se la ha aplicado un escalamiento de 1/3.

Distancia (mm)	Voltaje (V)
200	0.000
250	0.112
300	0.348
350	0.515
400	0.722
450	0.926
500	1.135
550	1.329
600	1.538

En la Gráfica 1, se muestra la relación de distancia vs el voltaje de salida que ha pasado por un convertidor de analógico a digital (ADC) para su procesamiento posterior por un sistema microcontrolado.



Gráfica. 1. Relación voltaje de salida vs distancia como valores digitales, se puede observar que la proporcionalidad es lineal.

En síntesis, se analizó la información del funcionamiento de cada uno de los componentes activos, a partir de la cual se elaboró la tabla 2 que se utilizará para poder crear los circuitos de acople de señal de entrada y salida del controlador electrónico del entrenador FPC:

Tabla. 2. Resumen de características de las señales de los principales dispositivos activos del entrenador FPC.

Dispositivo	Marca/Modelo	Tipo de señal	Voltaje de Operación	Rango de voltaje E/S	Convertidor
Bomba de agua.	LANG ECOCIRC D5vario-38/700B	PWM	24V	0 – 10V	DAC
Válvula de control de flujo.	Burket type 1094	Voltaje	24V	0 – 10V	DAC
Medidor de flujo.	SMC serie PF2W720	Voltaje	24V	0 – 10V	ADC
Sensor ultrasónico.	PEPPERL+FUCHS 559550 3RG6343-33JK01-PF	Voltaje	24V	0 - 10V	ADC

III. Diseño de un modelo matemático que represente el funcionamiento del entrenador de Flujo y Nivel

Ecuación diferencial general

En la figura 15 se muestra un esquema general de los elementos con los que cuenta el proceso a analizar:

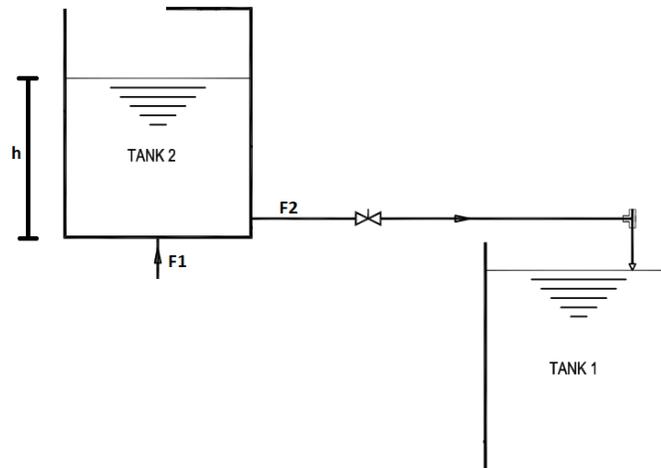


Fig. 15. Esquema de los principales elementos que forman parte del sistema.

Se observa que hay un flujo de entrada $F1$ y un flujo de salida $F2$, la altura del fluido h en el tanque 2 que es donde se requiere un nivel específico. Tanto $F1$, $F2$ y h son variables, esto significa que cambian en función del tiempo y por la modificación de las condiciones de funcionamiento de la bomba de agua y la válvula de control de flujo.

La ecuación diferencial general del sistema es:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot (F_1 - F_2) \quad (1)$$

Donde:

h: altura o nivel del fluido deseado en m.

A: área de la base del tanque 2 en m².

F1: flujo de entrada en m³/min.

F2: flujo de salida en m³/min.

Observaciones importantes:

1. El flujo F1 depende de la bomba por lo que es controlado, sus valores van desde 0 l/min hasta 8 l/min.
2. El flujo F2 no es controlado, depende de el volumen del fluido en el tanque 2, diámetro del tubo, válvula, codos y la gravedad.
3. Se debe modelar F2 y posteriormente reemplazara en (1).

Modelado de F2

Para el modelado de F2, se deben considerar los accesorios que se encuentran a la salida del tanque 2 y llevan el fluido al tanque 1 así como el diámetro de la tubería. Como en el entrenador FPC las distancias son pequeñas es muy difícil utilizar tablas para determinar las pérdidas de manera efectiva por lo que se debe incorporar un factor de corrección f en la ecuación solución.

La ecuación es la siguiente:

$$F_2 = a \cdot \sqrt{\frac{2g(h - 0.035)}{f}} \quad (2)$$

Donde:

a: es el área del diámetro interno del tubo de salida del tanque 2.

g: gravedad.

h: altura del fluido en el tanque 2 en metros.

0.035: es la altura del tubo de salida en metros respecto a la base del tanque 2.

f: es el factor de corrección por la resistencia de los accesorios a la salida de F2 (válvula, codos, etc.).

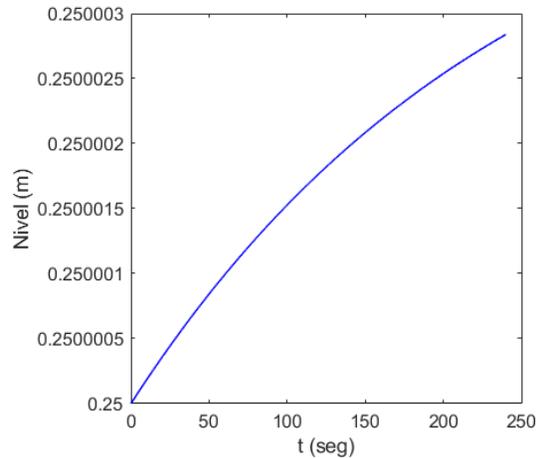
Ecuación diferencial del sistema

Sustituyendo (2) en (1):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot \left(F_1 - a \cdot \sqrt{\frac{2g(h - 0.035)}{f}} \right) \quad (3)$$

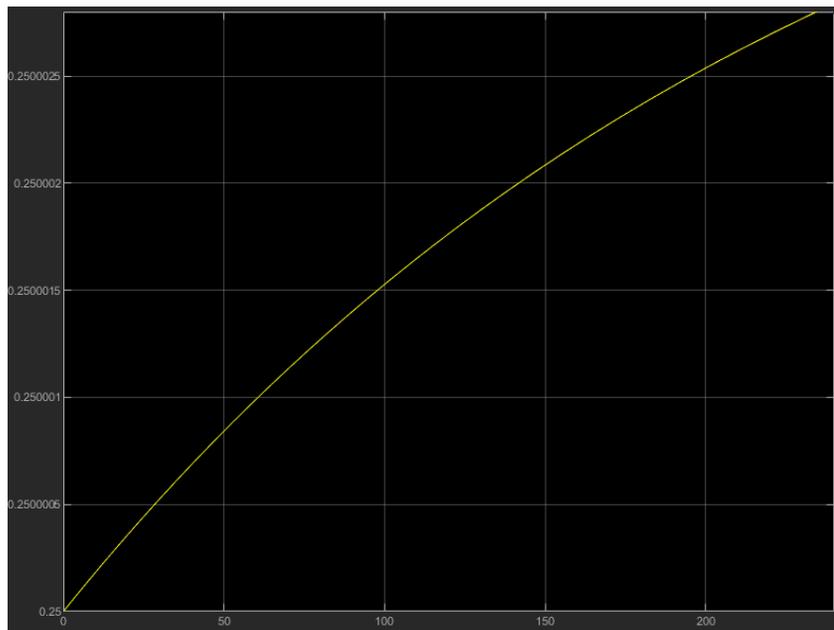
IV. Simulación del modelo matemático del entrenador

El proceso de simulación inicia con la comprobación de la ecuación diferencial solucionándola por el método de Euler por medio de un script diseñado en Matlab que puede observarse en el anexo 1 y cuyo resultado se muestra en la gráfica 2.



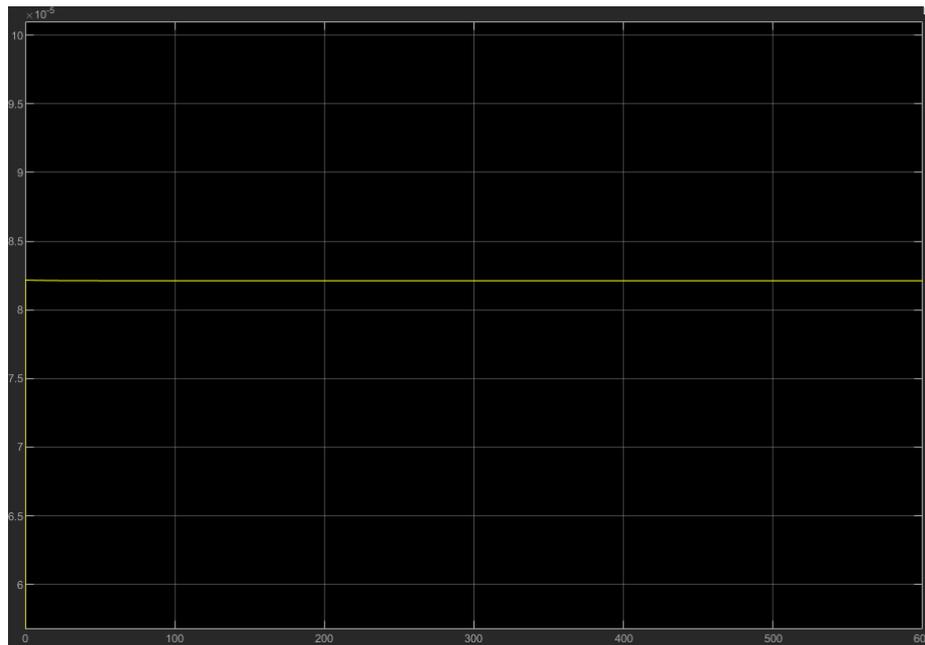
Gráfica. 2. Comportamiento del sistema a partir de la ecuación diferencial (3).

En la gráfica 2, puede observarse que el nivel se estabiliza prácticamente en 0.25m que es el setpoint establecido. Existe un leve incremento del nivel que se produce por efecto del factor de corrección que es un valor experimental. En Simulink se construyó el modelo funcional a bloques del entrenador FPC que se muestra en el anexo 2 y cuyos resultados se observan en la gráfica 3.

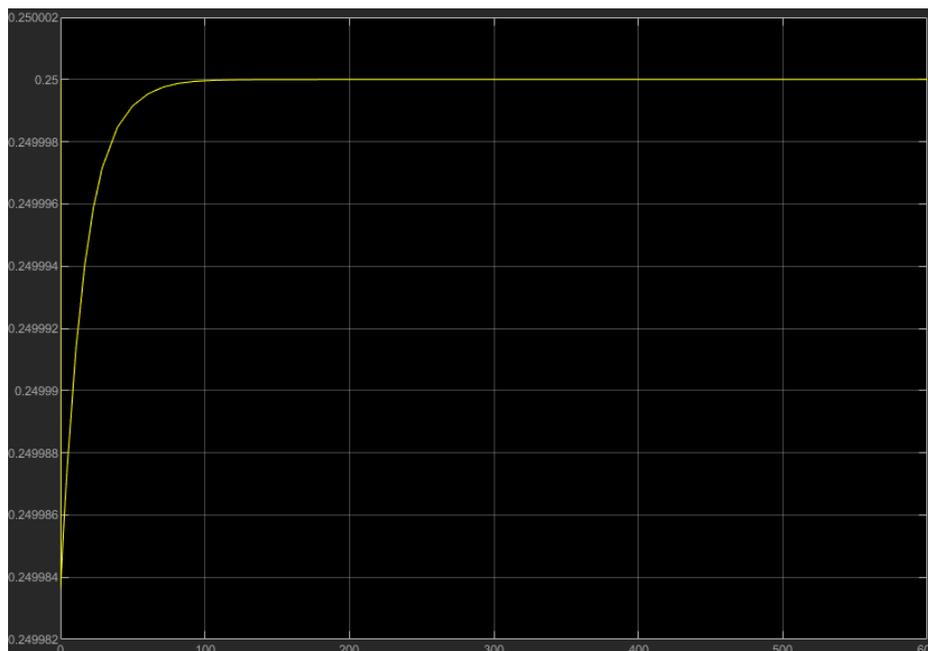


Gráfica. 3. Comportamiento del sistema a partir de la ecuación diferencial (3) en Simulink.

Finalmente se incorporó el modelo del entrenador FPC en un bloque y se integró a un sistema que incluye un controlador PID que puede observarse en el anexo 3 y se evaluó su comportamiento. Los resultados se muestran en las gráficas 4 y 5.



Gráfica. 4. Resultados de la simulación del proceso de flujo y nivel, se puede observar que el flujo se estabiliza en aproximadamente $0.0000825 \text{ m}^3/\text{s}$.



Gráfica. 5. Resultados de la simulación del proceso de flujo y nivel, se puede observar la acción del controlador PID estabilizando el nivel en 0.25m en aproximadamente 120 segundos.

V. Diseño de circuitos de control de válvula proporcional

La válvula proporcional Burket type 1094 requiere de una señal de control con rango de voltaje de 0 a 10VDC, esto hace necesario que el circuito de control cuente con dos etapas:

- La primera etapa consiste en un doble filtro pasa bajos que convertirá la señal PWM que genera un microcontrolador ESP32 en un voltaje proporcional de entre 0 y 3.3V.
- La segunda es un amplificador no inversor con ganancia de 3.3, de esta manera el voltaje se pueden producir niveles de tensión acordes a los parámetros de la válvula.

El circuito resultante se muestra en la figura 16.

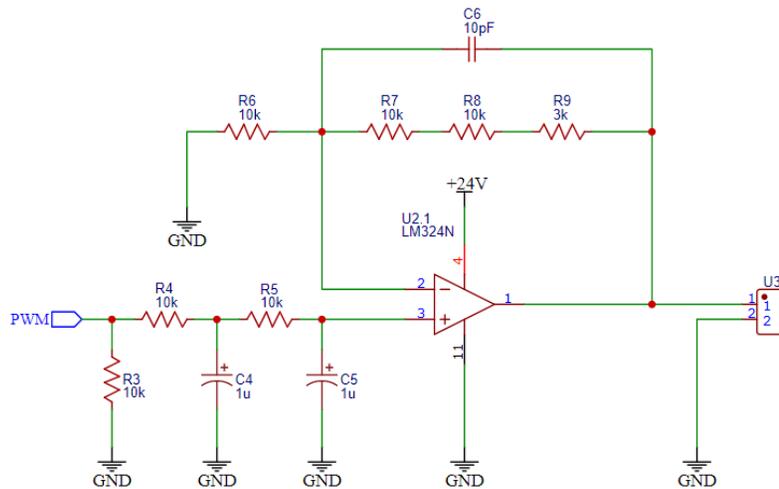


Fig. 16. Circuito de doble filtro pasa bajos para acondicionar la señal PWM.

Adicionalmente, se dotó al circuito de una fuente de alimentación independiente que reduce la tensión de 24V a 5V que son adecuados para la fuente de alimentación integrada en el módulo ESP32-WROOM32. El diagrama esquemático completo se muestra en el Anexo 4. Los circuitos fueron sometidos a diversas pruebas de funcionamiento en el laboratorio como se muestra en la figura 17, obteniendo los resultados esperados que se muestran en la tabla 3 y gráfica 6.

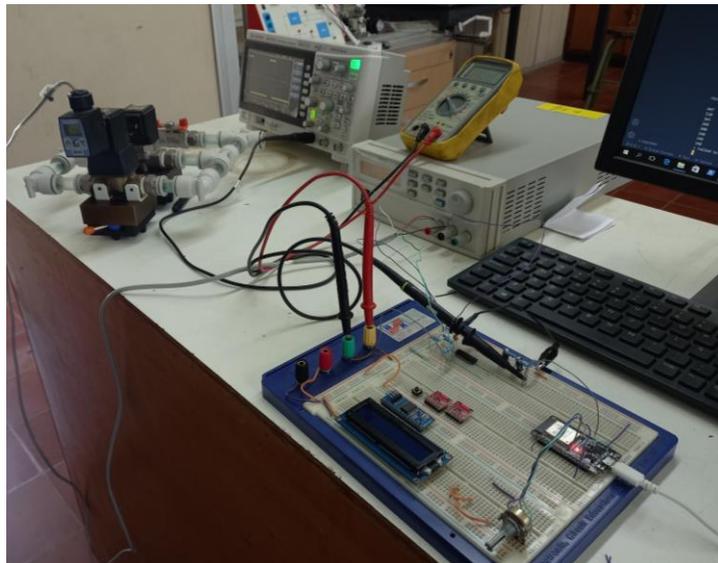
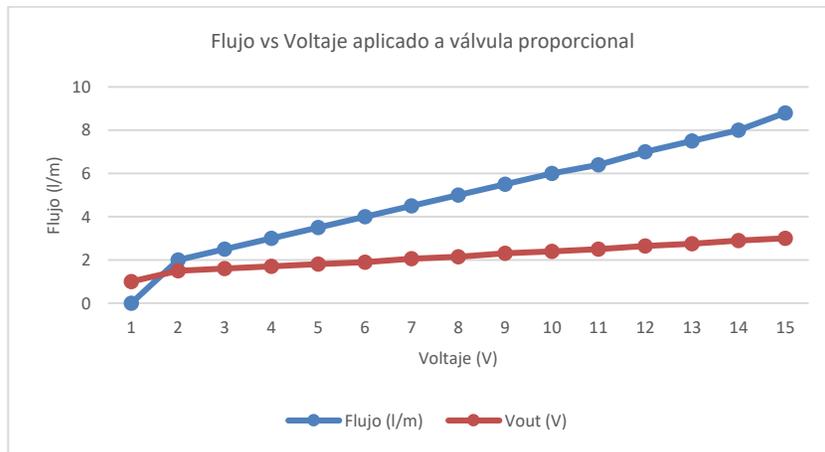


Fig. 17. Banco de pruebas de funcionamiento del circuito de control de la válvula proporcional.

Tabla 3. Relación entre el flujo que pasa por la válvula proporcional y el voltaje PWM aplicado por el microcontrolador.

Flujo (l/m)	Vout (V)
0	1
2	1.5
2.5	1.6
3	1.7
3.5	1.8
4	1.9
4.5	2.05
5	2.15
5.5	2.3
6	2.4
6.4	2.5
7	2.65
7.5	2.75
8	2.9
8.8	3



Gráfica 6. Relación entre el flujo medido por el sensor respecto al voltaje aplicado a la válvula.

Una vez comprobado el funcionamiento del circuito se diseñó y elaboró el PCB quedando un montaje como el mostrado en la figura 18.

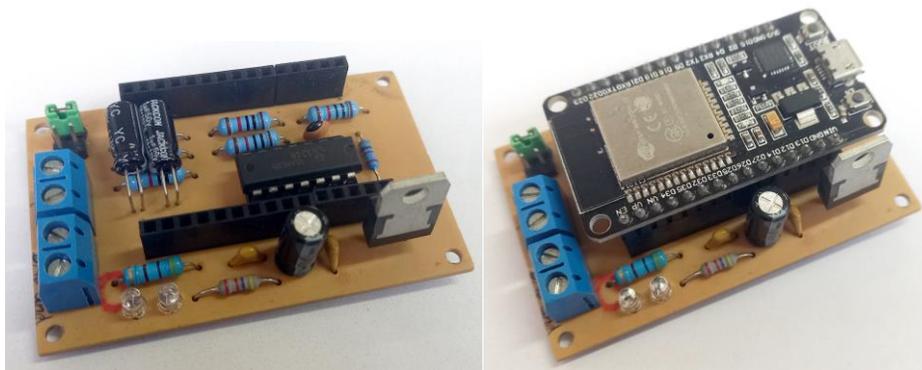


Fig. 18. Montaje en PCB del circuito de control de la válvula proporcional, a la izquierda sin el módulo del microcontrolador y a la derecha el montaje completo.

El diseño completo del PCB se muestra en el Anexo 5.

VI. Diseño de diagrama esquemático de controlador electrónico

Para el diseño del circuito controlador electrónico, primeramente, se definieron las especificaciones de entradas y salidas del dispositivo que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Definición de especificaciones técnicas de las entradas y salidas del controlador electrónico.

Especificaciones Técnicas del Controlador Electrónico de Propósito General	
Procesador	ESP32 WROOM32
Entradas	8 digitales 24VDC
	3 analógicas 0-10V
Salidas	8 digitales 24VDC
	4 analógicas 0-10V
	2 PWM de 24V
Protocolo de comunicación industrial	MODBUS TCP
Conectividad	Ethernet (WIFI)
	USB para programación y depuración
Memoria	4MB Flash

El circuito controlador está basado en el microcontrolador ESP32 WROOM32 embebido en una placa de desarrollo con 4MB de memoria flash, el circuito se muestra en la figura 19.

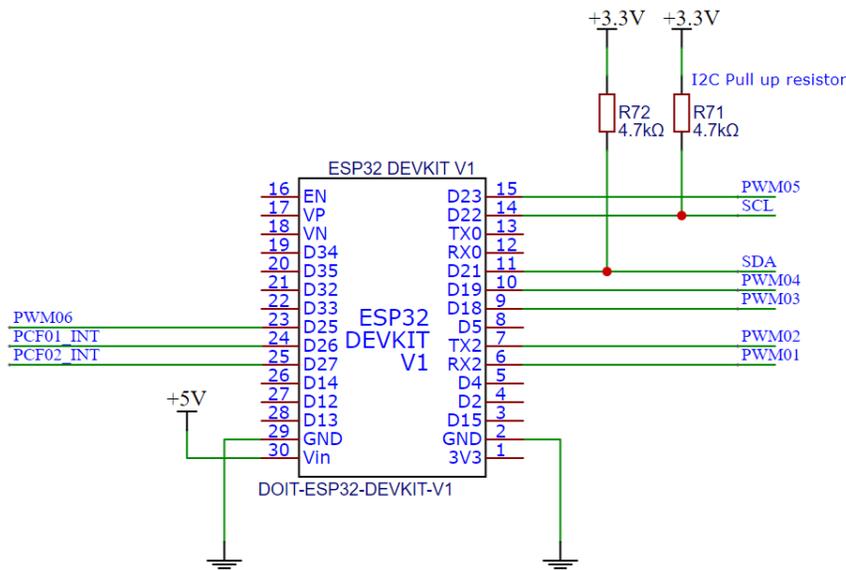


Fig. 19. Circuito microcontrolador del controlador electrónico basado en ESP32 WROOM32.

Como puede observarse, el circuito en general posee muy pocos componentes discretos alrededor del microcontrolador, esto se debe a que para el manejo de las entradas y salidas digitales se decidió multiplexar las señales utilizando expansores I/O basados en PCF8574 que se comunican con el microcontrolador por medio de un bus I²C lo cual requiere únicamente dos pines del microcontrolador que son SDA y SCL, así como dos resistencias de pull up que son obligatorias en este tipo de bus. El circuito completo del microcontrolador se denomina circuito de SYSCON y junto con la fuente de alimentación se muestra en el Anexo 6.

Los expansores para entradas y salidas se muestran en la figura 20.

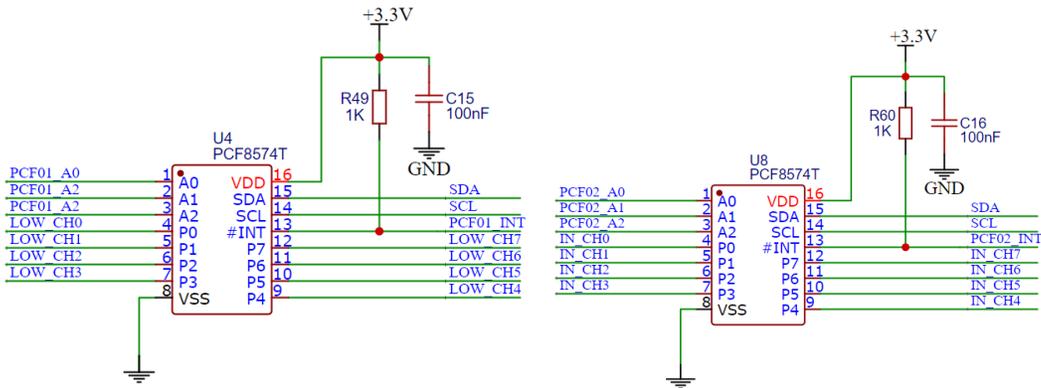


Fig. 20. Expansores de entradas (derecha) y salidas (izquierda) de 8 canales controlados por medio de un bus I²C.

Cada expansor dispone de una línea de comunicación directa con el microcontrolador denominada PCFx_INT la cual tiene como objetivo funcionar como una interrupción de prioridad en caso de que el expansor necesite interrumpir el proceso del microcontrolador para ser atendido de emergencia. Antes que las señales de entrada digitales lleguen al circuito expansor, deben ser escaladas a niveles de tensión de entre 0 y 3.3V ya que los dispositivos que se conectan a estas generan tensiones de hasta 24V, el circuito de escalamiento se muestra en la figura 21.

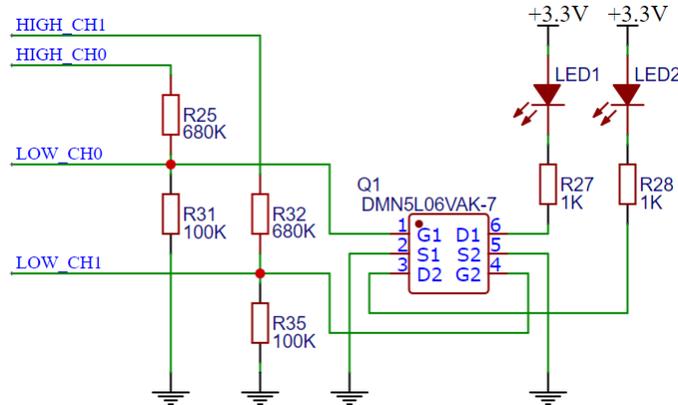


Fig. 21. Circuito de escalamiento de 24V a 3.3V para dos canales de entrada digital.

En el circuito se observa que se utiliza un divisor de voltaje para escalar la señal de entrada denominada HIGH_Chx y un transistor MOSFET DMN5L06 para activar un led indicador, la señal escalada se denomina LOW_Chx, en el encapsulado del chip existen dos transistores por lo que pueden manejarse dos canales de entrada.

Son necesarios cuatro de estos circuitos para los ocho canales de entrada, en el anexo 7, se muestra el circuito completo.

Por otra parte, las salidas digitales deben ser escaladas de 3.3V que es el nivel lógico a la salida del expansor PCF8574 hasta 24V que es la tensión DC de trabajo nominal que utilizan los dispositivos industriales. Para cumplir con este cometido se utiliza el clásico amplificador Darlington ULN2003 que a su vez también se utiliza para elevar el nivel de tensión de las salidas dos salidas PWM que vienen desde el microcontrolador.

En la figura 22 se muestra el circuito de salida digital.

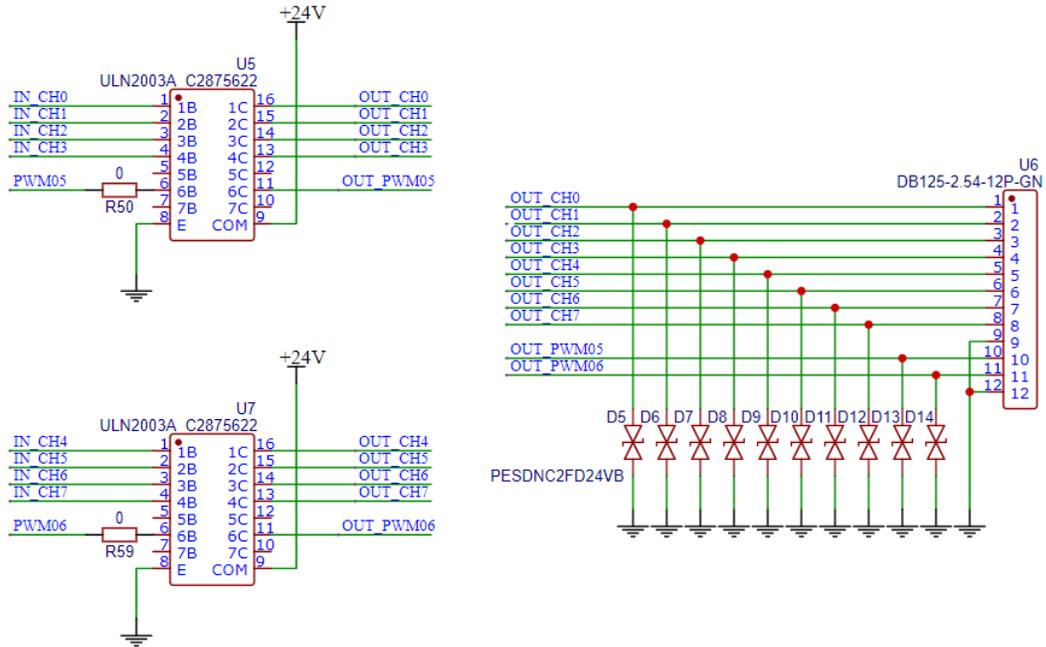


Fig. 22. Circuito de salida digital de que eleva el nivel a 24V basado en ULN2003.

El circuito de salida digital está formado por dos amplificadores ULN2003 que manejan cuatro canales digitales más un canal PWM cada uno, en la salida de los circuitos integrados se incorporó un dispositivo protector ESD bidireccional PESDNC2FD24VB que protege el controlador de descargas electrostáticas que puedan inducirse a través de los dispositivos que se conectarán en las salidas. En el anexo 8 se muestra el circuito completo.

Para proveer salidas analógicas de 0V a 10V, se utilizan señales PWM que pasan por un doble filtro pasa bajos y un amplificador de con ganancia de 3.3 basado en el LM324 similar al mostrado en la figura 15, cada circuito maneja un canal por lo que son necesarios cuatro a los cuales se les agregó a la salida un dispositivo protector contra descargas electrostáticas PESD12VL1BA tal como se muestra en la figura 23. En el anexo 9 se muestra el circuito completo.

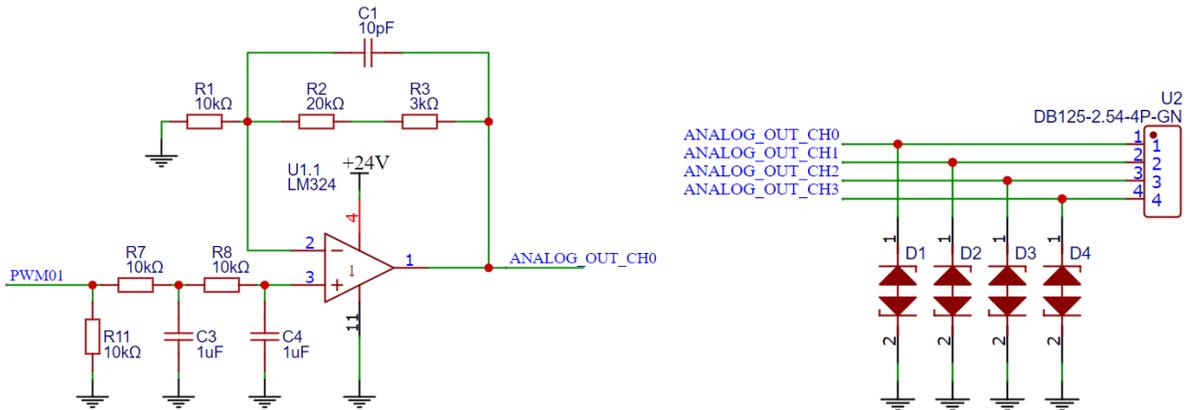


Fig. 23. Circuito convertidor amplificador para canales analógicos de hasta 10V.

Metodología empleada por la Escuela de Ingeniería en Computación

I. Análisis y determinación de requerimientos.

Para el cumplimiento de esta etapa se desarrollaron 5 fases, quedando de la siguiente manera:

Fase 1. Explicación técnica del entrenador de flujo y nivel.

Fase 2. Medición de componentes del entrenador.

Fase 3. Selección de herramientas tecnológicas.

Fase 4. Análisis de la escalabilidad de la plataforma de Teleingeniería.

Fase 5. Análisis del modelo de base de datos.

El detalle de cada fase se amplía a continuación:

Fase 1. En la Fig. 24 se observa al docente coinvestigador de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica brindando la explicación técnica de cada una de las piezas que componen el entrenador de flujo y nivel. Esta fase permitió dar a conocer la función e importancia de cada elemento, de esta manera, se obtuvieron los requerimientos para diseñar los modelos 3D pertenecientes al simulador.



Fig. 24. Docente coinvestigador de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Fase 2. Se realizó la medición de los componentes del entrenador con el objetivo de obtener las medidas escalares para el diseño de los modelos 3D (fig. 25).



Fig. 25. Proceso de toma de mediciones de los componentes del entrenador FPC de flujo y nivel.

Fase 3. Se seleccionaron las herramientas tecnológicas a utilizar para el desarrollo del simulador virtual con realidad aumentada determinando las siguientes:

Vectary: es una plataforma de diseño 3D. (fig. 26)

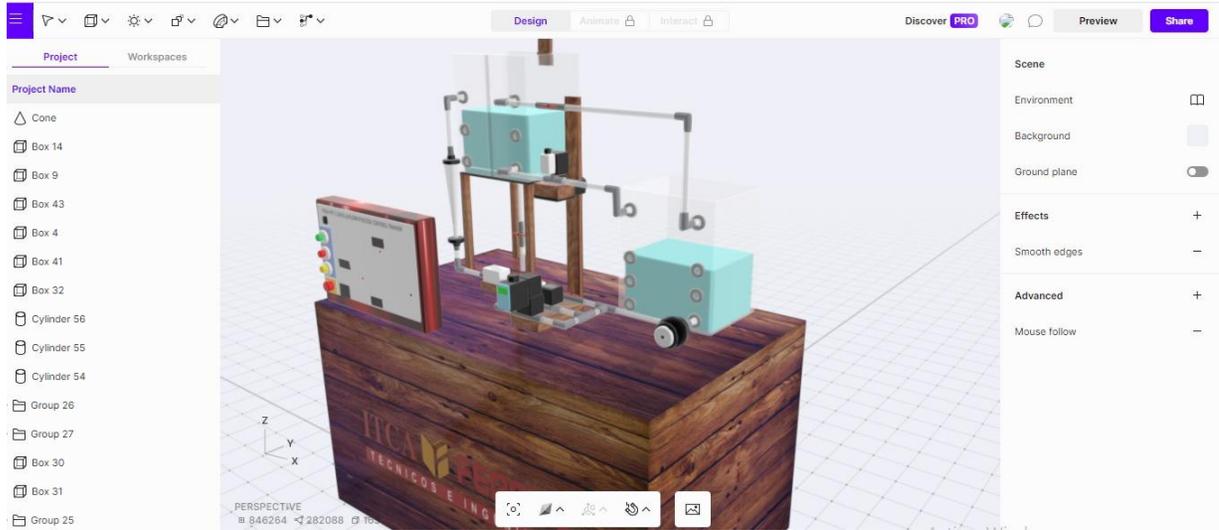


Fig. 26. Interfaz de Vectary.

Unity: es un motor de desarrollo que ha sido utilizado para crear la aplicación móvil con realidad aumentada (fig. 27).

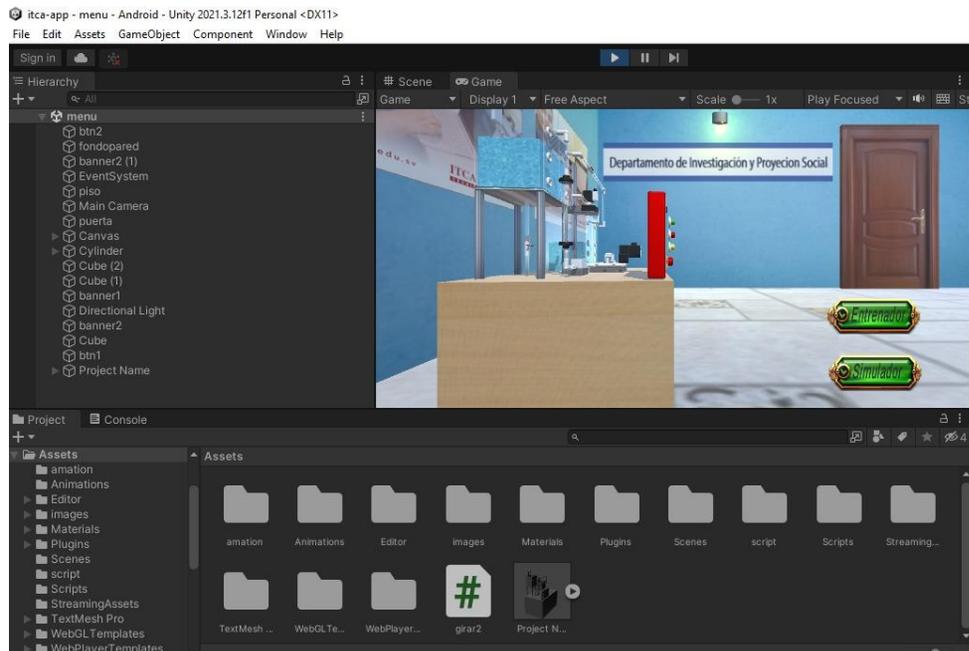


Fig. 27. Interfaz de Unity.

Vuforia: es un kit de desarrollo de software para dispositivos móviles que permite crear aplicaciones de realidad aumentada (fig. 28).

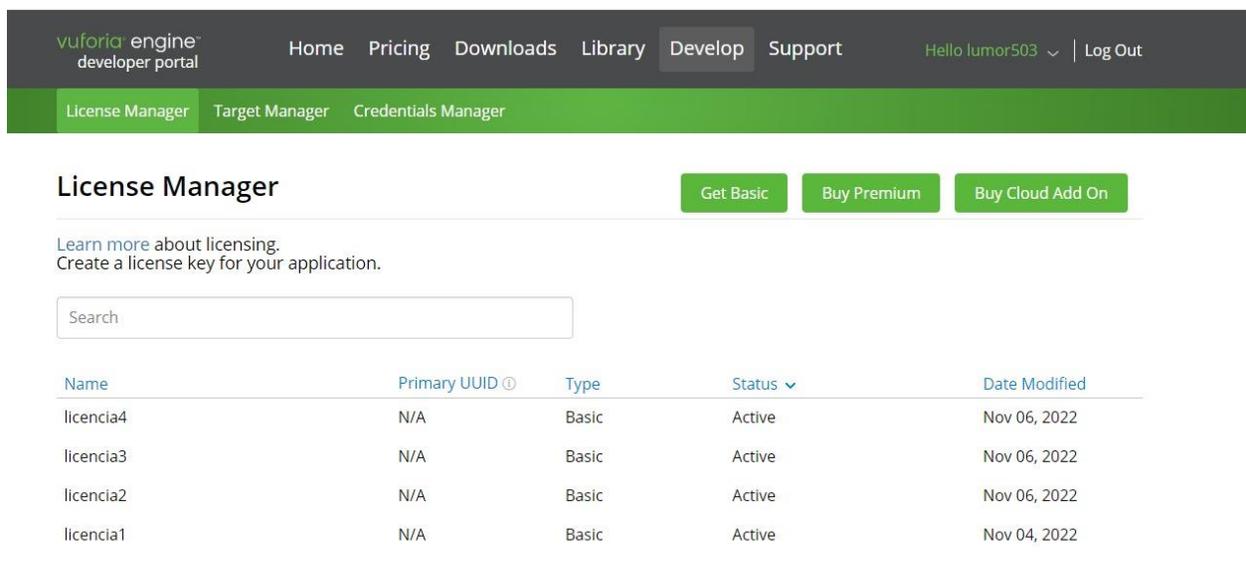


Fig. 28. Kit de desarrollo Vuforia.

Fase 4. Se analizó la versión inicial de la plataforma de Teleingeniería para escalar sus funcionalidades. Determinando así, los privilegios de cada usuario, el proceso para la gestión de reservas de horarios y el diseño preliminar para la interfaz del entrador de flujo y nivel.

Los privilegios establecidos para cada usuario se detallan en el anexo 10.

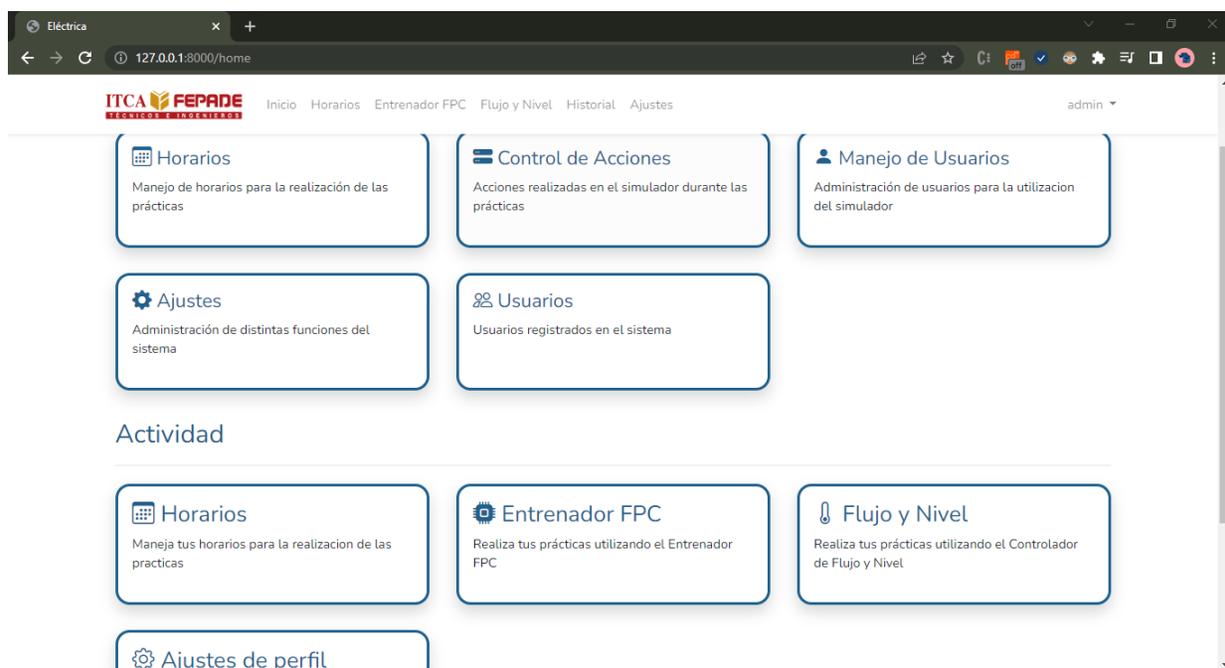


Fig. 29. Panel principal de la aplicación de Teleingeniería con nuevo módulo de entrenador de flujo y nivel.

Fase 5. Se analizó la estructura de la base de datos para escalar su funcionalidad de acuerdo con la plataforma de Teleingeniería.

La fig. 30 muestra la versión final del diagrama:

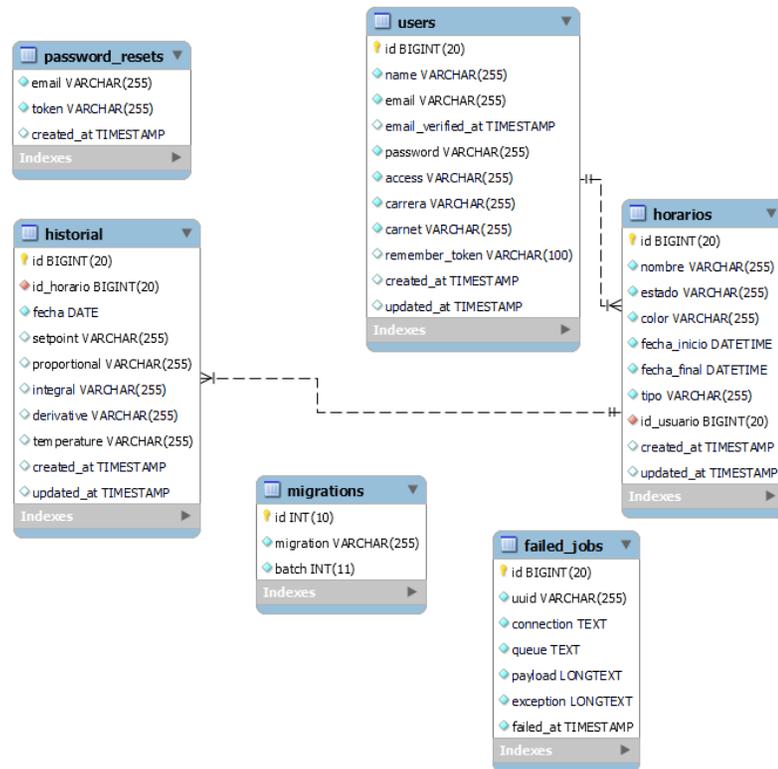


Fig. 30. Diagrama EER de la plataforma de Teleingeniería.

II. Diseño de interfaces y elementos.

Los elementos gráficos que nos ayudan a comunicarnos con un sistema cumplen un papel fundamental en toda solución tecnológica. Un buen diseño de interfaz debe ser intuitivo y fácil de interactuar con el producto, por ello, es prioritario considerar la experiencia e interfaz de usuario, o técnicamente conocido como UX/UI. Si se habla de UX (User Experience) se sabe que es aquel proceso que se desarrolla cuando el usuario navega en una interfaz digital y como resultado se puede determinar si la interfaz propuesta es accesible, gráficamente clara, funcional, práctica y fácil de usar, ahora bien, el diseño UI (User Interface) se sitúa en la fase de implementación, esta es la etapa donde las ideas y prototipos propuestos cobran vida.

Considerando la UX/UI se diseñaron las siguientes interfaces para la aplicación móvil:

Diseño de Splash Screen: es la primera pantalla visible para el usuario cuando se inicia la aplicación. Consiste en una pantalla inicial que muestra el logotipo de la aplicación durante uno o varios segundos.



Fig. 31. Splash Screen.

Diseño del Menú de Aplicación: muestra las tres opciones con las que el usuario podrá interactuar dentro de la aplicación. Las tres opciones disponibles son:

1. Entrenador Remoto.
2. Simulador con Realidad Mixta.
3. Simulador con Realidad Aumentada.



Fig. 32. Menú de aplicación.

Diseño de pantalla del Entrenador Remoto: muestra la pantalla para acceder al Entrenador Remoto, esta interfaz es la que se mostrará desde la opción de menú número 1 que se encuentra en la fig.33.

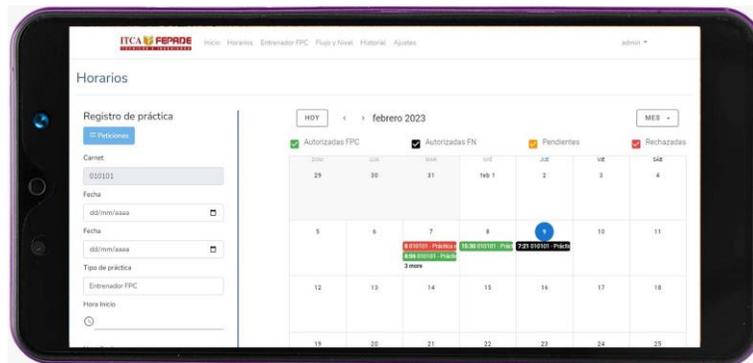


Fig. 33. Interfaz para acceder al Entrenador Remoto.

Diseño de pantalla del Simulador con Realidad Aumentada: muestra la pantalla para acceder al Simulador con Realidad Aumentada, esta interfaz es la que se mostrará desde la opción de menú número 3 que se encuentra en la fig. 34.



Fig. 34. Simulador con Realidad Aumentada.

7 RESULTADOS

Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

- Modelo Matemático que describe el funcionamiento de un Entrenador de Procesos de Fluidos de Flujo y Nivel.
- Diagrama Esquemático de un Controlador Electrónico para el Entrenador de Flujo y Nivel que permita el controla distancia por medio de una red de datos.
- Circuito de control de válvula proporcional reguladora de flujo.

Escuela de Ingeniería en Computación

- Prototipo inicial del simulador que conforma el entrenador de flujo y nivel.
- Diseños de interfaces de usuario del entrenador virtual.
- Diseño de interfaces del sistema de administración de teleingeniería.
- Base de datos en formato Big Data.
- Diseño de interfaces de dashboard para análisis de datos con BI.
- Componentes renderizados en 3D con volumetría básica del entrenador de flujo y nivel.

8 CONCLUSIONES

1. Es posible modelar un proceso industrial de flujo y nivel utilizando herramientas de cálculo diferencial y obtener resultados similares a los que se producen en los dispositivos reales.
2. Las herramientas de modelado y simulación matemática como Matlab y Simulink son de gran importancia para los investigadores, ya que permiten comprobar el comportamiento de sistemas de ecuaciones como las diseñadas en este proceso industrial.
3. Se pueden diseñar circuitos para dispositivos de grado industrial de bajo costo sin afectar su funcionamiento, tal como se hizo con el circuito de control de la válvula proporcional diseñado en este proyecto.
4. Se puede diseñar un controlador electrónico a medida de los requerimientos cumpliendo requisitos de control, de señales de entrada-salida y demás características de los controladores industriales existentes en el mercado.
5. Las tecnologías de realidad aumentada empleadas demostraron ser adecuadas para el diseño de modelos físicos para ser usados en la simulación de procesos industriales.
6. Se puede diseñar un prototipo de un gemelo digital similar a un entrenador de procesos industriales de flujo y nivel.
7. Se demostró que es posible realizar ajustes a una base de datos según se modifican los requerimientos funcionales de diseño de la plataforma de teleingeniería.
8. Se pueden crear modelos 3D con software Vectary partiendo de las características físicas de los dispositivos que forman parte de un equipo real.

9 RECOMENDACIONES

1. Se debe evaluar dotar con más entradas y salidas digitales al controlador electrónico para que pueda cumplir con características de propósito general y se pueda utilizar para controlar maquinaria más compleja.
2. Se recomienda utilizar los servicios de creación de PCB y montaje de componentes SMD profesionales que ofrecen diversos fabricantes para mejorar la calidad del montaje de los circuitos y reducir potenciales fallas.
3. Se debe mejorar la interfaz gráfica de la plataforma teleingeniería para mejorar la experiencia del usuario evaluando plantillas gratuitas o de paga.
4. Se deben utilizar cámaras IP para la captura de video en tiempo real y liberar recursos en el servidor en donde se ejecuta la plataforma de teleingeniería.

10 GLOSARIO

A

Adquisición de datos

Son los productos y/o procesos utilizados para recopilar información para documentar o analizar un fenómeno.

B

Bases de datos de tipo relacional

Es un tipo de base de datos que cumple con el modelo relacional, que es el modelo más utilizado actualmente para implementar las Bases de Datos ya planificadas.

Big Data

Es un concepto que hace referencia al almacenamiento de grandes cantidades de datos y a los procedimientos usados para encontrar patrones repetitivos dentro de esos datos.

Big Table

Es un sistema de gestión de base de datos creado por Google con las características de ser: distribuido, de alta eficiencia y propietario.

Business Intelligence

Es un término genérico que incluye las aplicaciones, la infraestructura y las herramientas, y las mejores prácticas que permiten el acceso y el análisis de la información para mejorar y optimizar las decisiones.

M

MongoDB

Es un sistema de base de datos NoSQL orientado a documentos, desarrollado bajo el concepto de código abierto.

N

NoSQL

Not Only SQL y son sistemas de almacenamiento que no cumplen con el esquema entidad-relación. Proveen un sistema de almacenamiento mucho más flexible y concurrente y permiten manipular grandes cantidades de información de manera mucho más rápida que las bases de datos relacionales.

P

Presión diferencial

La presión diferencial se define como la diferencia de las medidas de la presión entre dos puntos en un sistema. Esta medida es importante en aplicaciones que tienen la funcionalidad de la presión, tales como la instrumentación meteorológica, los aviones y los automóviles.

R

Robot industrial

Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Retroalimentación

Como retroalimentación se designa el método de control de sistemas en el cual los resultados obtenidos de una tarea o actividad son reintroducidos nuevamente en el sistema con el fin de controlar y optimizar su comportamiento.

S

Sistema telemático

Es aquel que está formado por equipos informáticos conectados unos a otros mediante una red de telecomunicaciones, que consiste en una red de nodos ordenados para la comunicación tanto para cortas como para largas distancias.

Visor VR

Un casco de realidad virtual, también llamado gafas de realidad virtual, visor de realidad virtual o HMD (del inglés head-mounted display), es un dispositivo de visualización similar a un casco, que permite reproducir imágenes creadas por ordenador sobre una pantalla muy cercana a los ojos o proyectando la imagen directamente sobre la retina de los ojos. En este segundo caso el casco de realidad virtual recibe el nombre de monitor virtual de retina.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Soria Tello, «Capítulo 1. Introducción a los sistemas automáticos industriales», en *Sistemas Automáticos Industriales de Eventos Discretos*, México D.F.: Alfaomega, 2013.
- [2] W. C. Dunn, *Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control*. McGraw Hill, 2005.
- [3] Pepperl+Fuchs, «Sensores capacitivos», *Pepperl+Fuchs*, 26 de enero de 2022. https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_144.htm (accedido 26 de enero de 2022).
- [4] «Válvulas Proporcionales - Blog Técnico Automotriz», *Curso Automotriz - Curso Virtual Automotriz - Capacitación Automotriz*, 19 de julio de 2012. <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/101-valvulas-proporcionales/> (accedido 26 de enero de 2022).
- [5] «Medidores de flujo: ¿qué son y cómo funcionan? | Badger Meter». <https://www.badgermeter.com/es-es/blog-es-es/medidores-de-flujo-que-son-y-como-funcionan/> (accedido 26 de enero de 2022).
- [6] N. Fernando, M. Antonio, y M. José M., *Realidad virtual y realidad aumentada: desarrollo de aplicaciones*. 2020.
- [7] J. Cortés Trujillo y M. R. Jennifer Catalina, *Realidad virtual en los procesos de enseñanza en la educación superior*. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/itca/129155?page=19>
- [8] «Realidad virtual, aumentada y mixta. Qué son y diferencias.», *Editeca*, 3 de octubre de 2017. <https://editeca.com/realidad-virtual-aumentada-y-mixta-que-son-y-en-que-se-diferencian/> (accedido 11 de febrero de 2022).
- [9] «Realidad Virtual, ¿qué es y para qué sirve? ▷ 9 Aplicaciones», *EDS Robotics*, 4 de agosto de 2021. <https://www.edsrobotics.com/blog/realidad-virtual-que-es/> (accedido 11 de febrero de 2022).
- [10] Mullen, Tony, *Realidad Aumentada: Crea tus propias Aplicaciones*. España: Anaya, 2011.
- [11] «Todo sobre la Realidad Aumentada», *Innovae*. <https://www.innovae.eu/la-realidad-aumentada/> (accedido 27 de febrero de 2022).

12 ANEXOS

12.1 ANEXO 1. SCRIPT SOLUCIÓN DE ECUACIÓN DIFERENCIAL 3 UTILIZANDO EL MÉTODO DE EULER CON MATLAB

```
%%% Todas las unidades están en SI %%

% RANGO DE INTEGRACION
xi = 0;
xf = 240;

% VALORES INICIALES DE "y" y "u"
% La altura del tanque es 0.65 metros
h = 0.25;          % Nivel deseado en metros
d = 0.012;        % Diámetro del tubo de salida del agua
g = 9.81;         % Constante de gravedad en m/s cuadrados

%{
FLUJO DE ENTRADA:

Flujo de entrada en metros cúbicos por segundo (máximo de la bomba)
El flujo máximo que puede proporcionar la bomba es de 8.8 l/min
que es igual a 0.0001466 m3/s

De acuerdo con la simulación, el nivel se mantiene si el flujo de entrada
F1 es aproximadamente 4.93 l/s = 0.00082126 m3/s

%}

F1 = 0.00082126; % Flujo F1 máximo
f = 8,          % Factor de corrección por resistencias de tubería, válvula y accesorios.

% PARAMETROS
b = 0.185;      % Base del tanque en metros
p = 0.25;       % Profundidad del tanque en metros
hs = 0.035;     % Altura de la salida del tanque respecto a la base

% SECCION DE INICIACION
% -----
dx = 0.001;
XPRINT = 5;     % INTERVALO DE IMPRESION DE DATOS
X = xi:dx:xf;
n = length(X);
Y = h;         % INICIALIZA EL VECTOR Y
% -----
```

```

for i = 1:n-1
    % SECCION DE ECUACIONES
    % -----

    A = b * p;
    At = (pi/4) * d^2;
    dh = (1/A) * (F1 - (At * sqrt((2*g*(h-0.035))/f))); %Ecuación diferencial

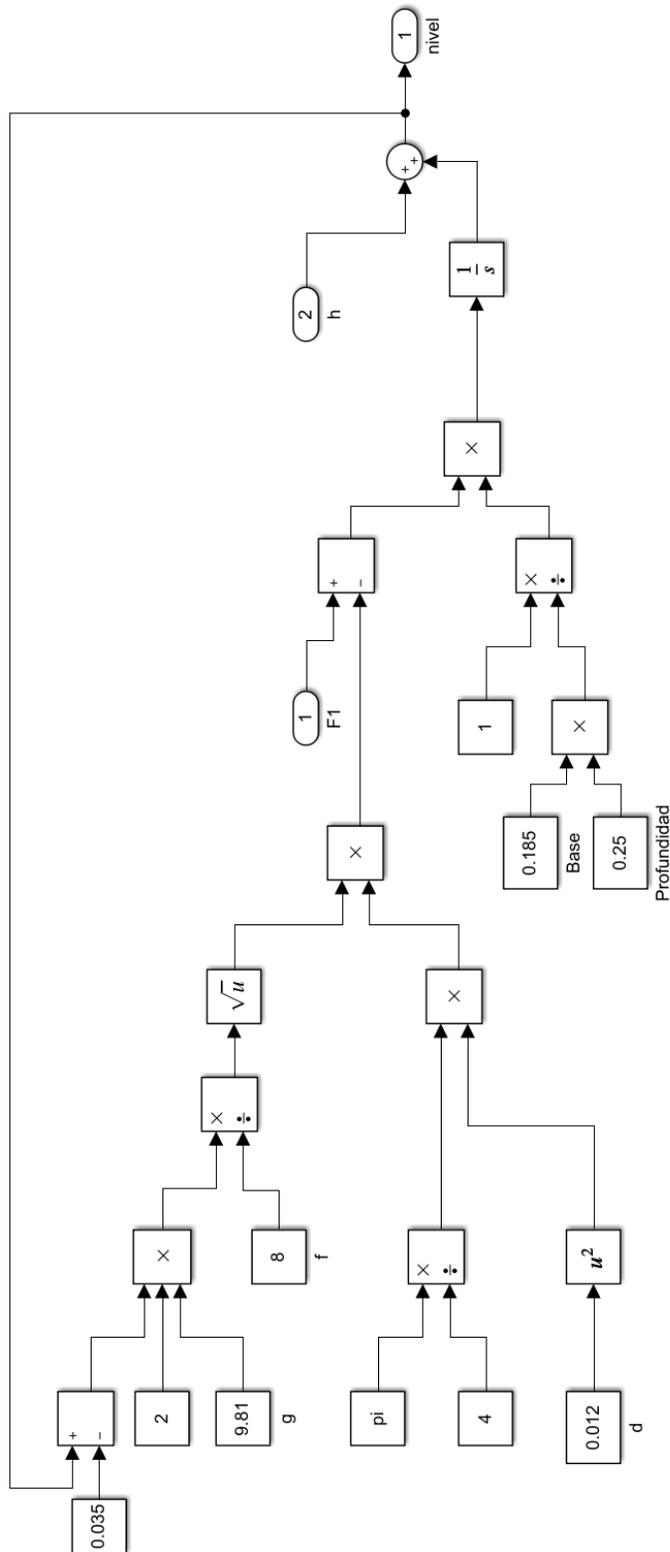
    % SECCION DE INTEGRACION
    % -----

    h = INT_EULER(h,dh);

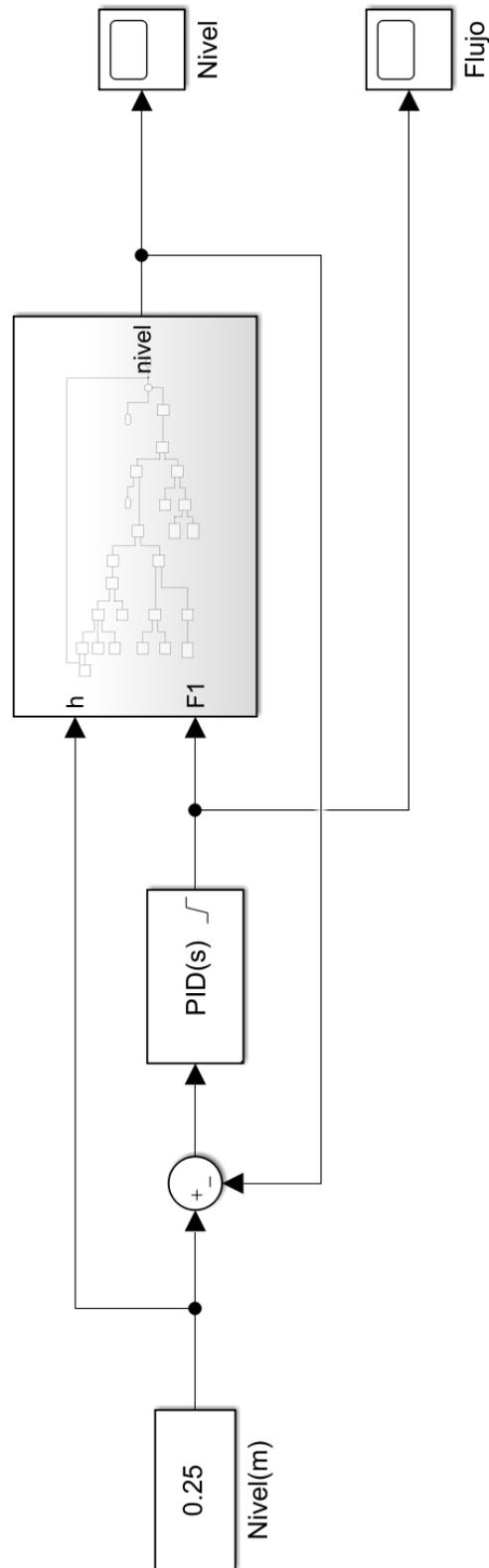
    Y(i+1) = h;
end

```

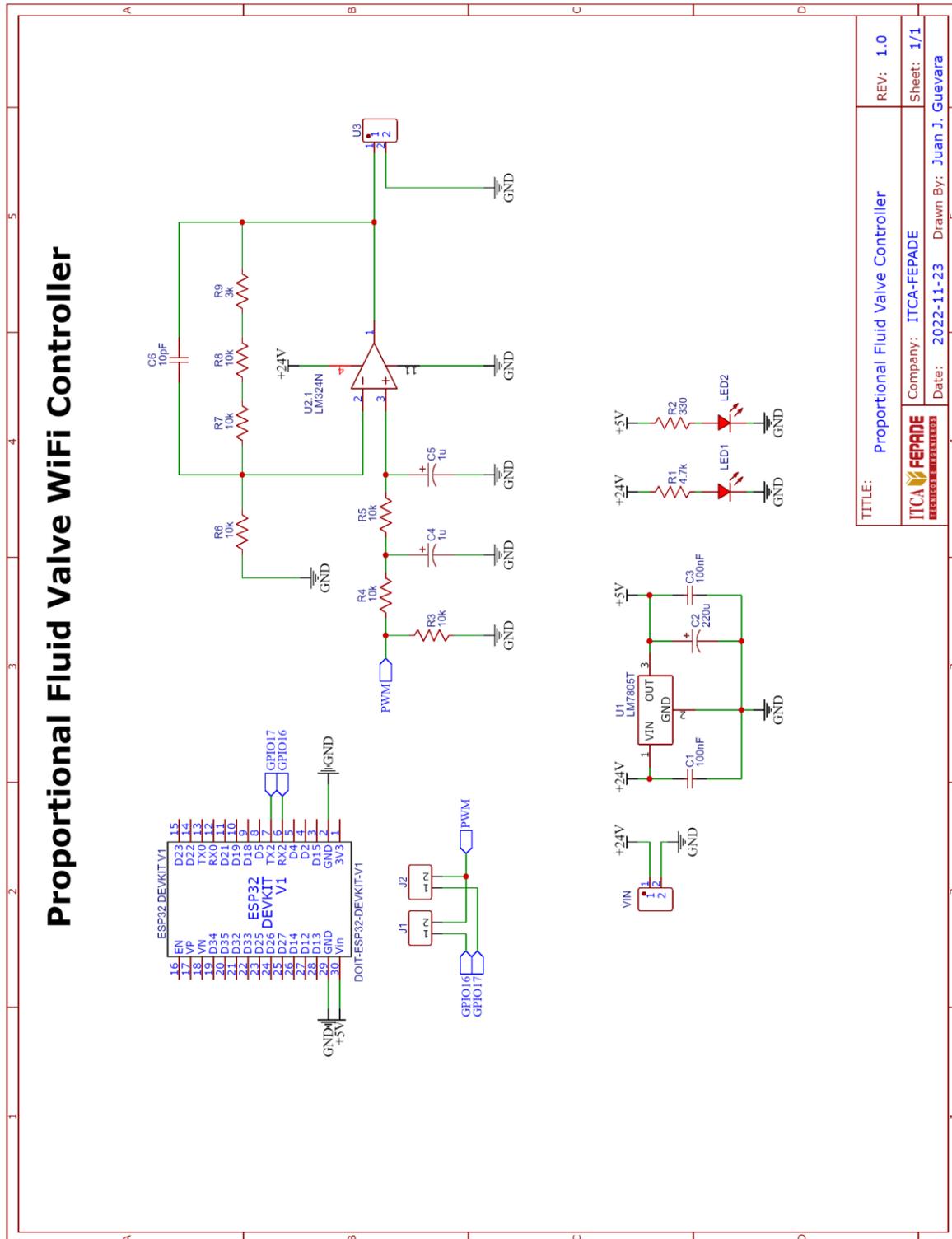
12.2 ANEXO 2. MODELO EN SIMULINK DEL ENTRENADOR FPC DE FLUJO Y NIVEL DE ACUERDO CON LA ECUACIÓN DIFERENCIAL 3



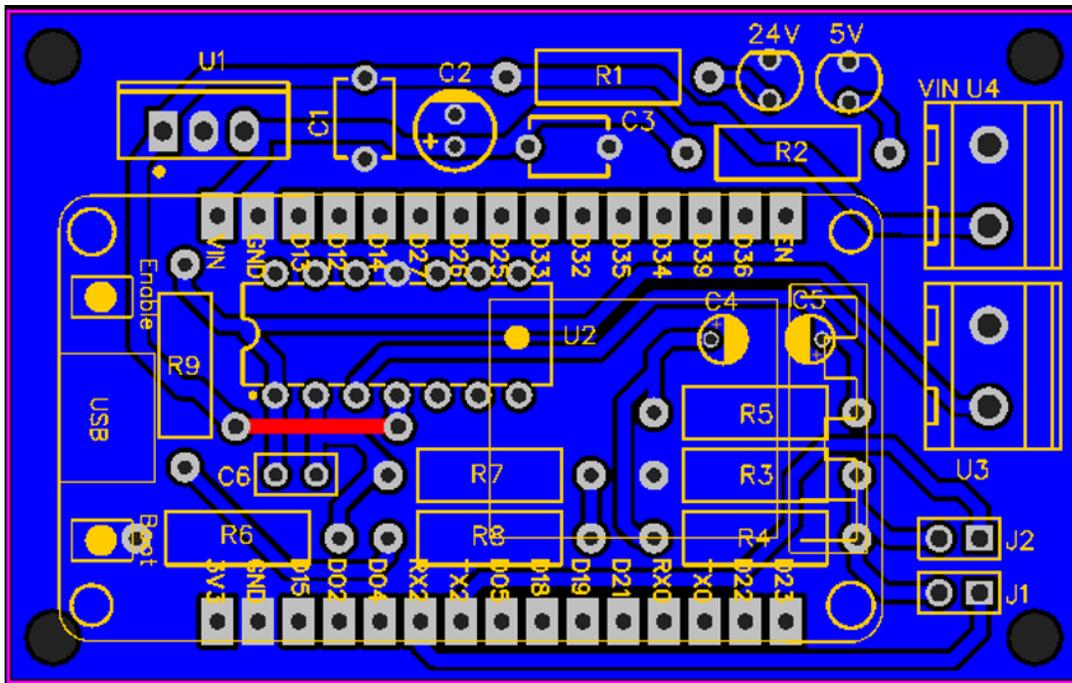
12.3 ANEXO 3. INTEGRACIÓN DEL MODELO DEL ENTRENADOR FPC CON UN CONTROLADOR PID EN SIMULINK.



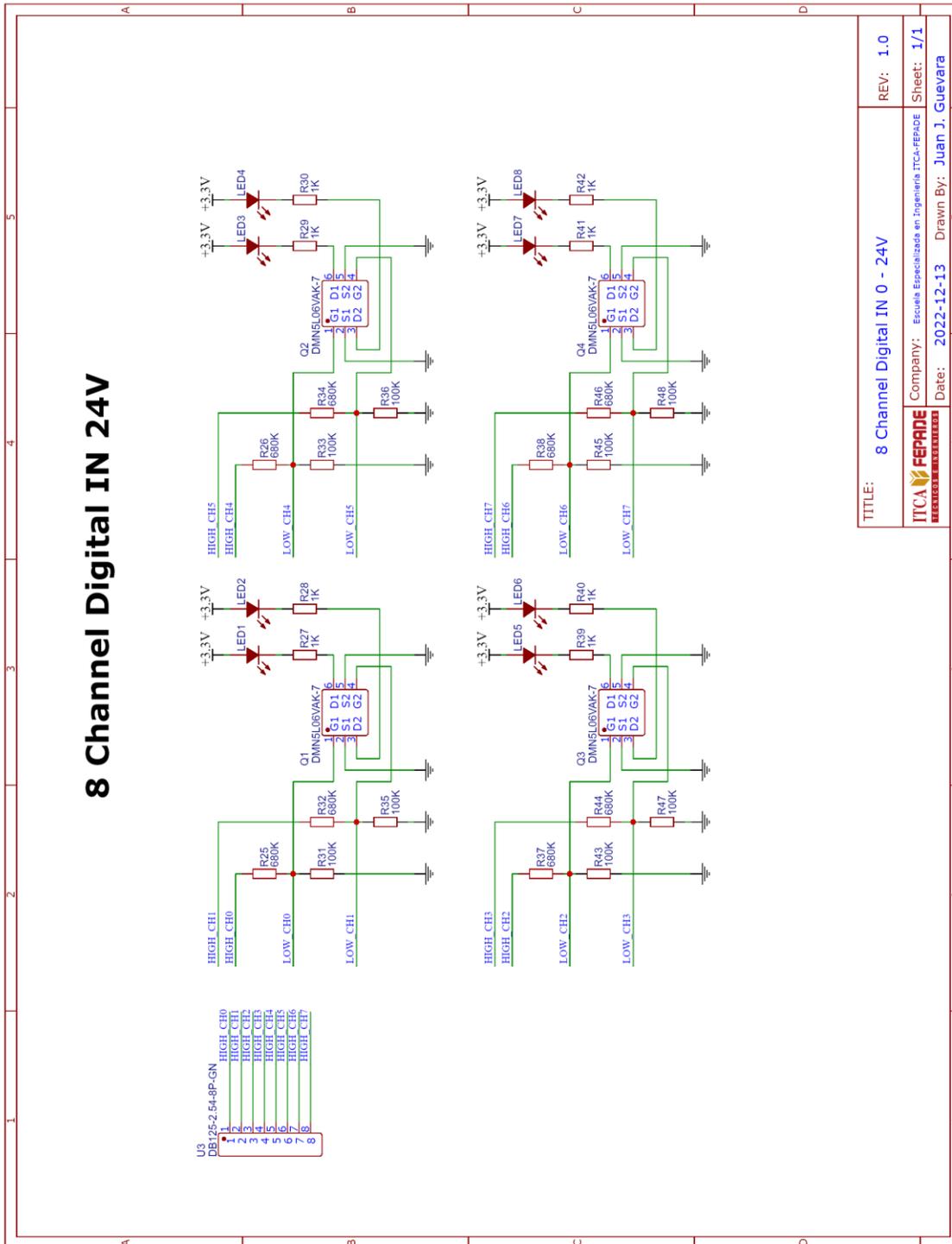
12.4 ANEXO 4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE LA VÁLVULA PROPORCIONAL BURKERT TYPE 1094



12.5 ANEXO 5. DISEÑO DEL PCB DEL CIRCUITO DE CONTROL DE LA VÁLVULA PROPORCIONAL

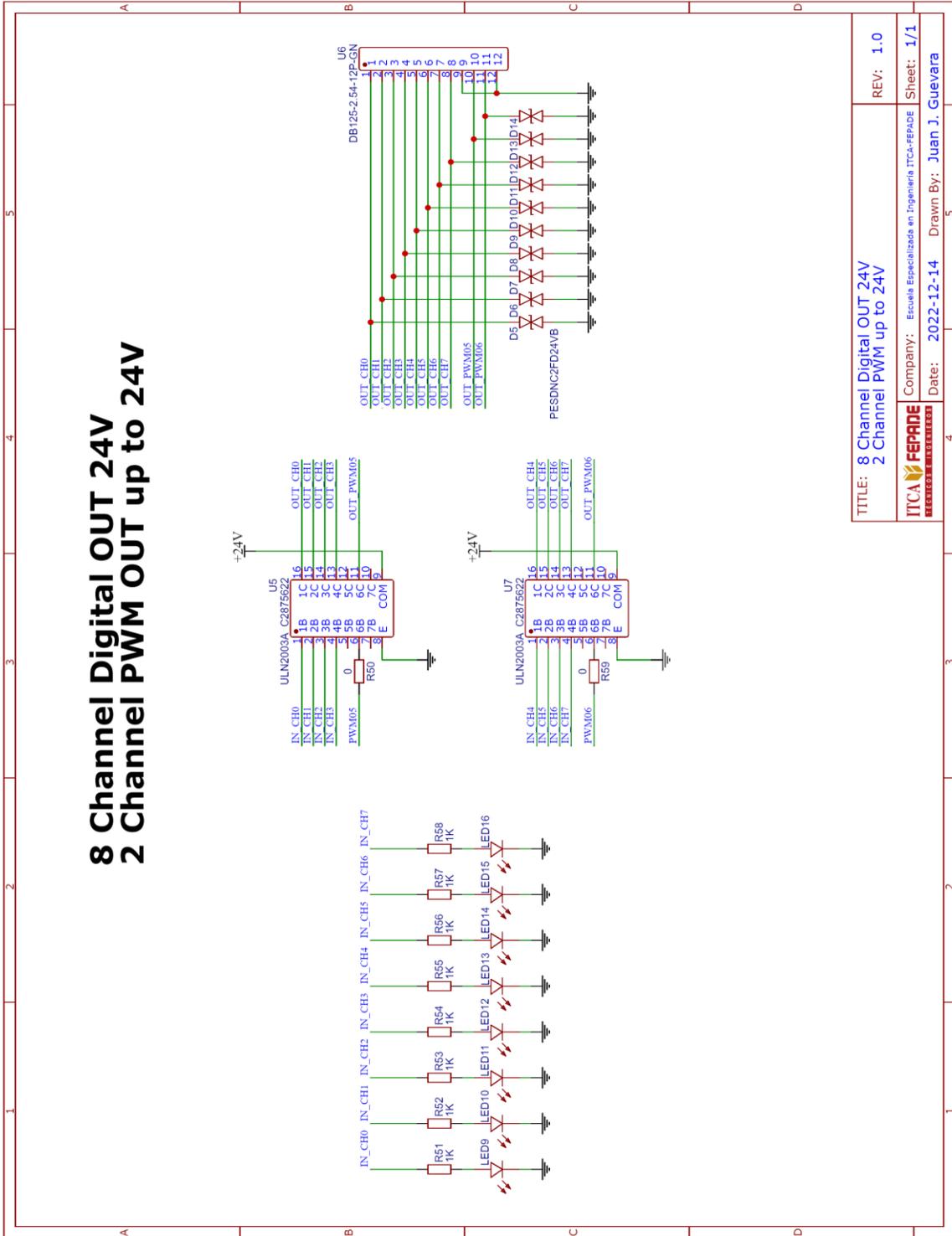


12.7 ANEXO 7. CIRCUITO DE ESCALAMIENTO DE ENTRADAS DIGITALES



12.8 ANEXO 8. CIRCUITO DE SALIDA DIGITAL 7 PWM DE 8 + 2 CANALES

8 Channel Digital OUT 24V 2 Channel PWM OUT up to 24V



TITLE: 8 Channel Digital OUT 24V
2 Channel PWM up to 24V

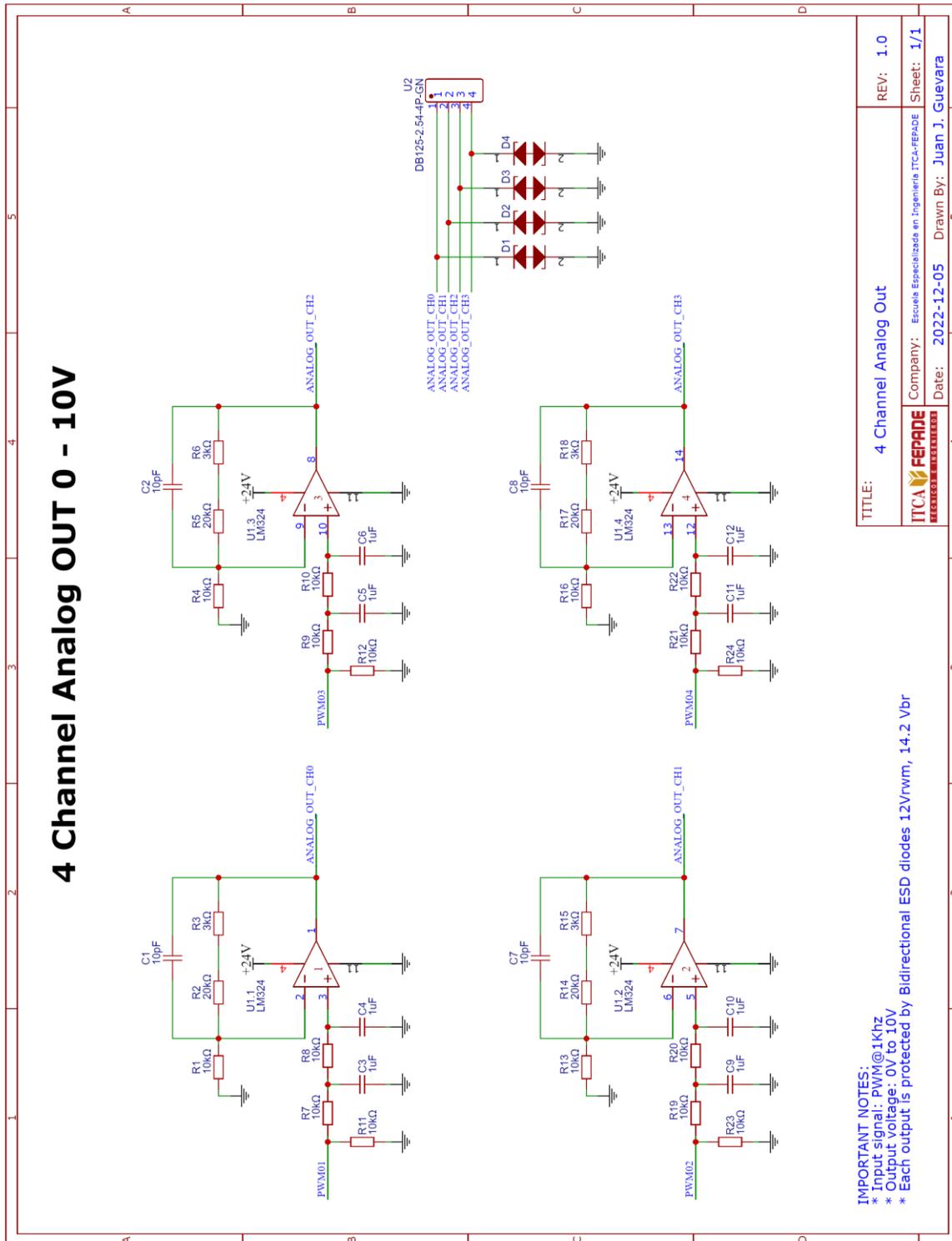
REV: 1.0

Sheet: 1/1

Company: Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE

Date: 2022-12-14 Drawn By: Juan J. Guevara

12.9 ANEXO 9. CIRCUITO DE SALIDAS ANALÓGICAS DE CUATRO CANALES



12.10 ANEXO 10. MATRIZ PARA DEFINICIÓN DE PRIVILEGIOS DE USUARIOS DE LA PLATAFORMA DE TELEINGENIERÍA

Privilegios	Administrador	Estudiante	Docente
<i>Horarios</i>	X	X	X
<i>Control de acciones</i>	X		X
<i>Manejo de usuarios</i>	X		
<i>Usuarios</i>	X		
<i>Ajustes</i>	X		
<i>Entrenador FPC</i>	X	X	X
<i>Controlador de Flujo y Nivel</i>	X	X	X
<i>Ajustes de perfil</i>	X		X

SEDE CENTRAL Y CENTROS REGIONALES EL SALVADOR



La Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, fundada en 1969, es una institución estatal con administración privada, conformada actualmente por 5 campus: Sede Central Santa Tecla y cuatro centros regionales ubicados en Santa Ana, San Miguel, Zacatecoluca y La Unión.

1. SEDE CENTRAL SANTA TECLA

Km. 11.5 carretera a Santa Tecla, La libertad.
Tel.: (503) 2132-7400

2. CENTRO REGIONAL SANTA ANA

Final 10a. Av. Sur, Finca Procavia.
Tel.: (503) 2440-4348

3. CENTRO REGIONAL ZACATECOLUCA

Km. 64.5, desvío Hacienda El Nilo sobre autopista a Zacatecoluca.
Tel.: (503) 2334-0763 y 2334-0768

4. CENTRO REGIONAL SAN MIGUEL

Km. 140 carretera a Santa Rosa de Lima.
Tel.: (503) 2669-2298

5. CENTRO REGIONAL LA UNIÓN

Calle Sta. María, Col. Belén, atrás del Instituto Nacional de La Unión
Tel.: (503) 2668-4700

www.itca.edu.sv



ISBN: xxx-xxxx-xx-xx-x (Impreso)
ISBN: xxx-xxxx-xx-xx-x (E-book)