



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias  
Instrumentación y Control Automático

**EL USO DE GEMELOS DIGITALES Y REALIDAD VIRTUAL COMO  
ACTUALIZACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL MANUAL  
TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

**Miguel Angel Cuba Morán**

Dirigido por:

**Dr. Gonzalo Macias Bobadilla**

**Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz**

Centro Universitario  
Querétaro, QRO  
México.  
Noviembre 2024

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

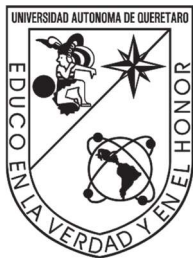
### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.







Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias  
Instrumentación y Control Automático

**EL USO DE GEMELOS DIGITALES Y REALIDAD VIRTUAL COMO ACTUALIZACIÓN  
DE SISTEMAS DE CONTROL MANUAL**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Instrumentación y Control Automático

**Presenta**

Ing. Miguel Angel Cuba Morán

**Dirigido por**

Dr. Gonzalo Macias Bobadilla

**SINODALES**

Dr. Gonzalo Macias Bobadilla  
**Presidente**

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz  
**Secretario**

Dr. Andras Takacs  
**Vocal**

Dr. Aldo Amaro Reyes  
**Suplente**

Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez  
**Suplente**

Centro Universitario  
Querétaro, QRO  
México.  
Noviembre 2024



© 2024 – Miguel Angel Cuba Morán  
All rights reserved.





*Esta tesis está dedicada a mi familia a los que están y también a quienes ya han partido*



# Agradecimientos

*A mi familia por su apoyo y amor incondicional.*

*A mis amigos que han estado para mí en esta etapa ayudándome a sobrellevar  
estar lejos de los míos.*

*A los miembros del sínodo por su paciencia y apoyo durante la elaboración de  
este trabajo.*

*Al profesorado y personal administrativo de la Universidad Autónoma de  
Querétaro*

*A CONAHCYT y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo  
otorgado para realizar estos estudios.*



# **Abstract**

The production of ethanol from sugarcane is critical for sustainable development in Mexico and the adoption of biofuels. This research evaluates the impact of implementing a virtual platform based on digital twins and virtual reality for an ethanol distillation machine, aiming to reduce on-site supervision time and dependency by 20%. The platform integrates remote monitoring, IoT, non-relational databases, and simulators in virtual environments. It seeks to optimize processes, reduce greenhouse gas emissions, enhance ethanol production efficiency, and create quality job opportunities for specialized professionals in rural areas. Through a systematic approach, a digital twin of the distillation machine was developed, and a comparative evaluation demonstrated the feasibility of the proposed objectives. This supports the transition towards Industry 4.0 in the ethanol sector, promoting energy and technological sustainability in Mexico.



# Resumen

La producción de etanol a partir de caña de azúcar es clave para el desarrollo sostenible en México y la adopción de biocombustibles. Esta investigación evalúa el impacto de implementar una plataforma virtual basada en gemelos digitales y realidad virtual para una máquina destiladora de etanol, con el objetivo de reducir en un 20% el tiempo y la dependencia de supervisión en sitio. La plataforma integrará monitoreo remoto, IoT, bases de datos no relacionales y simuladores en entornos virtuales. Se busca optimizar procesos, reducir emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la eficiencia en la producción de etanol y promover empleos de calidad para profesionistas especializados en zonas rurales. A través de un enfoque sistémico, se desarrolló un gemelo digital de la máquina destiladora y se realizó una evaluación comparativa que demostró la viabilidad de los objetivos propuestos. Esto fomenta la transición hacia la Industria 4.0 en el sector del etanol, apoyando la sostenibilidad energética y tecnológica en México.





# Índice general

Agradecimientos	I
Abstract	III
Resumen	V
Contents	VII
Índice de Tablas	IX
Índice de Figuras	IX
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos particulares .....	2
1.3. Justificación .....	3
1.4. Hipótesis .....	3
1.5. Problemática .....	4
2. Antecedentes .....	5
2.1. Industria 4.0.....	6
2.2. Internet de las Cosas (IoT) .....	7
2.3. Instrumentación virtual .....	7
2.4. Control PID.....	8
2.5. SCADA .....	10
2.6. Gemelos Digitales .....	12
2.7. Industria 5.0.....	14
2.8. Realidad Virtual .....	14

<b>2.9.</b>	<b>Estado del arte.....</b>	<b>15</b>
<b>2.10.</b>	<b>Principales referencias en la literatura .....</b>	<b>16</b>
<b>2.11.</b>	<b>Tabla de patentes .....</b>	<b>21</b>
<b>2.12.</b>	<b>Equipo para estudio de producción de bioetanol .....</b>	<b>23</b>
<b>2.13.</b>	<b>Medidas de seguridad para el uso del destilador del equipo BT-BE-050/EL .....</b>	<b>25</b>
<b>3.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.</b>	<b>Diseño de la Plataforma MO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.</b>	<b>Implementación de la actualización de la máquina .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.</b>	<b>Aplicación de tecnología IoT a la máquina.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.</b>	<b>Implementación de base de datos al sistema actualizado .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.</b>	<b>Diseño del Gemelo Digital de la máquina .....</b>	<b>48</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>51</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusión.....</b>	<b>53</b>
<b>6.</b>	<b>Productos Generados .....</b>	<b>54</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>55</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Cuadro de referencias de las investigaciones y publicaciones más relevantes.....	17
Tabla 2. Patentes relacionadas con la investigación (Elaboración propia).....	21

## Índice de figuras

Figura 1. Arquitectura de un instrumento virtual [9].....	8
Figura 2. Control proporcional [11]. .....	8
Figura 3. Control integral [11]. .....	9
Figura 4. Control derivativo [11]. .....	9
Figura 5. Diagrama de bloques de controlador PID [10].....	9
Figura 6. Arquitectura SCADA. ....	11
Figura 7. Gráfica con las estadísticas respecto a las investigaciones con las palabras clave "virtual instrumentation" (Elaboración propia).....	19
Figura 8. Gráfica con las estadísticas respecto a las investigaciones con las palabras clave "digital twins" (Elaboración propia).....	20
Figura 9. Gráfica con las estadísticas respecto a las investigaciones con las palabras clave "extended reality" (Elaboración propia).....	20
Figura 10. Diagrama de funcionamiento de BT-BE-050/EL [25].....	23
Figura 11. Diagrama de flujo para la destilación de etanol en una columna de lote empaquetado.....	24
Figura 12. Metodología seguida para el desarrollo de la tesis.....	30
Figura 13. Arquitectura de la plataforma implementada.....	32
Figura 14. Diagrama eléctrico para el monitoreo de temperatura. ....	33
Figura 15. Pruebas de lectura.....	35
Figura 16. Diseño de PCB.....	36
Figura 17. Diagrama de bloques del control de la temperatura.....	38
Figura 18. Descripción del árbol de archivos de la App Web. ....	41
Figura 19. Página de inicio de la App Web. ....	42
Figura 20. Monitoreo y control de temperatura.....	43
Figura 21. Página base de datos. ....	44
Figura 22. Generar Reporte. ....	44
Figura 23. Página preguntas frecuentes. ....	45
Figura 24. Conexión de PCB. ....	46

<b>Figura 25. Prueba de PCB en la destiladora.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 26. Gráfico de temperaturas en la plataforma Web. ....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 27. Revisión de la base de datos. ....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 28. Vistas del gemelo digital en SolidWorks.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 29. Render del área de reflujo.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 30. Comparación de resultados control de temperatura. ....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 31. Comparación de resultados Reducción de tiempo a pie de máquina. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 32. Artículo Publicado en el CONIIN 2023.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 33. Patente pendiente de registro.....</b>	<b>54</b>

# 1. Introducción

La producción de etanol a partir de la caña de azúcar en México es una actividad de suma importancia para el impulso del desarrollo sostenible y la adopción de biocombustibles en el país. En este contexto, la implementación de tecnologías emergentes, como los gemelos digitales y la realidad virtual, representa una oportunidad única para optimizar los procesos de producción y mejorar la eficiencia en la industria del etanol. El objetivo general de esta tesis es evaluar el impacto de generar e implementar una plataforma virtual para una máquina destiladora de etanol mediante la generación de gemelos digitales y realidad virtual. Se busca reducir el tiempo y la dependencia de personal de supervisión en sitio en un 20%, lo que permitiría una mejora significativa en la eficiencia y productividad de la producción de etanol.

Dada la creciente demanda de etanol y su reconocimiento como fuente de energía limpia y sostenible, es imperativo enfocarse en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en mejorar la calidad del aire. Además, se busca abordar la problemática de la falta de empleo para profesionistas especializados en México, brindándoles oportunidades laborales de calidad mediante el acceso remoto a la plataforma virtual propuesta. La implementación de la plataforma virtual, que integra gemelos digitales y un simulador de operación para la máquina destiladora de etanol, no solo promoverá la optimización del proceso de producción, sino que también contribuirá a la formación de profesionales especializados en este campo. Esto permitirá aumentar la capacidad de producción en las destilerías existentes y fomentar la inversión en nuevas instalaciones y tecnologías para la producción de etanol.

La metodología adoptada en este estudio busca un abordaje sistémico y estructurado, que facilite no solo la comprensión profunda de la problemática actual, sino también la integración efectiva de soluciones tecnológicas en el campo de la destilación de etanol. Iniciamos con una revisión bibliográfica exhaustiva que nos permitió entender el panorama actual de la instrumentación virtual, los gemelos digitales y la realidad extendida. Esta etapa fue crucial para cimentar la base teórica del estudio y para identificar posibles áreas de oportunidad y desafíos en la integración de estas tecnologías en el sector del etanol.

Con esta fundamentación, el enfoque se dirigió hacia la máquina destiladora, evaluando el sistema de control y supervisión actual para identificar sus limitaciones y posibles mejoras. A partir de este análisis, establecimos un marco de necesidades y requisitos que deberían ser satisfechos. Posteriormente, seleccionamos las tecnologías más adecuadas para la actualización y las integramos en una solución cohesiva, desarrollando un gemelo digital en un entorno de realidad virtual, y un simulador de operación. El aspecto crítico de esta investigación fue la integración efectiva del control de la máquina con el gemelo digital y el simulador, permitiéndonos comparar tiempos y dependencia de supervisión antes y después de la implementación. Finalmente, contrastamos los resultados con indicadores preestablecidos, con el fin de evaluar el grado en que se alcanzó la reducción propuesta del 20% en tiempos y dependencia del personal de supervisión.

## **1.1. Objetivo general**

Evaluar el impacto y la fidelidad del sistema al generar e implementar una plataforma virtual para una máquina destiladora de etanol mediante la generación de Gemelos Digitales y Realidad Virtual. Con el fin de reducir el tiempo y dependencia de personal de supervisión en sitio en un 20%.

## **1.2. Objetivos particulares**

- 1.2.1.* Diseño de una plataforma MO (Monitoreo y Operación) para la máquina destiladora de etanol.
- 1.2.2.* Desarrollar una plataforma MO en la máquina destiladora de etanol mediante una tarjeta de adquisición (Raspberry pi 3b).
- 1.2.3.* Implementar tecnología IoT a la máquina destiladora de etanol en AWS (Amazon Web Services).
- 1.2.4.* Diseñar una base de datos para la plataforma desarrollada mediante Bases de Datos no Correlacionales (MongoDB).
- 1.2.5.* Generar un gemelo digital con realidad virtual con comunicación bidireccional entre la máquina destiladora de etanol y el sistema desarrollado.
- 1.2.6.* Realizar una evaluación comparativa del antes y después demostrando que se obtiene al menos un 20% en la reducción de tiempo de monitoreo y operación.

### **1.3. Justificación**

La implementación de tecnologías emergentes, como los gemelos digitales y la realidad virtual en el campo de la producción de etanol a partir de la caña de azúcar en México, ha representado una oportunidad única para impulsar el desarrollo sostenible y la adopción de biocombustibles en el país. La justificación de esta tesis radica en la necesidad de aumentar la producción de etanol y su uso como fuente de energía limpia y renovable, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la calidad del aire.

En otro sentido también se busca facilitar más empleos para profesionistas especializados en México. Muchos de estos profesionistas no han tenido acceso a oportunidades laborales adecuadas debido a la falta de recursos económicos para trasladarse a las grandes ciudades donde el campo industrial está más desarrollado. La plataforma propuesta en la investigación permitiría que estos profesionistas pudieran trabajar desde casa y tener acceso a oportunidades laborales de calidad.

El desarrollo de una plataforma virtual que integra el gemelo digital y un simulador de operación para la máquina de destilación de etanol BT-BE-050/EL, promueve la optimización del proceso de producción y la formación de profesionales especializados en este campo. Esto permitiría aumentar la capacidad de producción en las destilerías ya existentes y, al mismo tiempo, fomentar la inversión en nuevas instalaciones y tecnologías para la producción de etanol.

Asimismo, la adopción de mezclas de bioetanol en el sector del transporte es esencial para lograr una transición hacia una economía baja en carbono. En pocas palabras, la justificación de esta tesis se centra en la promoción de la producción de etanol y la adopción de biocombustibles en México mediante la implementación de tecnologías innovadoras como gemelos digitales y realidad virtual. Esto conlleva a no solo mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también contribuir al desarrollo tecnológico, científico y económico del país.

### **1.4. Hipótesis**

La implementación de una plataforma virtual para una máquina destiladora de etanol, apoyada en la generación de gemelos digitales y realidad virtual, contribuirá a la mejora de operación y supervisión del sistema en su simulación; reduciendo el tiempo y la dependencia de personal en sitio en un 20%.

## **1.5. Problemática**

La máquina destiladora de etanol cuenta con un sistema de control manual, el cual se encuentra desfasado en comparación con las tecnologías de la Industria 4.0. Esto limita la capacidad de aprovechar al máximo el potencial de las herramientas y metodologías actuales. Además, la falta de actualización del sistema de control dificulta la generación de conocimientos en el marco de la Industria 5.0, ya que se pierde la oportunidad de explorar el uso de tecnologías avanzadas en este ámbito. Por lo tanto, surge la necesidad de formular e implementar una actualización del sistema de control que aproveche las oportunidades que ofrece la Industria 4.0 y contribuya a mejorar la operación y la generación de conocimientos en la Industria 5.0.

Se ha observado que, aunque varios alumnos han logrado operar con éxito la máquina destiladora de etanol, esta ofrece únicamente una visión general del proceso de destilado. Sin embargo, se desaprovecha la posibilidad de adquirir información más detallada. En este contexto, tanto profesores como estudiantes pueden realizar solamente algunos cálculos y tratar de comprender cómo se comporta el sistema de la máquina cuando se presentan diferentes entradas.

Además, se ha identificado que los accidentes tienen altas probabilidades de ocurrir durante el proceso de capacitación de nuevos usuarios en la operación de la máquina. Los fallos que se han presentado en la máquina han ocasionado períodos de inactividad. La implementación de un sistema de control actualizado basado en las tecnologías de la Industria 4.0 podría mejorar la seguridad en el proceso de capacitación y reducir el tiempo de inactividad debido a fallas en la máquina.



## 2. Antecedentes

En esta sección se abordan varios temas relacionados con la implementación de tecnologías en la industria del etanol en México:

- **Industria 4.0:** Representa la cuarta revolución industrial, donde la tecnología digital transforma los procesos industriales. En el contexto de esta tesis, se explora cómo tanto la implementación de tecnologías de la Industria 4.0, así como los Gemelos digitales y la Realidad virtual, pueden mejorar la eficiencia y productividad en la producción de etanol. La aplicación de estas tecnologías permite una monitorización y control más precisos de los procesos, así como una toma de decisiones más informada.
- **IoT (Internet de las cosas):** Se refiere a la interconexión de objetos físicos mediante sensores y dispositivos conectados a internet. En esta tesis, se considera la relevancia del IoT para el monitoreo y control en tiempo real de los procesos industriales en la producción de etanol. La implementación del IoT permite una recopilación de datos más precisa y continua, lo que facilita el análisis y la optimización de los procesos.
- **Instrumentación virtual:** Se basa en la simulación de instrumentos y dispositivos de medición mediante software. En la destilación de etanol, la instrumentación virtual permite realizar pruebas y simulaciones virtuales, lo que ayuda a optimizar los procesos y mejorar la calidad del producto. La aplicación de la instrumentación virtual en esta tesis se centra en la visualización y análisis de datos para una toma de decisiones más efectiva.
- **SCADA:** Es un sistema de control y adquisición de datos utilizado en la automatización industrial. En esta tesis, se considera la relevancia del SCADA para la supervisión y control de los procesos de destilación de etanol. La implementación del SCADA proporciona una visualización en tiempo real de los datos operativos y facilita el control y la optimización de los procesos.
- **Gemelos digitales:** Son réplicas virtuales de productos, procesos o sistemas físicos. En esta tesis, se explora cómo los Gemelos digitales pueden utilizarse para mejorar la eficiencia y la toma de decisiones en la destilación de etanol. La creación de un gemelo digital de la máquina destiladora permite realizar simulaciones y análisis virtuales, lo que facilita la identificación de mejoras y la optimización de los procesos de producción.
- **Realidad virtual extendida:** Se menciona brevemente la realidad virtual extendida, que incluye tanto la Realidad virtual (VR) como la Realidad aumentada (AR) y la Realidad mixta (MR). En esta tesis, se explorará el uso de estas tecnologías en la industria del etanol para evaluar cómo pueden mejorar los sistemas de control manual y optimizar los procesos de producción. La Realidad virtual extendida permite una visualización inmersiva y una interacción intuitiva con los datos y los sistemas, lo que puede mejorar la eficiencia y la precisión de las operaciones.

## 2.1. Industria 4.0

Desde su introducción en 2011, diversos autores han intentado conceptualizar la Industria 4.0. Sin embargo, hasta la fecha, no ha habido consenso en su definición. Esta falta de consenso dificulta la realización de estudios académicos sobre el tema y ha llevado a la errónea suposición de que la Industria 4.0 abarca casi todas las tecnologías. Con el fin de aclarar esta cuestión, se ha llevado a cabo una revisión de algunas de las investigaciones más relevantes que proporcionan descripciones de la Industria 4.0. A partir de estas descripciones, se ha identificado un conjunto de tecnologías que permiten su implementación [1]. A continuación, se presentan de manera cronológica estas descripciones:

- 2.1.1. La Industria 4.0, también conocida como la cuarta etapa de la industrialización, representa una evolución tecnológica en el ámbito de la fabricación, impulsada por sistemas ciber físicos, el Internet de las Cosas y servicios [2].
- 2.1.2. La Industria 4.0 engloba un amplio conjunto de conceptos actuales que no pueden ser clasificados de forma precisa en una disciplina específica. Los conceptos fundamentales incluyen la fábrica inteligente, los sistemas ciber físicos, la autoorganización, los nuevos sistemas de distribución y adquisición, la adaptación a las necesidades humanas y la responsabilidad social corporativa [3].
- 2.1.3. El término Industria 4.0 se refiere a la cuarta revolución industrial y se entiende comúnmente como la aplicación del concepto genérico de sistemas ciber físicos a los sistemas de producción industrial, es decir, sistemas de producción ciber físicos [4].
- 2.1.4. La Industria 4.0 se basa en los principios de interconexión (colaboración entre objetos físicos y humanos), transparencia de la información (disponibilidad de datos digitales del mundo físico y su aprovechamiento a través del análisis), decisiones descentralizadas (facilitadas por los sistemas ciber físicos) y asistencia técnica [5].
- 2.1.5. La Industria 4.0 representa la tendencia actual de las tecnologías de automatización en la industria manufacturera y engloba principalmente tecnologías habilitadoras como los sistemas ciber físicos, el IoT y la computación en la nube. Estas tecnologías permiten una mayor integración y coordinación entre los diferentes componentes de un sistema de producción, lo que conduce a una mayor eficiencia y flexibilidad en la producción [6].

Desde una perspectiva puramente tecnológica, estas descripciones revelan que, en un nivel fundamental, la Industria 4.0 se caracteriza por la convergencia de los conceptos de IoT y los sistemas ciber físicos. El IoT se centra en la interconexión de objetos físicos, posibilitando su comunicación y colaboración. En este sentido, las tecnologías de comunicación inalámbrica pueden considerarse habilitadoras de este concepto. Por otro lado, los sistemas ciber físicos son integraciones de objetos físicos, tecnología en la nube y algoritmos, que permiten el análisis y control de procesos físicos.

Desde el punto de vista de la implementación, según la perspectiva de la Industria 4.0, esta puede llevarse a cabo en organizaciones a través de una combinación de integraciones horizontales y verticales, así como de la integración de la ingeniería desde el inicio hasta el final a lo largo de toda

la cadena de valor. La integración horizontal se refiere a la cooperación de los sistemas de tecnología de la información (TI) en diferentes etapas de la cadena de valor, así como su colaboración con los sistemas de TI de otras empresas [1].

## **2.2. Internet de las Cosas (IoT)**

La arquitectura principal del Internet de las Cosas (IoT) está compuesta por componentes clave, incluyendo la nube, el borde y las terminales distribuidas en ubicaciones diversas. La nube proporciona almacenamiento en red y una amplia capacidad de cálculo para la plataforma centralizada de control. Permite el acceso y procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT.

El borde proporciona recursos de cálculo distribuidos y heterogéneos en estaciones base o en proximidad a los entornos industriales en diferentes ubicaciones. Esta arquitectura descentralizada alivia la carga de trabajo en la nube y permite un control distribuido y rápido en el borde, mejorando así la eficiencia y la capacidad de respuesta del sistema.

Las terminales son dispositivos que reciben necesidades y tareas asignadas por la plataforma de IoT. Durante su funcionamiento, envían continuamente datos a la nube y al borde, y mantienen una interacción dinámica y en tiempo real con los recursos de cálculo de ambos. Estas terminales realizan diversas tareas, como cálculos, comunicación, fabricación y logística [7], [8].

## **2.3. Instrumentación virtual**

La instrumentación virtual es una tecnología que combina elementos comerciales, como computadoras, software flexible y una variedad de dispositivos de medición y control. Este enfoque permite a ingenieros y científicos desarrollar sistemas personalizados que se ajusten a sus necesidades específicas. Al utilizar la instrumentación virtual, se logra una reducción en el tiempo de desarrollo, se diseñan productos de mayor calidad y se disminuyen los costos asociados.

A través de esta tecnología, se han desarrollado diversos instrumentos de recopilación de datos diseñados específicamente para operar y controlar sistemas computarizados, lo cual ha dado origen al campo conocido como "Instrumentación Virtual" [9].

Un instrumento virtual se compone de los siguientes bloques:

Módulo sensor:

- Interfaz de sensores.
- Interfaz de sistemas de información.

Módulo de procesamiento:

- Interfaz de base de datos.
- Interfaz de usuario.

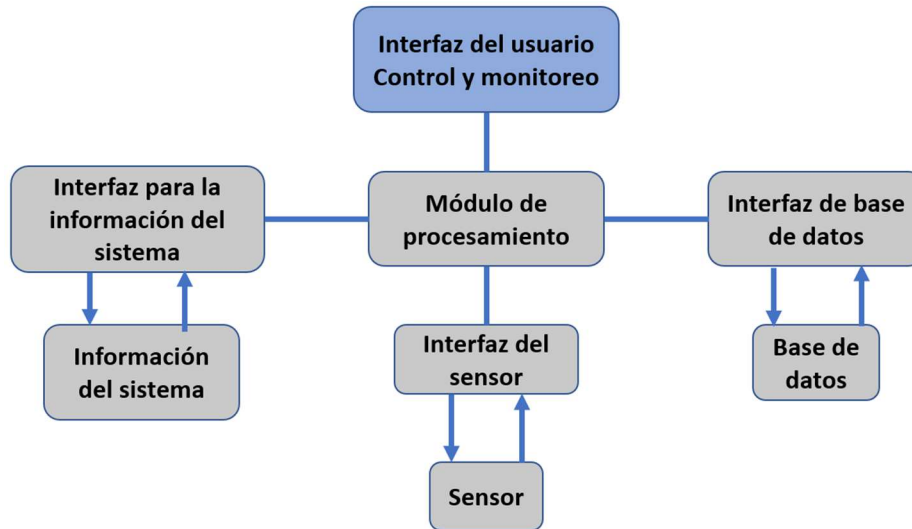


Figura 1. Arquitectura de un instrumento virtual [9].

La Figura 1 presenta la arquitectura general de un instrumento virtual, donde el sensor detecta una señal física y la convierte en una señal eléctrica, la cual es acondicionada y transformada en formato digital para su posterior manipulación. A través de una interfaz de sensor, se establece la comunicación con una computadora. Una vez que los datos se encuentran en formato digital en la computadora, pueden ser procesados, combinados, comparados, manipulados o almacenados en una base de datos. Posteriormente, los datos pueden ser visualizados o convertidos nuevamente a formato analógico para un mayor control del proceso. Es común que los instrumentos virtuales se integren con otros sistemas de información existentes tales como sistemas de gestión empresarial, sistemas de control de calidad, sistemas de monitoreo en tiempo real y sistemas de automatización de procesos industriales [9].

## 2.4. Control PID

El control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un tipo de controlador de retroalimentación utilizado ampliamente en sistemas de control industrial [10].

- Proporcional (P): La acción proporcional responde al valor actual del error (la diferencia entre el valor deseado y el valor medido). Si el error es grande, la salida del controlador proporcional también será grande. La constante que define cuánto es esa salida en relación con el error es la ganancia proporcional  $K_p$ , la Figura 2 muestra la acción de un controlador proporcional ante un cambio abrupto en un error constante.

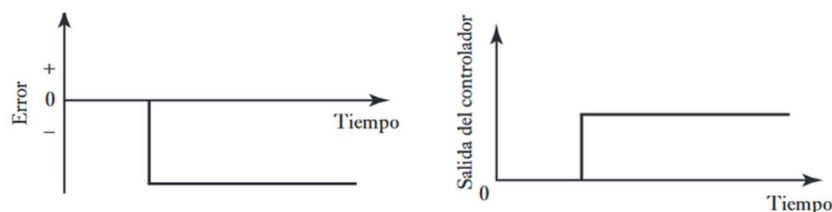


Figura 2. Control proporcional [11].

- Integral (I): La acción integral responde a la acumulación de errores pasados. Si un error ha estado presente por un período de tiempo extendido, crecerá debido a la acción integral. Esto ayuda a eliminar el error constante que no puede ser corregido por la acción proporcional sola. La constante integral es  $K_i$ . La Figura 3 ilustra la acción de un controlador integral cuando hay una señal de error constante como entrada al controlador.

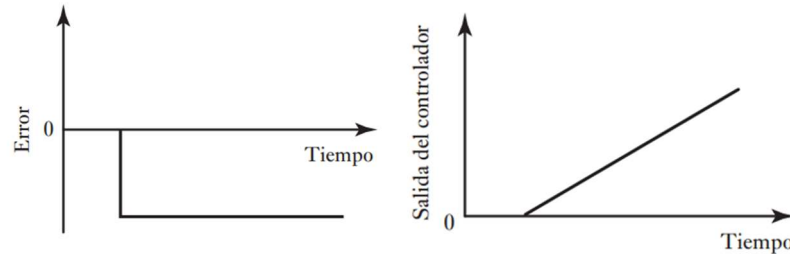


Figura 3. Control integral [11].

- Derivativo (D): La acción derivativa es una predicción del error futuro basada en su tasa de cambio. Proporciona un control anticipativo. Su efecto es más notorio cuando el error está cambiando rápidamente. La constante derivativa es  $K_d$ , la Figura 4 muestra la salida que produce el controlador cuando la rapidez con que cambia la señal de error en el tiempo es constante.

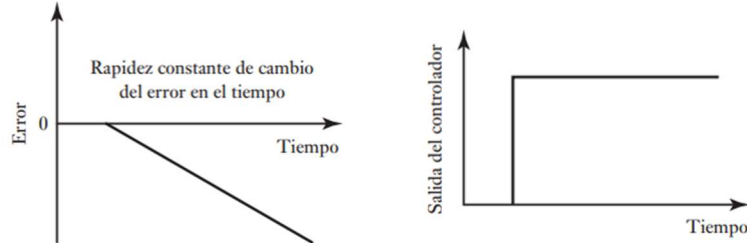


Figura 4. Control derivativo [11].

Es esencial representar y comprender la interacción entre el controlador y el sistema que se busca controlar. Una herramienta visual fundamental para ello es el diagrama de bloques. En la Figura 5, se presenta el diagrama de bloques de un controlador PID en un proceso operando en lazo cerrado.

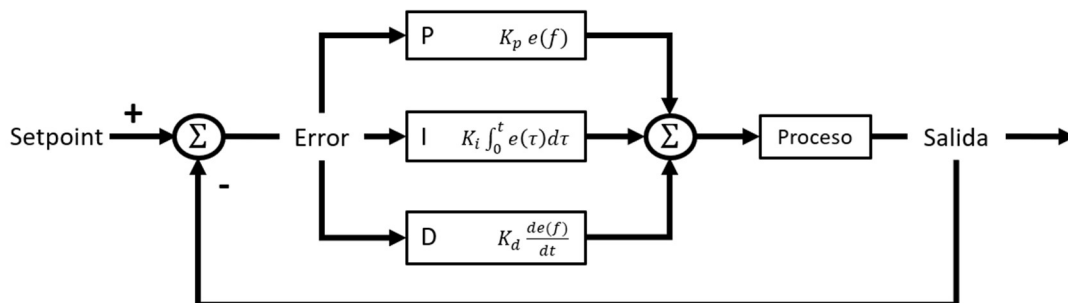


Figura 5. Diagrama de bloques de controlador PID [10].

Con el auge de Python como herramienta en ingeniería y ciencia, existen librerías que facilitan la implementación de PID en entornos simulados o reales. Se puede implementar un controlador PID utilizando la librería “simple\_pid” en Python [12].

### Implementación Básica:

---

```
from simple_pid import PID

# Crear el controlador PID
# PID (Kp, Ki, Kd, setpoint)
pid = PID (1, 0.1, 0.01, setpoint=0)

# Por defecto, el controlador PID genera valores entre -1 y 1. Esto se puede
cambiar con:
pid.output_limits = (min_output, max_output)

# Simulación de un sistema
for _ in range(100):
    # Valor de medición aleatorio
    value = ... # Obtener el valor actual del proceso
    control = pid(value) # Obtener el valor de control usando PID
    ... # Aplicar el valor de control al sistema
```

---

**Ajuste de Parámetros:** La sintonización de los parámetros es esencial para el correcto desempeño del controlador. Las herramientas y métodos de sintonización son variados y algunos pueden incluir criterios de oscilación, respuesta en frecuencia, entre otros [12].

## 2.5. SCADA

El sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) está integrado por componentes de hardware y software que permiten la supervisión y control de sistemas. Los componentes de hardware incluyen Unidades Terminales Remotas (RTU), Unidad Terminal Maestra (MTU), actuadores y sensores, mientras que el software incluye la Interfaz Hombre-Máquina (HMI), una base de datos central (Historiador) y otros programas de usuario.

Estos componentes trabajan en conjunto para establecer una interfaz de comunicación entre el hardware y el software. La arquitectura física del sistema se conecta a los actuadores y sensores, los cuales están vinculados a las RTU encargadas de recopilar y enviar datos de telemetría a la MTU para su observación y control, esta arquitectura se representa en la Figura 6, la cual muestra la interrelación de los componentes del sistema [13].

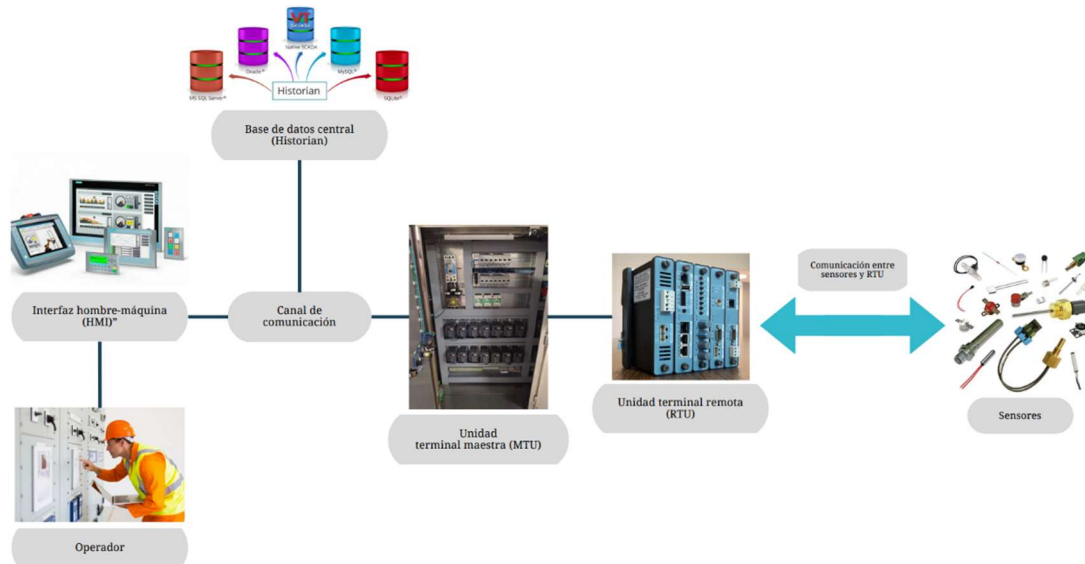


Figura 6. Arquitectura SCADA.

La RTU es responsable de recolectar datos en tiempo real de los sensores conectados al entorno físico a través de una red LAN/WAN. Además de las RTU, se utilizan controladores lógicos programables (PLC) y dispositivos electrónicos inteligentes para interconectar los sensores y actuadores mediante módulos de entrada y salida.

La MTU funciona como la estación central de monitoreo, encargada de controlar y comandar las RTU a través de los enlaces de comunicación. También procesa y almacena los mensajes enviados por las RTU para su posterior comunicación. La HMI proporciona una interfaz de comunicación entre el hardware SCADA y los componentes de software. Su función es controlar la información operativa del SCADA, como el monitoreo, control y comunicación entre las RTU y la MTU, presentando la información de manera comprensible a través de texto, estadísticas y otros formatos.

El Historiador se utiliza para almacenar datos, eventos y alarmas de comunicación bidireccional entre el centro de control SCADA. Se trata de una base de datos centralizada o un servidor ubicado en un lugar remoto. La HMI consulta el Historiador para generar tendencias gráficas. La red de comunicación proporciona los servicios de comunicación entre los distintos componentes del sistema SCADA. Puede ser inalámbrica o cableada, siendo más comúnmente utilizadas las redes inalámbricas debido a su capacidad para interconectar áreas geográficamente dispersas y zonas de difícil acceso.

La integración de IoT en SCADA requiere la incorporación de dispositivos y protocolos en el sistema existente. El IoT también ha mejorado la resiliencia de los sistemas SCADA al identificar comportamientos anómalos mediante técnicas basadas en datos. La programación del tiempo de inactividad en la integración continua representa un desafío, pero mediante el mantenimiento predictivo es posible reducir estos tiempos de inactividad [13].

## 2.6. Gemelos Digitales

Los Gemelos Digitales han surgido como una herramienta fundamental, al proporcionar una representación digital precisa de entidades físicas, permitiendo análisis en tiempo real y simulaciones detalladas, esto impulsa la innovación y conlleva a una mejor toma de decisiones. Un Gemelo Digital es una réplica digital de una entidad física existente que permite la simulación, el monitoreo en tiempo real y el análisis exhaustivo [14]. Su singularidad se basa en los componentes elementales y los componentes imperativos que definen su estructura. Además, posee propiedades inherentes que lo distinguen como una herramienta integral en diversos dominios de aplicación. Para proporcionar una definición holística de los gemelos digitales, los componentes elementales e imperativos de un Gemelo Digital se definen de la siguiente manera [15], [16]:

### 2.6.1. Componentes Elementales:

Los componentes elementales son fundamentales para la existencia de un Gemelo Digital. Estos se definen como sigue:

- 2.5.1.1. Activo físico: Representa la entidad física o un ciclo de vida del producto que se desea modelar y analizar.
- 2.5.1.2. Activo digital: Corresponde al componente virtual del Gemelo Digital, que replica el activo físico en un entorno digital.
- 2.5.1.3. Flujo de información: Este componente establece la comunicación entre el activo físico y el activo digital, ya sea en forma unidireccional o bidireccional.

### 2.6.2. Componentes Imperativos:

Los componentes imperativos amplían las funcionalidades del Gemelo Digital, convirtiéndolo en una herramienta integral de simulación, monitoreo en tiempo real y análisis. La inclusión de estos componentes es crucial y depende del dominio y la aplicación específica del Gemelo Digital. Los más relevantes son:

- 2.5.2.1. Dispositivos IoT: Permiten recopilar información de sensores presentes en los subcomponentes del activo físico y en los dispositivos de borde. Requiere una conexión precisa y oportuna entre los dispositivos IoT para garantizar un flujo de información fidedigno.
- 2.5.2.2. Datos: Se recopilan de diferentes componentes y software de IoT, y son necesarios para monitorear el sistema, garantizar su correcto funcionamiento y proporcionar información al sistema de aprendizaje automático.
- 2.5.2.3. Aprendizaje automático: Se utiliza para realizar predicciones, obtener retroalimentación y desarrollar estrategias de mitigación efectivas en circunstancias excepcionales. Requiere una función de optimización conjunta para los subcomponentes del Gemelo Digital.



- 2.5.2.4. Seguridad del flujo de datos e información: Garantiza la seguridad y confidencialidad de los datos e información compartidos entre los diversos componentes del Gemelo Digital, por lo que se requieren protocolos de seguridad, autenticación y mecanismos de autorización.
- 2.5.2.5. Evaluación del desempeño del Gemelo Digital: Es necesario establecer métricas de evaluación como la precisión, la resiliencia, la robustez y los costos, con el objetivo de garantizar que el Gemelo Digital funcione de manera óptima y efectiva en su conjunto.

### 2.6.3. Propiedades del Gemelo Digital:

El conjunto de propiedades del Gemelo Digital lo distingue como una herramienta más allá de una simple réplica digital. Estas propiedades inherentes se incorporan en diferentes grados según la aplicación principal y pueden implicar costos adicionales. Las propiedades relevantes son:

- 2.5.3.1. Auto evolución: El Gemelo Digital tiene la capacidad de aprender y adaptarse en tiempo real, proporcionando retroalimentación tanto al activo físico a través de intervención humana como al propio Gemelo Digital [17].
- 2.5.3.2. Dependencia de dominio: El Gemelo Digital puede proporcionar servicios específicos para un dominio particular, priorizando los aspectos relevantes a la industria en cuestión. Esto asegura una adaptación precisa y especializada según las necesidades del activo físico.
- 2.5.3.3. Autonomía: La autonomía del Gemelo Digital varía según los componentes presentes en él. Algunas partes pueden ser autónomas o parcialmente autónomas, lo que implica la capacidad de realizar cambios en el activo físico o en el propio Gemelo Digital bajo el control humano [18].
- 2.5.3.4. Sincronización: La sincronización de datos puede ser continua o en intervalos de tiempo específicos, dependiendo de la tecnología utilizada, los recursos disponibles, la necesidad de los datos y el tipo de algoritmo de aprendizaje automático aplicado. Algunos subcomponentes del Gemelo Digital pueden sincronizarse continuamente, mientras que otros lo hacen basados en eventos específicos.
- 2.5.3.5. Fidelidad: Se refiere al grado en el que este modelo digital reproduce fielmente el estado y comportamiento de su contraparte real o sistema físico. Esta fidelidad es esencial para garantizar que el gemelo digital sea una representación precisa y confiable del sistema real. En la medición se utilizan "*snapshots*", que capturan y especifican los objetos, relaciones y valores específicos en un instante determinado. Estos *snapshots* se generan periódicamente y se almacenan para su análisis. La comparación de estos mismos y entre el gemelo digital y el sistema real permite determinar la fidelidad [19].

## **2.7. Industria 5.0**

La Industria 5.0, también conocida como quinta industria, se caracteriza por la integración de tecnologías avanzadas, como el análisis de grandes volúmenes de datos y la inteligencia artificial, en los procesos de fabricación. Esta integración busca mejorar la eficiencia y la productividad mediante la colaboración entre seres humanos y robots en el ámbito manufacturero. No obstante, dentro de este contexto, surgen desafíos que requieren ser identificados y abordados de manera efectiva para asegurar el éxito de los avances en esta industria. Ya que un aspecto fundamental es el desarrollo de habilidades y competencias por parte de los trabajadores ya que la interacción con robots avanzados exige que los trabajadores adquieran conocimientos especializados en cuanto a la colaboración con máquinas inteligentes y los fabricantes de robots [20].

Además de las habilidades interpersonales necesarias, también se plantea la necesidad de adquirir habilidades técnicas, tales como la programación de robots industriales y la gestión de las nuevas tareas emergentes en este entorno. Estas actividades demandan un alto nivel de competencia técnica. La adopción de tecnologías avanzadas implica una inversión significativa de tiempo y esfuerzo por parte de los trabajadores. La implementación de fábricas conectadas, mediante la utilización de software personalizado, robótica colaborativa, inteligencia artificial, información en tiempo real y el Internet de las cosas, resulta crucial en el marco de la Industria 5.0.

Las empresas enfrentan dificultades para actualizar sus líneas de producción y adoptar la Industria 5.0 debido a los costos asociados. Sin embargo, resulta imperativo contar con máquinas inteligentes y empleados altamente capacitados con el fin de incrementar la productividad y la eficiencia en este nuevo paradigma industrial. Por otra parte, la seguridad se erige como un desafío crucial en el contexto de la Industria 5.0, es fundamental establecer una confianza sólida en los ecosistemas que conforman esta industria. La autenticación empleada en este ámbito debe ser escalable para interactuar con diversos dispositivos y estar preparada para futuras aplicaciones de computación cuántica, a fin de implementar nodos de IoT [21].

El uso de inteligencia artificial y automatización en la Industria 5.0 también plantea amenazas para las empresas, lo que implica la necesidad de contar con una seguridad confiable. Dado que las aplicaciones de la Industria 5.0 se centran en sistemas de tecnologías de la información y comunicación (TIC), se requiere el cumplimiento de rigurosos requisitos de seguridad con el propósito de evitar vulnerabilidades en el sistema [22].

## **2.8. Realidad Virtual**

La tecnología VR ha surgido como un paradigma innovador que respalda y mejora la industria 4.0 en una amplia gama de entornos. La adopción de estas tecnologías por parte de la industria 4.0 ha permitido difundir este entorno revolucionario. En diversos campos de aplicación y actividades, se han propuesto soluciones heterogéneas que emplean tecnologías de realidad virtual. Aunque existen diferencias en las propuestas, los artículos de investigación han reportado ventajas y beneficios similares. Por ejemplo, se ha observado un alto rendimiento en tareas humanas y en la colaboración entre humanos y robots, así como índices de alta calidad para productos específicos.

Un enfoque de investigación se ha centrado en el diseño e implementación de un método para sistemas mecatrónicos conectados a una red de IoT, que utiliza la AR para establecer un vínculo entre un programa de simulación en el dominio cibernético y los brazos robóticos en el dominio físico, con el objetivo de planificar trayectorias de herramientas. Además, se ha propuesto un método de programación de taller basado en un gemelo digital, que permite una programación precisa y en tiempo real [23].

En este contexto, la realidad virtual se utiliza para crear un puente entre el espacio virtual y el espacio real. Se emplean tecnologías como la identificación por radiofrecuencia, redes de sensores inalámbricos, instrumentos inteligentes y diversos sensores para recopilar datos y monitorear los talleres de producción.

En el ámbito de dispositivos IoT, es necesario establecer una conexión inalámbrica a una red, visualizar datos en tiempo real y acceder a la configuración. Para abordar este desafío, se ha propuesto una arquitectura que utiliza AR para visualizar información en tiempo real desde dispositivos IoT sin necesidad de agregar hardware específico. Esta arquitectura incluye una capa de seguridad que bloquea el acceso de usuarios no autorizados.

Además, se ha desarrollado un sistema de computación cognitiva adaptativa y sensible al contexto, con el objetivo de optimizar el ahorro de energía. Este sistema permite la visualización de información interactiva bidireccional junto con tecnologías habilitadas para IoT. Los usuarios tienen la capacidad de controlar dispositivos remotos en cualquier momento y lugar. Además, se ha implementado un sistema de localización en tiempo real y se han utilizado sensores para mejorar la seguridad de los trabajadores en la industria de la construcción.

La VR está experimentando una creciente adopción en nuestra vida profesional, especialmente con la llegada de la industria 4.0. Estas aplicaciones disruptivas resuelven necesidades específicas, como la capacitación segura de los trabajadores en el uso de máquinas de soldar y el diseño de nuevos productos mediante herramientas interactivas e inmersivas. Estas aplicaciones también han demostrado ser capaces de reducir los tiempos y costos asociados a diversas tareas industriales [24].

## **2.9. Estado del arte**

En el ámbito de la producción de etanol y la mejora de la competitividad industrial en México, se han realizado diversas investigaciones relacionadas con la instrumentación virtual, Gemelos Digitales, realidad extendida y tecnologías disponibles para actualizar los sistemas de control de las máquinas destiladoras. Estos antecedentes son relevantes para el desarrollo del presente proyecto y proporcionan un marco de referencia para comprender su contexto y objetivos. En la literatura, se han abordado diferentes temas relacionados con la instrumentación virtual. Por ejemplo, se ha desarrollado un método eficiente para simular y calibrar modelos de columnas de destilación, lo cual es relevante para diseñar sistemas de control y estrategias operativas óptimas en destilaciones discontinuas en columna empacitada.

Asimismo, se ha aplicado una herramienta de instrumentación virtual, el sistema SCADA, en máquinas para el procesamiento térmico de materiales. La tecnología VR es otra área de investigación que se ha explorado. Se ha propuesto un sistema basado en realidad aumentada para el mantenimiento adaptativo de equipos de fabricación bajo pedido. Además, se ha brindado una descripción breve pero precisa de la Industria 4.0 y su relación con la realidad aumentada. Estos estudios demuestran la aplicación de tecnologías avanzadas en el ámbito industrial. En cuanto a los gemelos digitales, se han realizado investigaciones relevantes. Por ejemplo, se ha utilizado un gemelo digital para actualizar controladores de retroalimentación en sistemas de control de movimiento de sistemas dinámicos no lineales. También, se ha presentado el estado del arte y los desafíos en los gemelos digitales, resaltando sus ventajas en el entorno industrial.

En relación con la actualización del sistema de control de la máquina destiladora, se han examinado investigaciones relevantes. Se ha desarrollado un sistema de control en tiempo real utilizando tecnologías SCADA y PLC para mejorar el rendimiento de los sistemas de señalización y control de trenes en vías del metro.

También, se ha realizado una revisión sistemática de la literatura sobre la integración de la Industria 4.0 y *Lean Six Sigma*, enfocándose en las barreras y habilitadores de dicha integración [1]. En resumen, en el campo de la producción de etanol y la mejora de la competitividad industrial en México, se han realizado investigaciones relevantes sobre la instrumentación virtual, gemelos digitales, realidad extendida y tecnologías para la actualización del sistema de control de máquinas destiladoras. Estos estudios proporcionan un marco de referencia para el presente proyecto, el cual busca desarrollar una plataforma personalizada que integre estas tecnologías con el objetivo de mejorar la eficiencia y competitividad de la industria del etanol.

## **2.10. Principales referencias en la literatura**

La presente tesis tiene como objetivo principal abordar la necesidad de mejorar la competitividad de la industria en México mediante la actualización del sistema de control de la máquina destiladora de etanol. En este sentido, se han considerado diversos antecedentes relevantes para el desarrollo de este proyecto, incluyendo el estado actual de la instrumentación virtual, los gemelos digitales, la realidad extendida y las tecnologías disponibles para la actualización del sistema de control de la máquina destiladora.

Asimismo, se han analizado las ventajas y desventajas de implementar estas tecnologías, así como los requerimientos técnicos necesarios para la implementación de la solución propuesta. La Tabla 1 presenta un resumen de todos estos antecedentes, proporcionando un marco de referencia para la comprensión de esta investigación.

Tabla 1. Cuadro de referencias de las investigaciones y publicaciones más relevantes.

Autor	Año	Titulo	Descripción
N. P. Ishu Tomar Indu Sreedevi	2023	<i>“Real time control system for metro railways using plc and scada”</i>	El sistema garantiza una operación confiable al recuperarse tras cortes de energía, es adaptable con la incorporación de más dispositivos, y simplifica el mantenimiento mediante prácticas predictivas y evaluación de calidad energética.
S. J. E. Yoav Vered	2023	<i>“The use of digital twins to remotely update feedback controllers for the motion control of nonlinear dynamic systems”</i>	Presentaron información sobre el uso de gemelos. El gemelo digital, a diferencia del controlador de retroalimentación, puede operar de forma remota, a alta velocidad y ajustar la zona muerta en tiempo real, para mantener la estabilidad en cambios de holgura.
P.-C. Díaz-Quezada David I. Wilson	2022	<i>“Modeling and simulation of a packed column batch still for fruit wine distillations”</i>	Su modelo de pérdida de calor mejoró significativamente las predicciones de las concentraciones de etanol destilado y las temperaturas del agua de salida.
A. S. S.-A. S. Diego Patiño Wilson Tafur	2022	<i>“Supervisory control and data acquisition system for machines used for thermal processing of materials”</i>	Desarrollaron un sistema SCADA para la automatización de tres máquinas diferentes para el procesamiento térmico de materiales de una estación de trabajo, utilizaron solo un PLC y HMI, destacan la escalabilidad del sistema mediante la adición de HMI y módulos extras.
J. Angelopoulos and D. Mourtzis	2022	<i>“An intelligent product service system for adaptive maintenance of engineered-to-order manufacturing equipment assisted by augmented reality”</i>	Diseñaron un sistema inteligente de mantenimiento adaptable asistido por realidad aumentada. Las escenas AR se crearon utilizando los archivos CAD del equipo. En cuanto al módulo AR y sus funcionalidades, se utilizó el motor de juego Unity 3DTM. Se utilizó C# para los scripts relacionados con el funcionamiento de la aplicación móvil. Requirió de una base de datos en la nube.

L. R. Liyuanjun KLai Lin Zhang and L. Wang.,	2022	<i>“Overview on intelligent scheduling models and methods for industrial internet-of-things”</i>	La investigación actual sobre programación inteligente para el entorno industrial de internet solo considera tareas con un tiempo de ejecución fijo y supone que las tareas no se pueden dividir.
M. M. A. R. Morteza Ghobakhloo; Mohammad Iranmanesh; Muhammad Faraz Mubarak and M. Nilashiu	2022	<i>“Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development: A strategy roadmap for delivering sustainability values”</i>	La Industria 5.0 promoverá el desarrollo sostenible, también amplía y redefine funciones como comunicación en tiempo real y monitoreo de procesos, aunque no son exclusivas, mejorando su calidad y alcance. Desarrollaron un mapa estratégico para explicar cómo la Industria 5.0 fomenta un desarrollo sostenible y socioambiental.
A.-T. C.-M. Cordero- Guridi Cuautle- Gutiérrez	2022	<i>“Design and development of a i4.0 engineering education laboratory with virtual and digital technologies based on iso/iec tr 23842-1 standard guidelines”</i>	Se desarrolló un laboratorio de VR/AR. Para facilitar la adquisición de conocimientos en el área automotriz. Superaron dificultades como falta de orientación de cómo funcionan las tecnologías, presupuesto limitado y renuencia a cambiar las prácticas pedagógicas tradicionales.
Amr Adel	2022	<i>“Future of industry 5.0 in society: Human-centric solutions, challenges and prospective research areas”</i>	Se deben adoptar fábricas personalizadas conectadas a software, robótica colaborativa, inteligencia artificial, información en tiempo real e Internet de las cosas. La seguridad es un desafío para la Industria 5.0.
Y. Jun Xiaojing	2012	<i>“Development and application of virtual instrumentation platform based on labview”</i>	Las aplicaciones de LabVIEW se implementan en muchas industrias en todo el mundo, las principales son prueba y medición, control de procesos, automatización de fábricas, la investigación y el análisis.
P. S. S. Sumathi	2007	<i>“LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems”</i>	Discuten la historia y evolución de la instrumentación virtual y el uso de LabVIEW para desarrollar instrumentos virtuales.

En este estudio se realizaron cuatro gráficas que muestran el número de investigaciones relacionadas con palabras clave relevantes para esta investigación. Estas gráficas se obtuvieron utilizando Scopus, una base de datos de investigación que abarca revistas científicas, libros y conferencias.

En la Figura 7, se representa el número de investigaciones desde 2007 hasta el año actual utilizando la palabra clave "*virtual instrumentation*". Se observa que el pico más alto de investigaciones ocurrió en 2011, con un total de 432 investigaciones. Sin embargo, a partir de ese año, el número de investigaciones disminuyó, posiblemente debido a cambios en las prioridades de investigación en este tema.



Figura 7. Gráfica con las estadísticas respecto a las investigaciones con las palabras clave "*virtual instrumentation*" (Elaboración propia).

En la Figura 8, se muestra el número de investigaciones a partir de 2012 hasta el año actual utilizando la palabra clave "*digital twins*". En 2012, se registraron 73 investigaciones, y en los años siguientes hasta 2015, el número se mantuvo alrededor de esa cifra, llegando a 84 investigaciones en 2015. A partir de 2016, se observa un incremento notable, alcanzando 136 investigaciones en ese año. Desde entonces, el número de investigaciones ha experimentado un crecimiento progresivo, superando las 4000 investigaciones en 2022. Este aumento puede atribuirse a una mayor prioridad y financiamiento de las investigaciones en este tema en los últimos años.



Figura 8. Gráfica con las estadísticas respecto a las investigaciones con las palabras clave "*digital twins*" (Elaboración propia).

La Figura 9 muestra el número de investigaciones desde 2010 hasta 2022 utilizando la palabra clave "*extended reality*". Entre 2010 y 2017, el número de investigaciones se mantuvo en un rango de 240 a 360 por año. A partir de 2018, hubo un incremento significativo, llegando a 430 investigaciones en ese año y alcanzando 917 investigaciones en 2022.

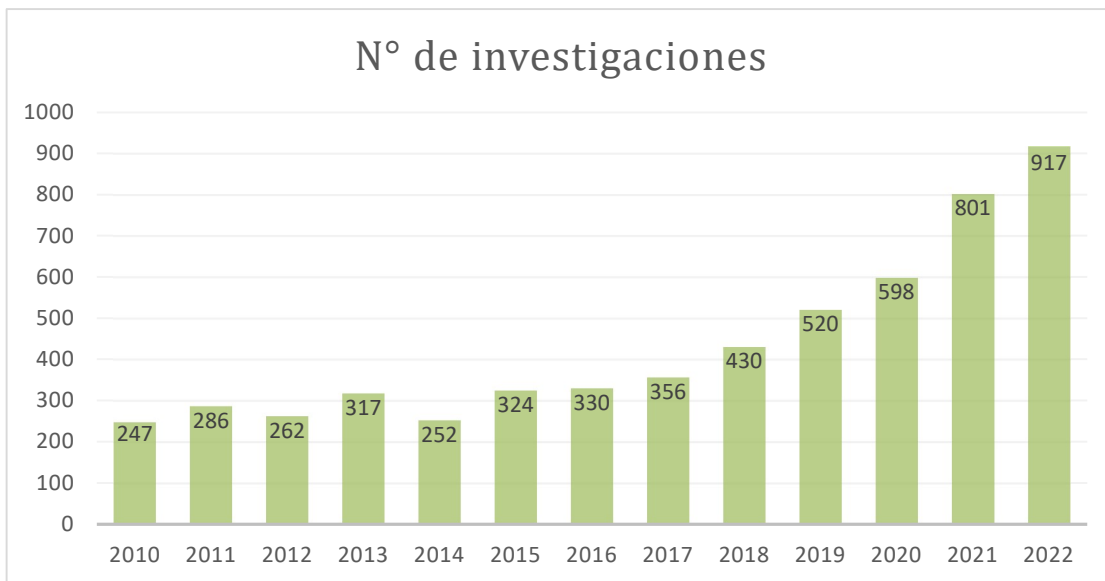


Figura 9. Gráfica con las estadísticas respecto a las investigaciones con las palabras clave "*extended reality*" (Elaboración propia).



## 2.11. Tabla de patentes

La presente tesis se sitúa en el campo de la instrumentación virtual, los gemelos digitales, la realidad extendida y la inteligencia artificial, centrándose en el desarrollo de una plataforma personalizada para la industria con el objetivo de incrementar su competitividad a nivel nacional e internacional. Para alcanzar este propósito, se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión de diversas patentes relacionadas con estos campos, las cuales se presentan en la tabla de patentes de la Tabla 2. Estos antecedentes desempeñaron un papel fundamental en el diseño y desarrollo de la plataforma, que tiene como meta principal innovar en la manera en que se lleva a cabo el mantenimiento y monitoreo de las máquinas industriales.

Tabla 2. Patentes relacionadas con la investigación (Elaboración propia).

<b>Año</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Descripción</b>
2022	Qiaochu Tang, Micah Price, Jason Hoover, Geoffre Dagley and Stephen Wylie	<i>Visual inspection support using extended reality</i>	Este dispositivo utiliza la realidad extendida para capturar y mostrar vídeo de un objeto en un campo de visión. Utiliza un modelo de aprendizaje automático para identificar el objeto y sus partes. Además, utiliza información de seguimiento posicional para ubicar el objeto en un espacio de coordenadas y muestra un flujo de trabajo de elementos de contenido para examinar el objeto con la realidad aumentada. El dispositivo también puede renderizar contenido digital relacionado con este flujo de trabajo.
2019	Joseph G. Berti and Lisa Seacat DeLuca	<i>Digital twin management in IoT systems</i>	Este sistema permite la gestión de activos digitales relacionados con activos físicos en entornos IoT. Un gemelo digital se crea para el activo físico, se rastrea y modifica a lo largo del tiempo, y se mantiene en un registro digital con un identificador único y datos de ubicación de almacenamiento. Se acopla una etiqueta física al activo físico y se escanea para realizar operaciones de lectura y escritura con el gemelo digital. El gemelo digital puede ser trasladado a un nuevo dispositivo de almacenamiento en la nube y semantiene un acceso consistente a través de un registro.
2018	Krupa Srivastava, Mark Lazarus, Rajendra T. Prasad, Koushik Vijayaraghavan, Bhaskar Ghosh, Mohan Sekhar, Robin L. Natri and Arpan Chucla	<i>End-to-end Project man-agement platform with ar tificial intelligence integration</i>	Incluye la identificación de software necesario, el análisis y la especificación de requisitos, el diseño, la programación, las pruebas y el mantenimiento del código. La gestión de proyectos de software incluye la participación de usuarios finales, la comunicación con clientes, usuarios y desarrolladores de software, la fijación de objetivos del proyecto, la estimación precisa de los recursos y la especificación de requisitos del sistema.

2014	Frank Szemkus	<i>SCADA unit</i>	Un sistema SCADA para su instalación en unidades de turbina eólica. Esta unidad incluye una unidad de control de turbina, para controlar los recursos energéticos descentralizados, para mejorar su integración en los procesos empresariales de los interesados y para que tenga la capacidad de adaptarse de manera flexible a diferentes sistemas, cambios en los deseos de los clientes y también cambios en el hardware.
------	---------------	-------------------	---

## 2.12. Equipo para estudio de producción de bioetanol

El equipo de estudio de producción de bioetanol BT-BE-050/EL se utiliza para una variedad de aplicaciones relacionadas con la producción de bioetanol y otros biocombustibles. Entre estos usos se incluyen la producción de bioetanol, el estudio de procesos de fermentación a diferentes temperaturas y el análisis de los efectos de la variación del pH en un proceso de fermentación.

Además, el equipo es utilizado para investigar los parámetros termodinámicos e hidrodinámicos involucrados en el proceso de producción de bioetanol. En consecuencia, permite la manipulación de las variables de proceso y el desarrollo de expresiones de velocidad empíricas basadas en datos experimentales. El equipo también se emplea para analizar diferentes procesos de transferencia de masa, como las etapas de equilibrio, y estudiar las operaciones unitarias en diversos equipos de proceso.

Otras aplicaciones del equipo incluyen el estudio del efecto de la operación de reflujo en el proceso de destilación, la evaluación de la eficiencia de una columna de destilación, el análisis de los componentes de una columna de destilación, la operación de una columna de rectificación de bioetanol, la determinación de los coeficientes de transferencia de masa en un sistema líquido-vapor, y el estudio del efecto de la presión en la temperatura de ebullición de una mezcla. La Figura 10 muestra un diagrama general de la máquina, brindando una representación visual de sus componentes y funciones. Mientras que la Figura 11 muestra el diagrama de flujo del proceso de destilación utilizado por la máquina [25].

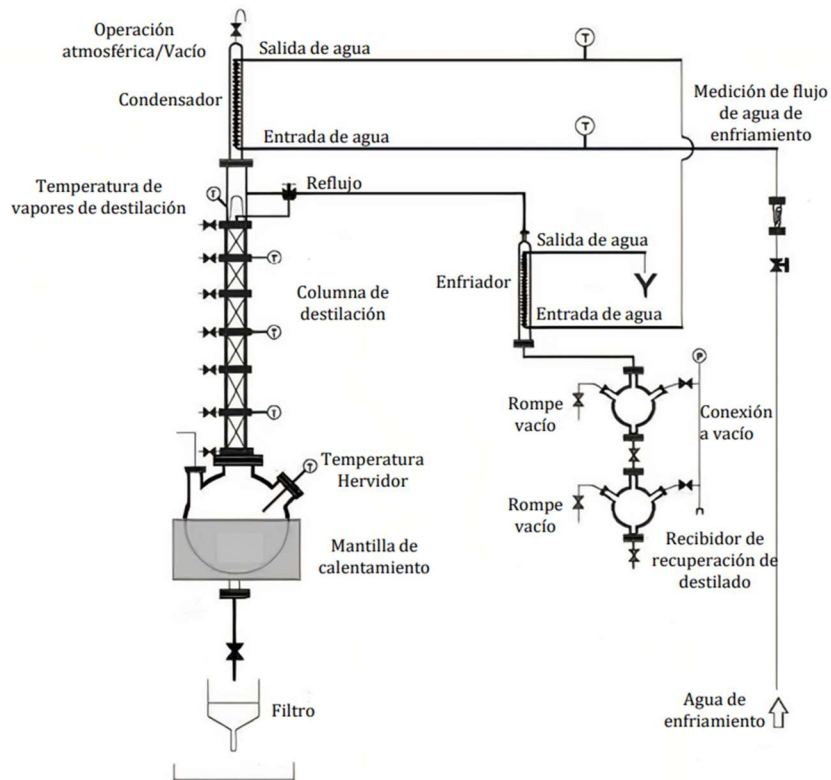


Figura 10. Diagrama de funcionamiento de BT-BE-050/EL [25].

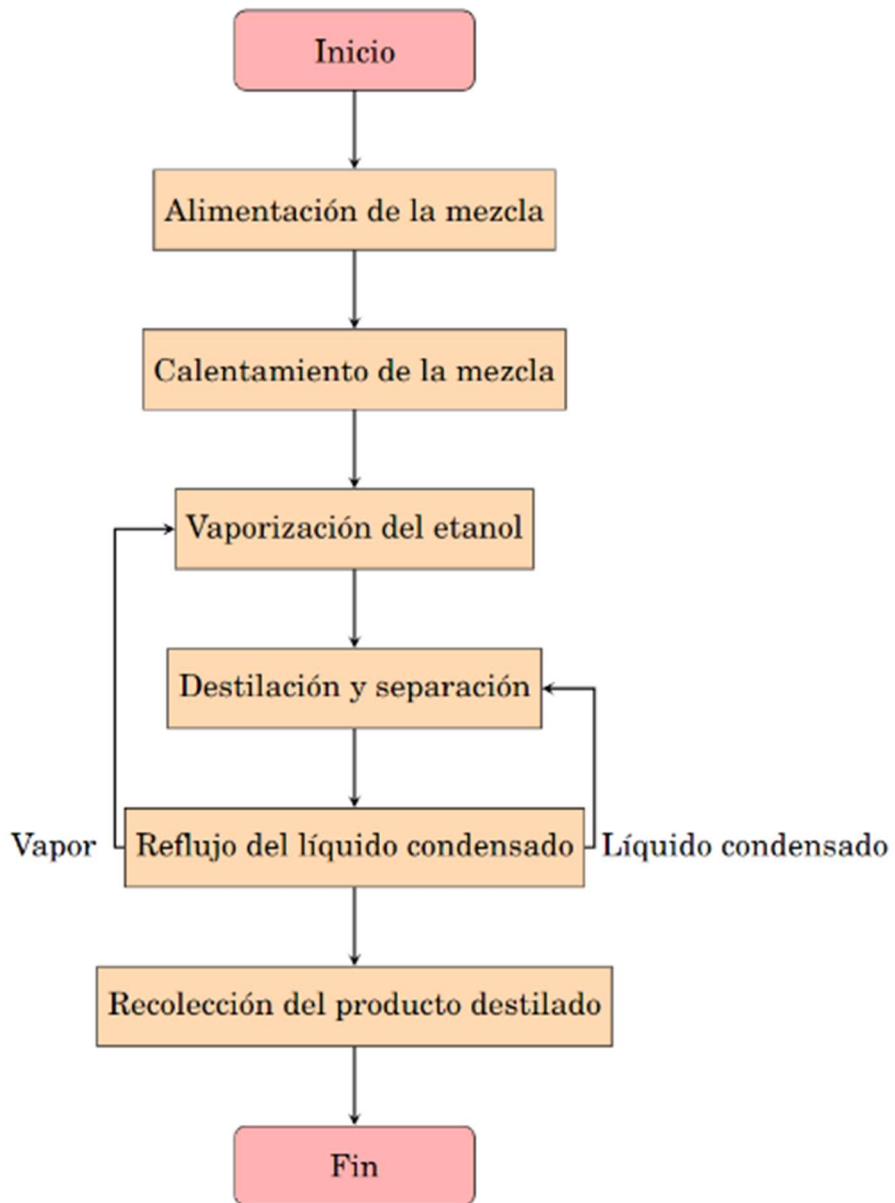


Figura 11. Diagrama de flujo para la destilación de etanol en una columna de lote empacado.

## 2.13. Medidas de seguridad para el uso del destilador del equipo BT-BE-050/EL

Para garantizar la seguridad en la producción de bioetanol utilizando únicamente el destilador del equipo BT-BE-050/EL en México, se deben seguir las normas ISO pertinentes. La implementación de estas normas es esencial para asegurar la gestión de seguridad y salud en el trabajo, la gestión de riesgos y la gestión ambiental. A continuación, se detallan las medidas de seguridad específicas que deben ser adoptadas:

### Implementación de ISO 45001: Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo [26]

- **Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos:** Se realizará una identificación detallada de los peligros asociados con la operación del destilador y una evaluación de los riesgos correspondientes. Esto incluirá la creación de procedimientos estandarizados para mitigar los riesgos identificados en estas operaciones.
- **Riesgos Identificados:**
  - Sobrecarga Térmica: Posible sobrecalentamiento del destilador debido a fallas en el sistema de enfriamiento.
  - Fugas de Productos Químicos: Riesgo de fugas durante el llenado o el vaciado del destilador.
  - Exposición a Vapores: Inhalación de vapores peligrosos, especialmente etanol y otros solventes volátiles.
  - Incendios: Riesgo de incendio debido a la naturaleza inflamable del bioetanol.
  - Fallos Mecánicos: Rotura de componentes del destilador bajo presión o debido a desgaste.
- **Evaluación de Riesgos:**
  - Clasificación de riesgos según su probabilidad y severidad.
  - Implementación de controles como sistemas de ventilación, monitoreo continuo de temperatura y presión, y mantenimiento regular.
  - Uso de detectores de fugas y alarmas para la rápida identificación de fallas.
- **Capacitación del Personal:** Todo el personal involucrado en la operación del destilador debe recibir capacitación específica en seguridad operativa, manejo de productos químicos, uso de equipo de protección personal (EPP) y respuesta a emergencias.
- **Programa de Capacitación:**
  - Realizar sesiones de capacitación inicial y periódica sobre procedimientos operativos y de seguridad.
  - Capacitar al personal en el uso adecuado del EPP, tal como se detalla en las subsecciones de Uso de Equipo de Protección Personal y Ventilación Adecuada.
  - Evaluar el conocimiento del personal mediante simulaciones de emergencias y revisiones teóricas.

## Aplicación de ISO 31000: Gestión de Riesgos [27]

- **Evaluación Sistemática de Riesgos:** Esta norma guiará una evaluación sistemática de los riesgos físicos y químicos asociados con la operación del destilador. Se implementarán medidas de mitigación basadas en la probabilidad y severidad de los riesgos identificados.
- **Proceso de Evaluación de Riesgos:**
  - Realizar auditorías de seguridad cada trimestre para identificar nuevos riesgos o cambios en los riesgos existentes.
  - Utilizar técnicas de análisis de riesgo como el Análisis de Peligros y Operabilidad (HAZOP) para evaluar fallas potenciales en el sistema.
  - Implementar controles de riesgo adicionales, como sensores de temperatura y presión con alarmas, y procedimientos de mantenimiento preventivo.
- **Condiciones de Operación:** Se detallarán las condiciones específicas bajo las cuales se operará el destilador, incluyendo la descripción del ambiente de trabajo y los controles ambientales necesarios.
- **Ambiente de Trabajo:**
  - Mantener la temperatura del área de trabajo entre 18°C y 25°C para evitar sobrecalentamiento del equipo.
  - Proporcionar iluminación adecuada para la operación segura del equipo.
  - Asegurar que el área esté libre de materiales combustibles y obstrucciones.
- **Controles Ambientales:**
  - Instalar extractores de aire en puntos críticos donde se generen vapores peligrosos.
  - Monitorear continuamente la calidad del aire para detectar la presencia de vapores inflamables o tóxicos.
  - Implementar sistemas de alarma que se activen cuando se detecten condiciones fuera de los parámetros seguros.

## Implementación de ISO 14001: Gestión Ambiental [28]

- **Planes de Gestión Ambiental:** Se desarrollarán y aplicarán planes de gestión ambiental enfocados en el manejo de residuos y emisiones derivadas del uso del destilador. Estos planes asegurarán el cumplimiento de la legislación local y la minimización del impacto ambiental.
- **Gestión de Residuos:**
  - Clasificar y segregar los residuos en peligrosos y no peligrosos.
  - Utilizar recipientes etiquetados para el almacenamiento temporal de residuos.
  - Contratar servicios de gestión de residuos certificados para la recolección y disposición final.
- **Control de Emisiones:**
  - Instalar filtros de aire y sistemas de captura para reducir las emisiones al medio ambiente.

- Realizar mediciones periódicas de las emisiones para asegurar el cumplimiento de las normativas ambientales.
- Desarrollar y ensayar planes de contingencia para gestionar cualquier incidente ambiental, como derrames químicos.

## Medidas Específicas de Seguridad

- **Uso de Equipo de Protección Personal (EPP):** Todo el personal involucrado en la operación del destilador debe usar el EPP adecuado en todo momento. Esto incluye gafas de seguridad, guantes resistentes a productos químicos, batas o overoles de laboratorio y calzado cerrado. El uso adecuado del EPP ayuda a prevenir lesiones y protege contra derrames, salpicaduras o exposición a productos químicos peligrosos.
  - **Procedimiento de Uso del EPP:**
    - Inspeccionar el EPP antes de su uso para asegurar que esté en buen estado.
    - Asegurar que el EPP sea usado correctamente durante toda la operación del destilador.
    - Proveer instrucciones claras y visibles sobre el uso del EPP en las áreas de trabajo.
- **Ventilación Adecuada:** El área de trabajo donde se utiliza el destilador debe tener una ventilación adecuada para evitar la acumulación de vapores y gases potencialmente peligrosos. Si es necesario, se utilizarán sistemas de extracción localizada o ventilación general para mantener el aire limpio y seguro.
  - **Sistemas de Ventilación:**
    - Instalar extractores de aire en los puntos donde se genere la mayor cantidad de vapores.
    - Realizar mantenimiento regular de los sistemas de ventilación para asegurar su eficiencia.
    - Monitorear la calidad del aire de forma continua para detectar cualquier problema de ventilación.
- **Manipulación Segura de Productos Químicos:** Durante el proceso de destilación, se utilizarán diversos productos químicos. Es fundamental seguir estrictamente las pautas de seguridad para el manejo, almacenamiento y eliminación de estos productos. Se deben utilizar recipientes adecuados, etiquetarlos correctamente y almacenarlos en áreas designadas y seguras.
  - **Procedimientos de Manipulación:**
    - Utilizar fichas de datos de seguridad (SDS) para todos los productos químicos.
    - Capacitar al personal en la lectura y comprensión de las SDS.
    - Establecer zonas específicas para el almacenamiento seguro de productos químicos.
- **Prevención de Riesgos de Incendio:** Dado que el destilador involucra procesos de destilación, existe un riesgo inherente de incendio. Es crucial contar con extintores de incendios adecuados y funcionales cerca del área de trabajo. Además, se deben establecer y comunicar claramente los procedimientos de respuesta a emergencias, incluyendo rutas de evacuación y puntos de reunión.

- **Medidas de Prevención:**
  - Realizar inspecciones regulares de los equipos de extinción de incendios para asegurar que están en buen estado.
  - Colocar extintores tipo ABC en puntos estratégicos alrededor del destilador.
  - Capacitar al personal en el uso de extintores y procedimientos de evacuación.
- **Procedimientos de Emergencia:** Se deben establecer procedimientos claros y precisos para responder a situaciones de emergencia. Todo el personal debe estar debidamente capacitado en estos procedimientos y conocer los pasos a seguir en caso de una situación de riesgo o emergencia. Esto incluye la evacuación segura del área, el uso correcto del EPP y la comunicación oportuna con los servicios de emergencia.
- **Planes de Respuesta a Emergencias:**
  - Establecer un plan de evacuación con rutas claramente señalizadas y puntos de reunión seguros.
  - Proporcionar al personal números de emergencia y procedimientos para contactar rápidamente a los servicios de emergencia.
  - Designar y capacitar a un equipo de respuesta a emergencias que supervise la ejecución de los planes en caso de incidente.
- **Uso de Extintores y Alarmas:**
  - Colocar extintores de incendios aprobados cerca del destilador y asegurarse de que todos los empleados sepan cómo usarlos.
  - Instalar sistemas de alarma que alerten de inmediato al personal en caso de contingencia química o incendio.
  - Realizar simulacros de emergencia regularmente para asegurar que todo el personal esté familiarizado con los procedimientos de emergencia.

## Condiciones de Operación

- **Ambiente de Trabajo:** El destilador debe ser operado en un ambiente controlado con las condiciones adecuadas de temperatura y humedad para garantizar su correcto funcionamiento y la seguridad del personal.
- **Requisitos del Ambiente de Trabajo:**
  - Mantener la temperatura ambiente entre 18°C y 25°C para evitar sobrecalentamientos.
  - Asegurar una humedad relativa entre 30% y 50% para prevenir problemas con la maquinaria y el manejo de productos químicos.
  - Mantener el área de trabajo libre de obstrucciones y materiales combustibles.
- **Control de Acceso:** Solo el personal autorizado y capacitado debe tener acceso al área de operación del destilador. Se deben implementar medidas de control de acceso para prevenir la entrada no autorizada.
- **Medidas de Control de Acceso:**
  - Utilizar sistemas de identificación, como tarjetas de acceso, para controlar la entrada a la zona del destilador.
  - Mantener registros de todas las personas que ingresan y salen del área de operación.
  - Proporcionar instrucciones claras sobre quién tiene permiso para acceder y en qué condiciones.



- **Supervisión y Monitoreo:** Durante la operación del destilador, debe haber una supervisión constante por parte de personal calificado. Además, se deben utilizar sistemas de monitoreo para detectar cualquier anomalía o condición de riesgo.
  - **Sistemas de Supervisión:**
    - Asignar a un supervisor para cada turno de operación que tenga formación específica en seguridad y operación del destilador.
    - Utilizar cámaras de vigilancia para monitorear áreas críticas durante la operación.
    - Implementar sensores que monitoreen parámetros clave, como temperatura, presión y concentración de vapores, con alertas automáticas si se exceden los límites seguros.
  - **Mantenimiento Preventivo:** El destilador debe someterse a un programa regular de mantenimiento preventivo para asegurar que todas sus partes y sistemas estén en condiciones óptimas de funcionamiento.
    - **Programa de Mantenimiento:**
      - Realizar inspecciones y mantenimiento preventivo cada seis meses, enfocándose en componentes críticos como válvulas, bombas y sensores.
      - Documentar todas las actividades de mantenimiento realizadas y las observaciones de cada inspección.
      - Programar reparaciones y reemplazos de piezas antes de que fallen para prevenir interrupciones en la operación y riesgos de seguridad.

Al adoptar estas medidas y procedimientos detallados, se garantizará una operación segura y eficiente del destilador del equipo BT-BE-050/EL.

### 3. Metodología

En esta sección se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo la investigación, detallando las estrategias y pasos seguidos para lograr los objetivos planteados, en la Figura 12 se puede observar el diagrama de bloques de la metodología utilizada.

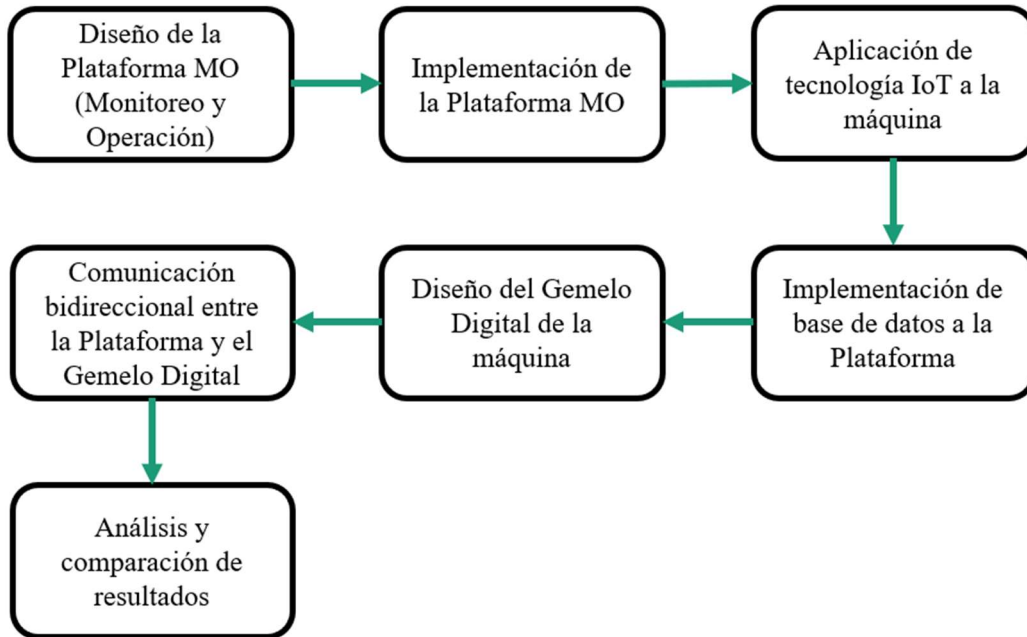


Figura 12. Metodología seguida para el desarrollo de la tesis.

En el inicio de esta investigación, se llevó a cabo un análisis minucioso del sistema de control de la máquina, sentando las bases para futuras mejoras. Se identificaron deficiencias en el sistema existente y se concibió un enfoque claro para su actualización. Durante la fase de diseño, se elaboraron planes detallados tanto para la parte digital como para la física, incluyendo circuitos electrónicos y algoritmos de control. Luego, se ejecutó la actualización conforme a estas especificaciones, optimizando el funcionamiento de la máquina.

Se introdujo la tecnología IoT y una base de datos para recopilar y gestionar datos, mejorando la conectividad y capacidad de análisis. Posteriormente, se creó un Gemelo Digital que representa el comportamiento en tiempo real de la máquina. Finalmente se realizó la comunicación entre la máquina física y su gemelo digital permitió una sincronización efectiva, facilitando la supervisión y ajustes en tiempo real.

Se realizó el análisis de los resultados, comparándolos con los objetivos iniciales para evaluar el éxito de la tesis y las mejoras en la máquina. Este enfoque integral culminó en una mejora significativa en la eficiencia y el control de la máquina.

### **3.1. Diseño de la Plataforma MO**

El diseño se basó en la descripción detallada de la máquina consultando su manual de uso [25]. Siguiendo este enfoque, se procedió a identificar las deficiencias y limitaciones intrínsecas al sistema de control existente. Este análisis crítico proporcionó una comprensión precisa de las áreas que requerían atención y mejora. Con estos hallazgos en mente, se planteó un enfoque claro y metódico para abordar la actualización, asegurando así que las mejoras propuestas fueran efectivas y abordaran las deficiencias identificadas de manera adecuada.

#### **3.1.1. Deficiencias y limitaciones**

En la exploración inicial del sistema de control de la máquina, se identificaron diversas deficiencias y limitaciones intrínsecas que requerían una atención inmediata. Estas problemáticas incluían la falta de capacidad para recopilar y analizar datos en tiempo real, lo que limitaba la capacidad de supervisión y la toma de decisiones informadas. Además, se observó una carencia de conectividad eficiente, lo que dificultaba la comunicación efectiva con otros sistemas y la posibilidad de control remoto. Estas limitaciones se manifestaron como obstáculos significativos en la optimización del rendimiento de la máquina. Por lo tanto, se hizo necesario abordar estas deficiencias como parte integral del proceso de actualización del sistema de control.

Deficiencias:

- Falta de capacidad de adaptación: Es decir, carecía de la flexibilidad necesaria para ajustarse a cambios en los procesos de producción, lo que limitaba su eficiencia operativa.
- Escasa capacidad de monitoreo en Tiempo Real: La capacidad de monitorear y obtener datos en tiempo real era insuficiente, lo que dificultaba la detección temprana de problemas y la toma de decisiones inmediatas.
- Complejidad de la interfaz de usuario: Una interfaz de usuario complicada y poco intuitiva podría dificultaba la operación eficiente del sistema y aumentaba la posibilidad de errores humanos.

Limitaciones:

- El sistema carecía de una infraestructura para la recopilación de datos, lo que resultaba en mediciones poco fiables y errores en el control.
- La comunicación con otros sistemas o dispositivos externos era inexistente, lo que impedía una integración efectiva en un entorno más amplio.
- El sistema no tenía la capacidad de realizar análisis en tiempo real de los datos de la máquina, lo que limitaba la detección temprana de problemas y la capacidad de realizar ajustes proactivos para evitar interrupciones en la producción.

### 3.1.2. Arquitectura de la Plataforma

Se creó una aplicación web mediante el uso de Flask y Java. Esta aplicación web incorporó una base de datos, que fue desplegada eficientemente en un entorno Docker alojado en una instancia de Ubuntu en la nube proporcionada por AWS (Amazon Web Services), esta descripción se puede observar de manera gráfica en la Figura 13.

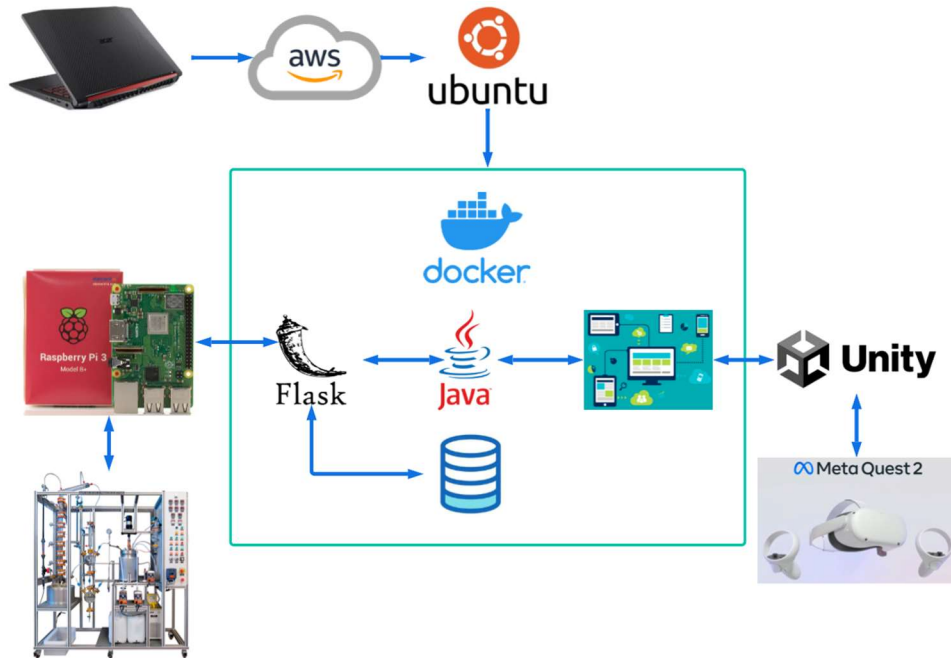


Figura 13. Arquitectura de la plataforma implementada.

La funcionalidad principal de esta aplicación web consiste en recibir solicitudes provenientes de la Raspberry, la cual está conectada a la máquina destiladora de etanol. Esta Raspberry contiene un control PID para la temperatura de la mantilla térmica y transmite de manera continua los datos de temperatura recopilados en la máquina al *Framework* Flask que se encuentra contenido en Docker y está alojado en AWS, estos datos se representan en gráficas dinámica dentro de la aplicación web mediante el uso de JavaScript. La interfaz de usuario permite no solo la visualización de los datos, sino también la interacción con el sistema.

Cuando se introducen ajustes en la temperatura objetivo, la aplicación web envía instrucciones precisas a un servidor Flask en la Raspberry para llevar a cabo los cambios necesarios en el control de la máquina. Adicionalmente, se estableció una conexión fluida entre la aplicación web y el Gemelo Digital desarrollado en Unity que ha sido cargado en visores de Realidad Virtual, lo que permite la interacción del Gemelo Digital y la aplicación web en un entorno de Realidad Virtual. Esta plataforma, creada con un enfoque científico y basada en un análisis previo, permitió la supervisión y el control efectivo de la máquina, respaldando así los objetivos de investigación establecidos. Las capacidades de interconexión y las funcionalidades integradas en la plataforma contribuyeron significativamente a la optimización de los procesos en la máquina y mejoraron la eficiencia operativa de manera notable.

### 3.1.3. Sistema de control

#### 3.1.3.1. Diagrama eléctrico

En esta sección se presenta el diseño y las conexiones empleadas en el sistema de control de temperatura. Este sistema se fundamenta en la comunicación entre varios módulos MAX31865 y un único MCP23S17, posibilitando una administración eficiente y centralizada de los sensores de temperatura. Adicionalmente, se incorporó un Relé SSR (*Solid-State Relay*) para la regulación de la potencia suministrada a una manta térmica, asegurando una precisa gestión de la temperatura. En la Figura 14 se observa el diagrama eléctrico empleado.

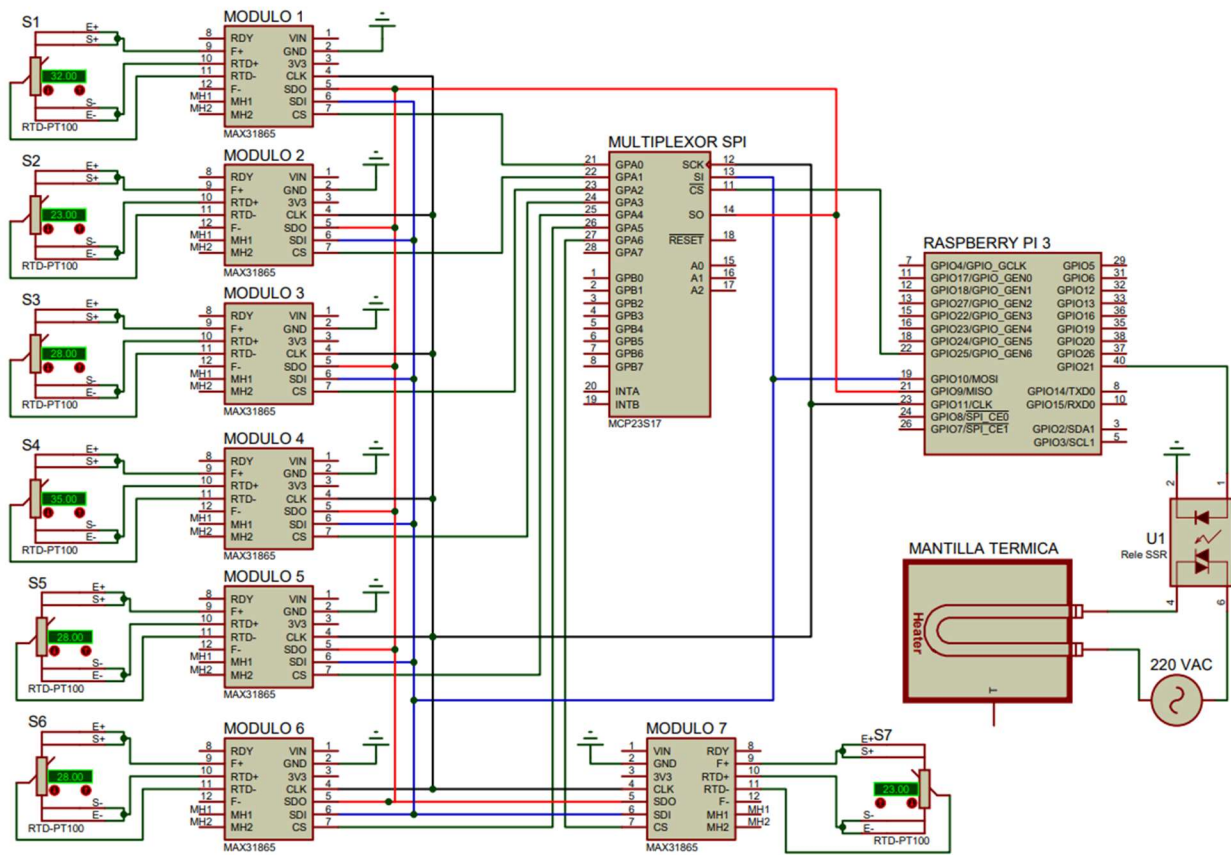


Figura 14. Diagrama eléctrico para el monitoreo de temperatura.

Se establecieron conexiones entre múltiples módulos MAX31865 y un único MCP23S17 para facilitar la comunicación SPI (*Serial Peripheral Interface*) con un Raspberry. Las conexiones se detallan a continuación:

Conexiones relativas a MISO (*Master In, Slave Out*):

- Los pines SDO (*Serial Data Output*) de los siete módulos MAX31865 fueron conectados al pin SO (*Serial Out*) del MCP23S17.

- Simultáneamente, el pin SO del MCP23S17 fue vinculado al pin MISO del Raspberry.

Conexiones relativas a MOSI (*Master Out, Slave In*):

- Se procedió a conectar el pin SI (*Serial In*) del MCP23S17 al pin SDI (*Serial Data Input*) o MOSI de cada uno de los siete módulos MAX31865.
- Además, el pin MOSI del Raspberry se unió al pin SI del MCP23S17.

Conexiones relativas a SCLK (*Serial Clock*)

- El pin SCLK del MCP23S17 se unió al pin SCLK de cada uno de los siete módulos MAX31865.
- Asimismo, el pin SCLK del Raspberry fue conectado al pin SCLK del MCP23S17.

Conexiones relativas a CS (*Chip Select*):

- Cada módulo MAX31865 tuvo su pin CS individualmente conectado a un pin GPIO (*General Purpose Input/Output*) distinto del MCP23S17. Por ejemplo, el primer MAX31865 se vinculó a través de su pin CS al GPA0 del MCP23S17, el segundo al GPA1, y así sucesivamente.

Con esta configuración, todos los módulos MAX31865 "escuchan" las mismas señales transmitidas por el Raspberry a través del MCP23S17 en sus pines SDI y SCLK. No obstante, únicamente el módulo cuyo pin CS este activo responde, enviando datos de retorno a través de su pin SDO al Raspberry mediante el MCP23S17.

Conexiones relativas a Relé SSR:

El Relé SSR se conectó a un pin GPIO el cual se configuro como salida y se utilizó para activar y desactivar el Relé esto permite controlar la corriente necesaria para encender y apagar la mantilla térmica.

En la Figura 15 se muestra el circuito eléctrico del diagrama de la Figura 14. En este se aprecia el sensor RTD PT100 de 3 hilos conectado a un módulo MAX31865 y un Relé SSR conectado a tierra y a un pin GPIO de la Raspberry. Esta conexión sirve como representante principal de un conjunto más amplio, ya que se pueden observar otros 6 módulos alineados y conectados a la Raspberry. La disposición indica un propósito claro de verificar la funcionalidad y precisión de cada componente, así como de las conexiones propuestas en el diseño.

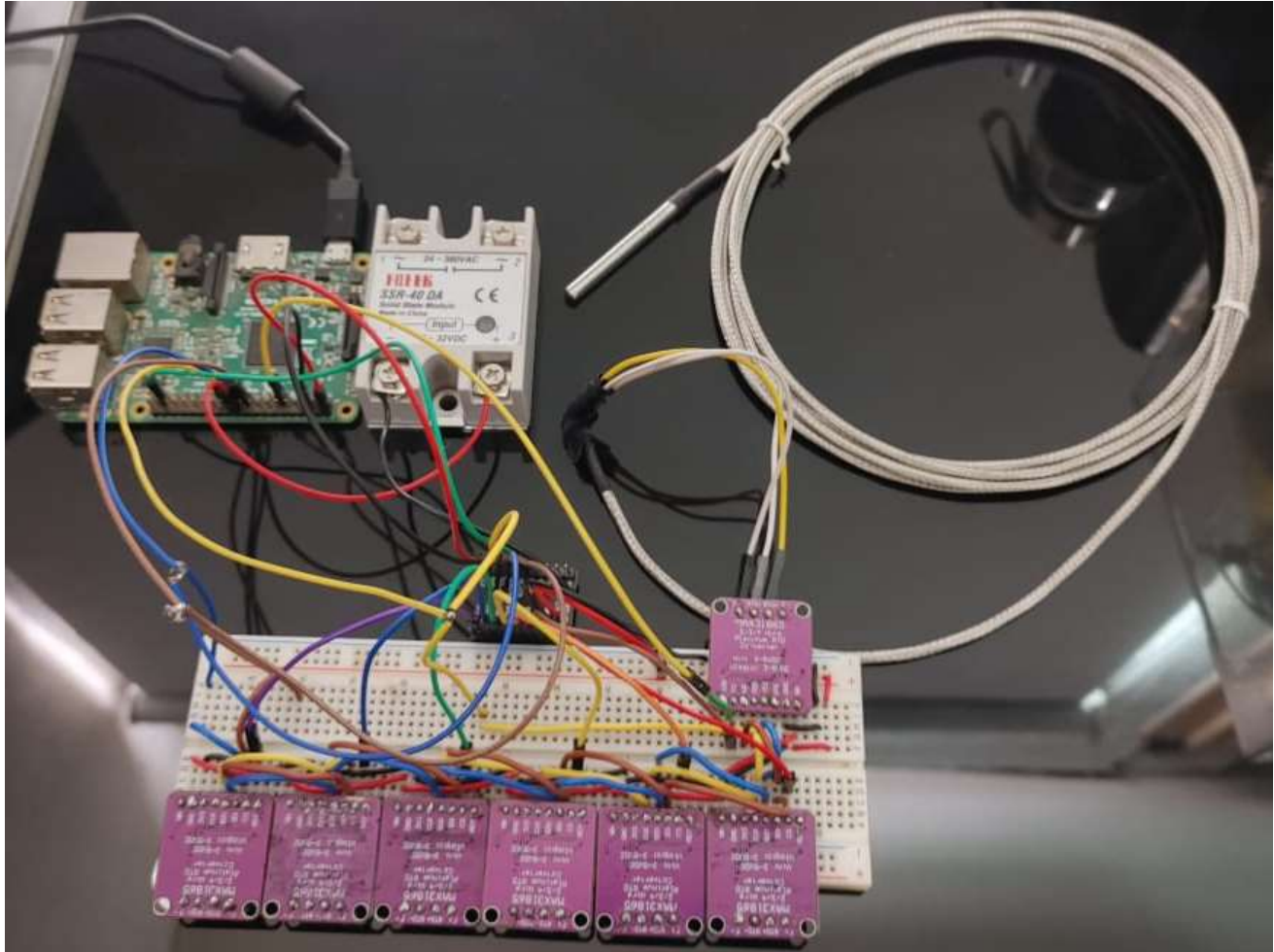


Figura 15. Pruebas de lectura.

La Figura 16 muestra el diseño del circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) que se utiliza para integrar el sistema de monitoreo de temperatura descrito en su tesis. Se puede observar la disposición organizada de los componentes electrónicos y las pistas que forman las conexiones eléctricas entre ellos. Cada módulo MAX31865 está asignado a su respectiva posición en la PCB, con trazas claras que indican las conexiones a los distintos pines del MCP23S17, tal como se especifica en la descripción del esquema eléctrico.

Se aprecia también la conexión del MCP23S17 al microcontrolador Raspberry, facilitando la comunicación SPI entre los dispositivos. Este diseño de PCB representa la materialización física del esquema eléctrico mostrado en la Figura 14 y la implementación práctica vista en la Figura 15.

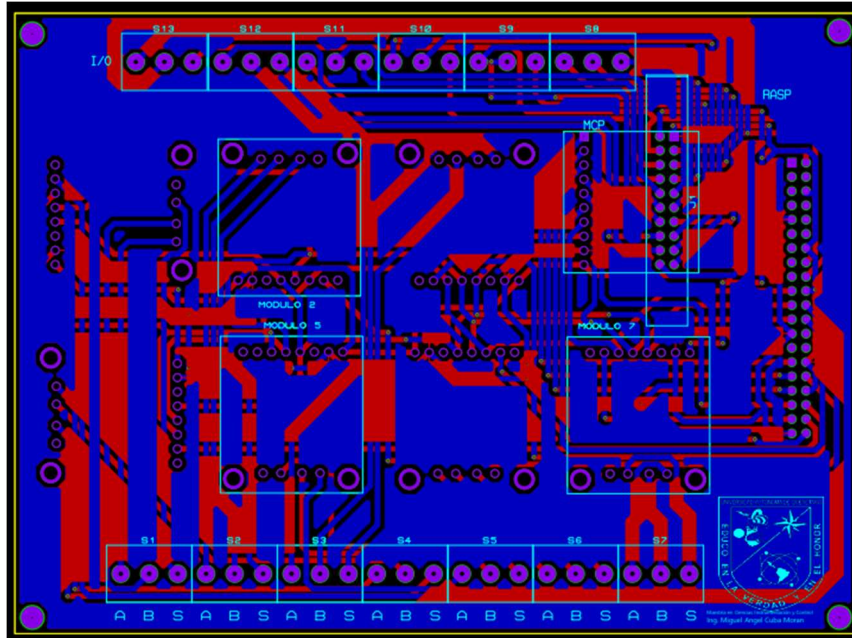


Figura 16. Diseño de PCB.

### Pseudocódigo:

Se presenta un pseudocódigo que es parte fundamental del sistema de control térmico usado en la Raspberry la cual se programó desde WSL (*Windows Subsystem for Linux*) mediante la conexión SSH (*Secure Shell*). El objetivo principal es establecer un protocolo de comunicación bidireccional entre la Raspberry y un servidor en la nube. Este protocolo permite tanto la obtención de datos de temperatura desde los sensores como la configuración de los valores de referencia (Setpoints) para el controlador PID que regula el proceso térmico.

---

```

IMPORTAR simple_pid, SPI communication, GPIO control, web requests, Flask

INICIALIZAR el GPIO de Raspberry en modo BCM
ESTABLECER SSR_PIN como 23
CONFIGURAR SSR_PIN como SALIDA

INICIALIZAR el chip MCP23S17 con la dirección 0x20

INICIALIZAR la comunicación SPI para MAX31865

CREAR una lista vacía llamada 'sensores'

for i in range(7):
    ESTABLECER cs_pin como el i-ésimo pin de entrada/salida digital en la placa
    CREAR una instancia de sensor usando especificaciones SPI, cs_pin y RTD
    AÑADIR este sensor a la lista de 'sensores'

INICIALIZAR un controlador PID con los parámetros 1, 0.1 y 0.01 y un punto de
ajuste de 0

INICIALIZAR una aplicación Flask y guárdala como 'aplicación'

```



```

ESTABLECER una variable global llamada 'setpoint_value' en 0

DEFINIR una ruta de Flask '/setpoint' que escuche las solicitudes POST:
    ESTABLECER la variable global 'setpoint_value' como el punto de ajuste
    recibido
    DEVOLVER una respuesta que diga "OK"

DEFINIR una ruta de Flask '/temperatura' que escuche las solicitudes GET:
    RECOGER temperaturas de todos los sensores en la lista de 'sensores'
    DEVOLVER estas temperaturas como una respuesta JSON

INICIAR la aplicación Flask en 0.0.0.0 y el puerto 5000 en un hilo separado

while True:
    ACTUALIZAR el punto de ajuste PID al valor en 'setpoint_value'

    LEER la temperatura del primer sensor en la lista de 'sensores'
    OBTENER la salida PID según la temperatura leída

    if pid_output > 0:
        CONFIGURAR el SSR_PIN en ALTO
    else:
        CONFIGURAR el SSR_PIN en BAJO

    RECOGER temperaturas de todos los sensores en la lista de 'sensores'
    ENVIAR estas temperaturas como una solicitud POST a la URL de la aplicación
    web

    PAUSAR el programa durante 1 segundo

LIMPIAR todas las configuraciones GPIO antes de salir

```

---

### 3.1.3.2. Controlador PID

Se implementó el controlador PID utilizando la biblioteca “simple\_pid” de Python. El *Setpoint* del PID se obtuvo desde la app web y la retroalimentación se derivó de la temperatura medida por el primer sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*) PT100 de 3 hilos.

La salida del controlador PID determinó la activación o desactivación del relé SSR, que a su vez controló la potencia suministrada a la mantilla térmica. Se establecieron parámetros iniciales de  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0.1$ ,  $K_d = 0.01$  para el controlador PID. A través de pruebas iterativas, se determinó que estos valores proporcionaban una respuesta satisfactoria para el sistema.

El uso del controlador PID permite una gestión eficaz de la temperatura mediante la mantilla térmica, al adaptarse dinámicamente a las variaciones en las condiciones del sistema y responder adecuadamente para mantener la temperatura deseada. La capacidad de ajustar el *Setpoint* a través de una aplicación web brindó una flexibilidad adicional, permitiendo adaptar el sistema a diferentes requisitos según las necesidades. En la Figura 17 se muestra un diagrama ilustrativo donde se observa cómo el controlador PID interactúa con el sistema.

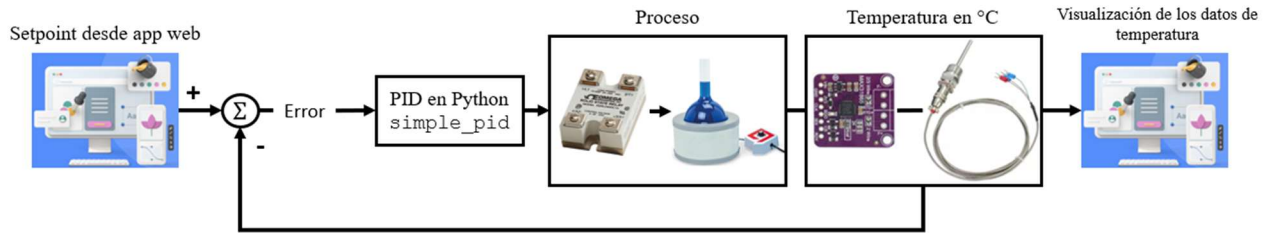


Figura 17. Diagrama de bloques del control de la temperatura.

### 3.1.4. Comunicación a la nube

Se utilizó un sistema basado en Ubuntu, tanto localmente con WSL como en la nube en AWS.

- a. Se habilitó la funcionalidad WSL en Windows a través del PowerShell ejecutado como administrador. Una vez habilitado, se instaló Ubuntu desde la Microsoft Store. Al abrir Ubuntu por primera vez, se configuró un nombre de usuario y una contraseña.
- b. Se accedió al AWS Management Console y se navegó hasta el servicio EC2 (*Elastic Compute Cloud*). Dentro de EC2, se optó por "Lanzar una instancia".
- c. Una vez seleccionadas las especificaciones deseadas para la instancia, se inició la misma y se creó un nuevo par de claves (clave pública y privada) para la autenticación. Se descargó y guardó con seguridad la clave privada (.pem), necesaria para establecer la conexión SSH desde WSL.

Para garantizar una comunicación segura entre el entorno local de WSL y la instancia de Ubuntu en AWS, se empleó SSH:

- a. Desde la terminal de Ubuntu en WSL, se navegó hasta la ubicación donde se almacenó la clave privada (.pem) descargada previamente.
- b. Se ajustaron los permisos de la clave para asegurar que solo el propietario pueda leerla, utilizando el comando: `chmod 400 /path/to/your-key.pem`
- c. Se estableció la conexión SSH a la instancia de AWS mediante el comando:  
`ssh -i /path/to/your-key.pem ubuntu@YOUR_AWS_INSTANCE_PUBLIC_IP`

Con estos pasos, se logró establecer una conexión segura y directa entre el entorno de Ubuntu en WSL y la instancia de Ubuntu en AWS. Esta configuración facilitó un flujo de trabajo ágil, permitiendo la gestión y transferencia de datos entre el sistema local y la nube de manera eficiente.

### 3.1.5. App Web

Docker, una plataforma de contenedorización, fue utilizada para garantizar que la aplicación web se ejecutara en un entorno consistente y aislado. Al encapsular la aplicación y todas sus dependencias en un contenedor, se eliminaron las discrepancias de entorno ("funciona en mi máquina"), facilitando la portabilidad y el despliegue.

Dentro de este contenedor Docker, se incluyeron los siguientes componentes:

- Flask: Permite desarrollar una API para recibir y enviar datos entre la aplicación web y la Raspberry.
- MongoDB: Se utilizó para almacenar los datos de temperatura enviados desde la Raspberry y los *Setpoints* que se envían desde la App al PID de temperatura.
- JavaScript: Proporciona interactividad y comunicarse con el back-end.

La Raspberry envía regularmente los valores de temperatura medidos por los sensores a la aplicación web a través de solicitudes HTTP. A su vez, la app web envía *Setpoints* a la Raspberry mediante otras solicitudes.

Una vez que los valores de temperatura son recibidos por la app web, se almacenan en la base de datos MongoDB. Luego, usando JavaScript, estos datos se recuperan y se presentan gráficamente al usuario en tiempo real mediante gráficos interactivos.

El control PID, por otro lado, se visualiza mediante un gráfico que muestra la diferencia entre el valor de *Setpoint* y la temperatura actual. Este gráfico proporciona una representación visual de cómo el sistema se ajusta en respuesta a las variaciones de temperatura y cómo se acerca al valor deseado del Setpoint a lo largo del tiempo.

A través de la interfaz de la app web, el usuario envía valores de Setpoint al sistema. Dichos valores se comunican al *back-end* mediante solicitudes HTTP y, subsecuentemente, se remiten a la Raspberry. Tras la definición de un nuevo Setpoint, dicho valor se representa gráficamente en la aplicación, facilitando la observación, en tiempo real, de la dinámica y respuestas del sistema.

Pseudocódigo:

---

```
IMPORTAR Flask, MongoDB, y otras librerías necesarias
```

```
INICIALIZAR Docker Container:
```

```
CONFIGURAR Flask Como el back-end framework  
CONFIGURAR MongoDB como Sistema de base de datos
```

```
CREAR objeto de aplicación Flask  
DEFINIR los parámetros de conexión de MongoDB:
```

```
BASEDEDATOS_HOST = "localhost"  
BASEDEDATOS_PUERTO = "27017"  
BASEDEDATOS_NOMBRE = "Control y monitoreo de temperatura"
```

```
Conectando a MongoDB:
```

```
dbConnection = CONNECT_TO( BASEDEDATOS_HOST, BASEDEDATOS_PUERTO,  
BASEDEDATOS_NOMBRE)
```

DEFINIR la ruta de FLASK para recibir datos de temperatura de Raspberr:

```
@app.route('/envio de temperatura, methods=['POST'])
FUNCTION handleTemperatureData():
    DATA = request.json
    STORE DATA in MongoDB collection "Lecturas de temperatura"
    RETURN success message
```

DEFINIR la ruta de FLASK para enviar el cambio de setpoint a Raspberry:

```
@app.route('/set-setpoint', methods=['POST'])
FUNCTION handleSetpointData():
    SETPOINT = request.json['setpoint']
    SEND SETPOINT a Raspberr using HTTP POST
    STORE SETPOINT in MongoDB collection "Setpoints"
    RETURN success message
```

DEFINIR la ruta de FLASK para obtener todos los datos de temperatura para graficar:

```
@app.route('/get-temperatures', methods=['GET'])
FUNCTION fetchTemperatures():
    DATA = FETCH all records from "Lecturas de temperatura"
    RETURN DATA as JSON
```

DEFINIR La ruta de FLASK para obtener todos los datos de los Setpoints para graficar:

```
@app.route('/get-setpoints', methods=['GET'])
FUNCTION fetchSetpoints():
    DATA = FETCH all records from "Setpoints"
    RETURN DATA as JSON
```

INICIALIZAR JavaScript en Front-End:

```
FUNCIÓN buscar y mostrar datos ():
    REQUEST '/get-temperatures' from Flask
    ON SUCCESS:
        PLOT temperature data on graph
    REQUEST '/get-setpoints' from Flask
    ON SUCCESS:
        PLOT setpoint data on graph
    ACTUALIZAR gráficos en tiempo real o en intervalos específicos
```

FUNCIÓN enviar datos de Setpoint ():

```
COLLECT valor del Setpoint desde la interfaz de usuario
REQUEST '/set-setpoint'
ON SUCCESS:
    DISPLAY
    ACTUALIZAR gráfico con nuevo Setpoint
```

EJECUTAR la aplicación Flask en el host y puerto especificados

La Figura 18 expone la estructura organizativa de la App Web a través de su esquema de archivos y directorios. El directorio principal "PROYECTO" actúa como núcleo contenedor, con el subdirectorio "reportes" hospedando los imprescindibles recursos estáticos como CSS, imágenes y JavaScript para la interfaz de usuario. El directorio "templates" almacena los archivos HTML que configuran la interfaz de la aplicación, con "base.html" promoviendo la coherencia del diseño.

El núcleo operativo se encuentra en "app.py", que es donde se codifica la capa de dominio en Python, gestionando las interacciones esenciales y el comportamiento de la aplicación. Las configuraciones para los contenedores Docker se definen dentro del "Dockerfile", y "requirements.txt" cataloga las dependencias de Python necesarias. "routes.py" detalla las rutas y *endpoints*, orientando las solicitudes de los usuarios a las funciones apropiadas del servidor. Finalmente, "docker-compose.yml" se encarga de coordinar los servicios Docker, optimizando la administración de la aplicación.

•En el nivel superior, se encuentra el directorio "PROYECTO". Bajo este, se sitúa el directorio "code".

- Se identifica un subdirectorio denominado "reportes".
- Existe un directorio "static", el cual aloja:
  - Subdirectorios que llevan por nombre "css", "images", "js", y "templates".
  - Un directorio llamado "respaldos".
- Se localizan diversos archivos HTML que, definen distintas interfaces o componentes de la plataforma, tales como "base\_datos.html", "base.html", entre otros.
- El archivo "app.py" corresponde al núcleo de la aplicación desarrollada en Python.
- Se identifica un "Dockerfile", archivo asociado a configuraciones de contenedores Docker.
- El archivo "requirements.txt" lista de dependencias necesarias para el proyecto en Python.
- Un archivo llamado "routes.py" define las rutas o endpoints de la plataforma.

•A nivel del directorio principal "PROYECTO", se halla un archivo "docker-compose.yml", este está relacionado con la orquestación de servicios mediante Docker.

Figura 18. Descripción del árbol de archivos de la App Web.



Figura 19. Página de inicio de la App Web.

En la Figura 19, se presenta la página de inicio de la App Web "Plataforma de Monitoreo y Control de Temperatura". Marcado con el número 1, se encuentra el título de la plataforma. A la izquierda, identificado con el número 2, se observa el logotipo de la "Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería", el cual, si se clickea, redirecciona al portal de la institución.

En el menú lateral izquierdo, que lleva el número 3, se encuentran diversas opciones para navegar por la plataforma. En el área principal de la página, se presenta un cuadro titulado "Destilador". Dentro de este cuadro, encontramos campos para ingresar el "Usuario o correo electrónico" y "Contraseña", marcados con el número 4. Justo debajo, hay un botón azul que dice "Iniciar sesión" marcado con el número 5, seguido de un enlace para "Crear cuenta" que se observa con el número 6 y otro enlace, "¿Olvidaste tu contraseña?" en el número 7. Estos elementos facilitan la autenticación y el acceso al sistema para los usuarios.



Figura 20. Monitoreo y control de temperatura.

En la Figura 20, se muestra la página Monitoreo y control de temperatura, se presenta una interfaz que consta de varios elementos clave:

1. Tabla de temperaturas, donde cada fila es interactiva y redespliega una gráfica diferente al ser seleccionada. Esto facilita la exploración detallada de los datos de cada sensor.
2. Gráfica de temperaturas, ilustra la temperatura de cada sensor en un formato visual, permite a los usuarios entender las tendencias de temperatura de un vistazo.
3. Actualizar Setpoint está diseñado para configurar la temperatura deseada, lo que posibilita a los usuarios ajustar la configuración según sus necesidades.

En la Figura 21 se muestra la interfaz de la página base de datos. En la parte superior, se puede apreciar un desplegable denominado "Registro de Datos", marcado con el número 1. Justo debajo de este, se encuentra una opción para "Descargar Registro de Temperatura", identificado con el número 2. A la izquierda, en el menú vertical, encerrado en el recuadro con el número 4. Se muestra el menú desplegable del elemento 1, la cual incluye "Registro de Temperatura", "PID", "Accesos" y "Accesos Denegados".

En la sección principal de la interfaz, se presenta una tabla que muestra registros de diferentes sensores con las columnas: "Tiempo", "Setpoint" y "Sensor1" hasta "Sensor7". Cada fila representa una lectura tomada en un momento específico, mostrando datos de temperatura de estos sensores.

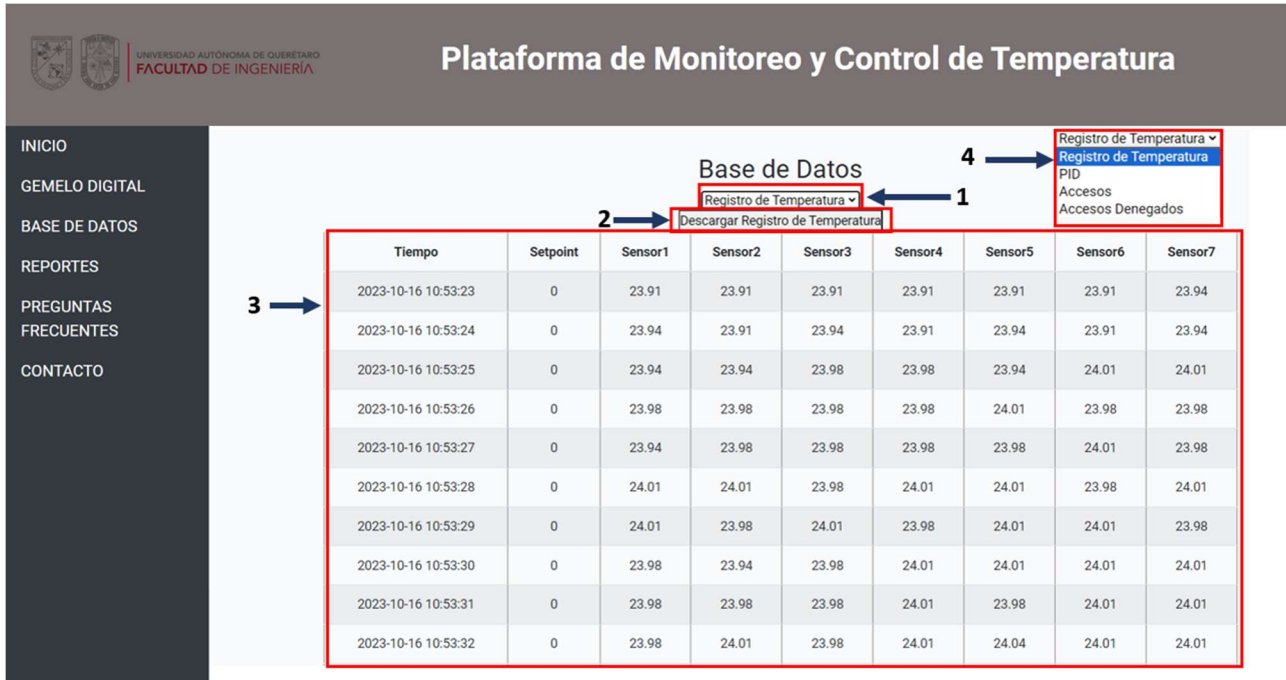


Figura 21. Página base de datos.

En la Figura 22 se visualiza una sección de la App Web. En la parte central se encuentra un formulario encerrado en un recuadro con el título "Generar Reporte". Este formulario contiene campos para introducir el "Nombre del usuario", la "Fecha del Incidente", el "Elemento Afectado" y una "Descripción del Incidente". Al final del formulario, hay un botón que indica "Generar Reporte".

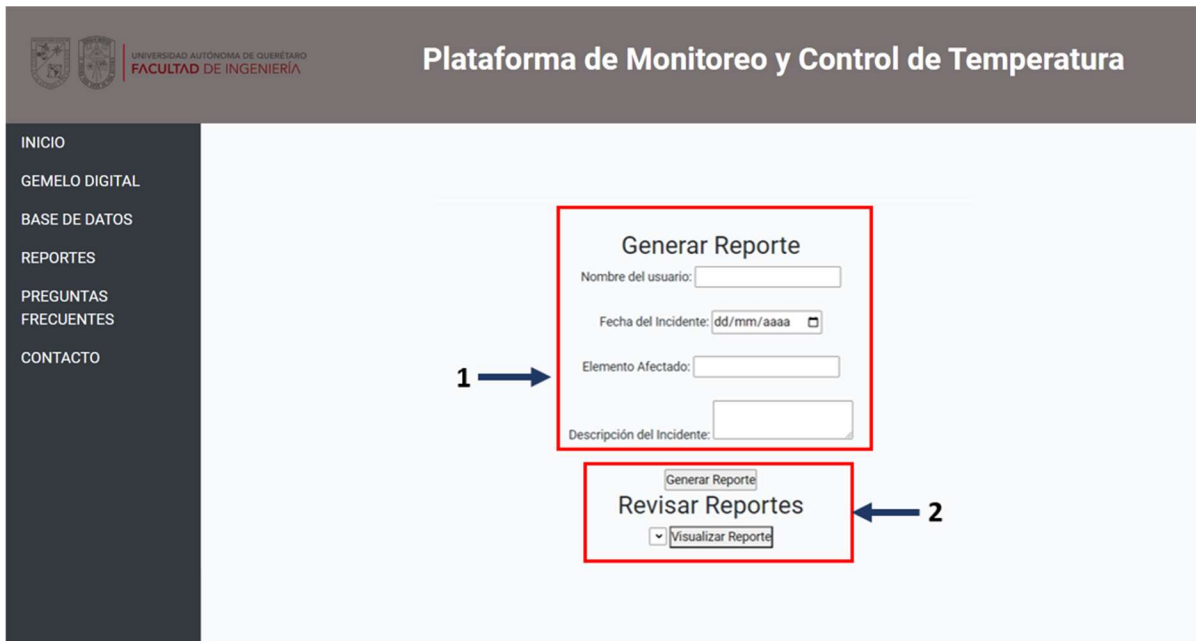


Figura 22. Generar Reporte.



En la Figura 23 se observa la página de preguntas frecuentes en el elemento 1 se muestran 5 recuadros que representa sobre qué temas hay preguntas, cada icono es seleccionable y solo se puede mantener seleccionado uno, esto despliega preguntas en el área del elemento 2, donde inicialmente solo se muestran preguntas dentro de un recuadro, a la derecha superior de estos recuadros se observa un símbolo más, esto despliega la respuesta de esa pregunta.



Figura 23. Página preguntas frecuentes.

### 3.1.6. Materiales

A continuación, se enlistan los materiales y componentes utilizados tanto para el sistema de control, la implementación IoT y el Gemelo Digital, se mencionan los componentes existentes y los planteados en el diseño de la actualización.

- Laptop Acer Nitro 5 Intel i5 octava generación 512 Gb SSD, RAM 16 Gb, GTX 1050 4 Gb
- Raspberry
- MetaQuest 2
- Modulo MAX31865
- Multiplexor SPI MCP23S17
- Sensores de temperatura RTD Pt100 de 3 hilos
- Bomba de vacío
- Mantilla térmica con potencia de calentamiento de 2 x 780 Watt, 220-240 VAC / 60 Hz
- Relé SSR
- Electroválvula
- Chiller
- Display 14"

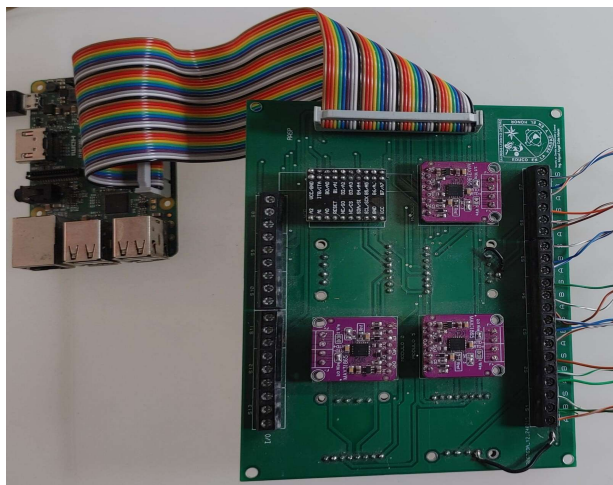
- Mouse
- Teclado
- Memoria microSD de 64 Gb

Por otra parte, los softwares y/o plataformas

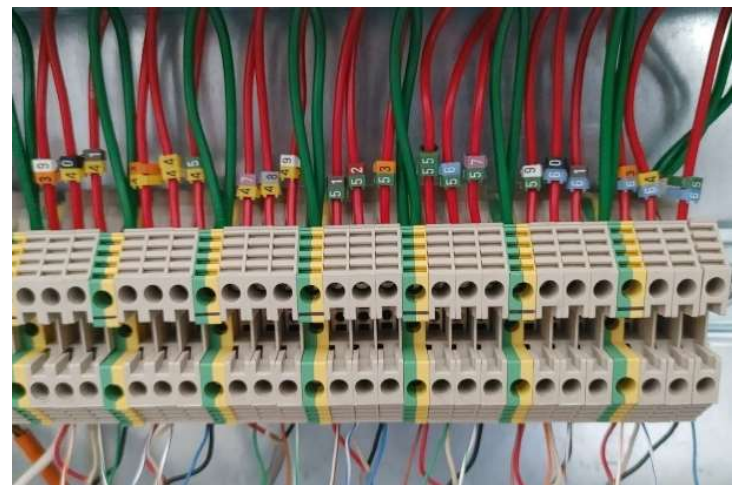
1. WSL
2. SO Windows 10
3. Plataforma Docker
4. Instancia Ubuntu en AWS
5. Unity
6. Oculus
7. MongoDB
8. *Framework* Flask

### 3.2. Implementación de la actualización de la máquina

Una vez completada la fase de diseño, se procedió con la ejecución de la actualización del sistema de control de la máquina. Durante esta fase, se llevaron a cabo las modificaciones y ajustes necesarios, siguiendo las especificaciones previamente definidas. Cada cambio se implementó de manera meticulosa y metódica, con el objetivo principal de mejorar la eficiencia operativa del sistema. Simultáneamente, se realizó una cuidadosa adquisición de materiales y componentes esenciales para llevar a cabo la actualización de la máquina. Este enfoque garantizó la disponibilidad de recursos críticos para el proceso de mejora y facilitó una ejecución sin contratiempos.



(a)

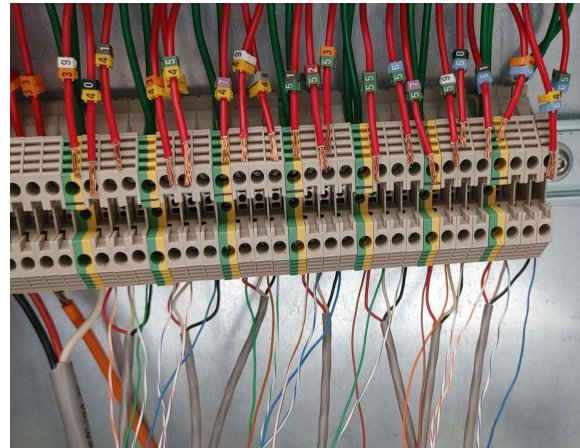


(b)

Figura 24. Conexión de PCB.  
 (a) Raspberry a PCB. (b) PCB a clemas de sensores en gabinete de control.



(a)



(b)

Figura 25. Prueba de PCB en la destiladora.  
 (a) West 6010+. (b) PCB a clemas de sensores en gabinete de control.

### 3.3. Aplicación de tecnología IoT a la máquina

En el marco de la actualización tecnológica de la máquina, se ha incorporado la tecnología IoT, lo que ha requerido una re-instrumentación de los sensores ya existentes. Se adaptaron estos dispositivos para capturar y enviar datos en tiempo real, tales como temperatura y acciones precargadas. Se utilizó una Raspberry para configurar un entorno virtual, donde se ejecutó un código específicamente desarrollado para leer las mediciones de temperatura los sensores RTD.

Para facilitar el acceso remoto y la comunicación en tiempo real, la Raspberry se conectó a la red mediante un cable Ethernet y se le asignó una dirección IP pública a través de un puerto libre. Esto permite que la Raspberry Pi reciba peticiones HTTP de manera segura y confiable a su aplicación Flask. La aplicación web, alojada en una instancia de AWS Ubuntu, procesa estos datos y presenta gráficos interactivos que reflejan las variaciones de temperatura de la máquina en tiempo real. La implementación de esta infraestructura no solo moderniza el sistema de monitoreo de la máquina, sino que también optimiza la supervisión y el análisis de su desempeño operativo.

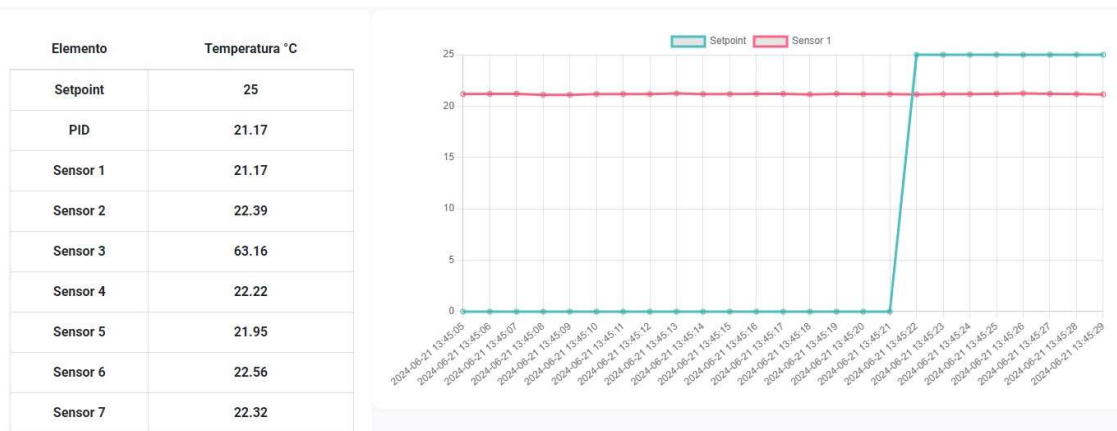


Figura 26. Gráfico de temperaturas en la plataforma Web.

### 3.4. Implementación de base de datos al sistema actualizado

La implementación de la tecnología IoT brindó a la máquina una mayor conectividad y capacidad de análisis. Esta mejora en la conectividad permitió la transmisión de datos en tiempo real desde los sensores a sistemas de control y monitoreo externos, lo que facilitó un seguimiento detallado de su funcionamiento. Respecto a la base de datos, se diseñó meticulosamente para alojar estos datos de manera organizada y accesible, lo que posibilitó. Durante el diseño de la estructura de almacenamiento de datos históricos, se consideró la posibilidad de múltiples arranques de la máquina en un mismo día.



Tiempo	Setpoint	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7
2024-06-21 13:41:55	0	21.2	22.42	63.19	22.22	21.91	22.59	22.29
2024-06-21 13:41:56	0	21.2	22.35	63.13	22.22	21.95	22.56	22.29
2024-06-21 13:41:57	0	21.2	22.45	63.19	22.25	21.88	22.59	22.32
2024-06-21 13:41:58	0	21.14	22.45	63.16	22.22	21.98	22.52	22.29
2024-06-21 13:41:59	0	21.17	22.39	63.19	22.22	21.98	22.59	22.29
2024-06-21 13:42:00	0	21.17	22.45	63.16	22.22	21.95	22.56	22.29

Figura 27. Revisión de la base de datos.

Se implementó una mejora que permite una diferenciación clara entre los arranques realizados en el mismo día. Cada arranque generaba una carpeta nueva bajo la carpeta principal "arranques" con un nombre basado en la fecha del día y un prefijo numérico único para cada arranque. Los datos de temperatura se registran en archivos de texto dentro de estas carpetas, lo que facilita la organización y análisis de los datos históricos. Esta integración de IoT y la base de datos sienta las bases para una monitorización avanzada y la toma de decisiones basadas en datos en tiempo real.

### 3.5. Diseño del Gemelo Digital de la máquina

Como parte del proceso de modernización de la máquina destiladora de etanol, se integraron tecnologías avanzadas de Internet de las Cosas (IoT) y monitoreo digital. Este desarrollo incluyó la creación de un Gemelo Digital que replica las operaciones de la máquina física con alta precisión. Modelado en SolidWorks, el ensamblaje detallado incluyó aproximadamente 300 piezas, abarcando componentes como el hervidor, la columna empaquetada y el área de reflujo.

Posteriormente, el modelo fue exportado a formato FBX e integrado en Unity, permitiendo una visualización 3D interactiva. Esto mejoró la conectividad, habilitó la recopilación y análisis de datos en tiempo real y optimizó la capacitación del personal mediante exploración virtual. La implementación del Gemelo Digital no solo favoreció la comprensión del sistema, sino que también estableció un marco para futuras simulaciones y análisis predictivos.

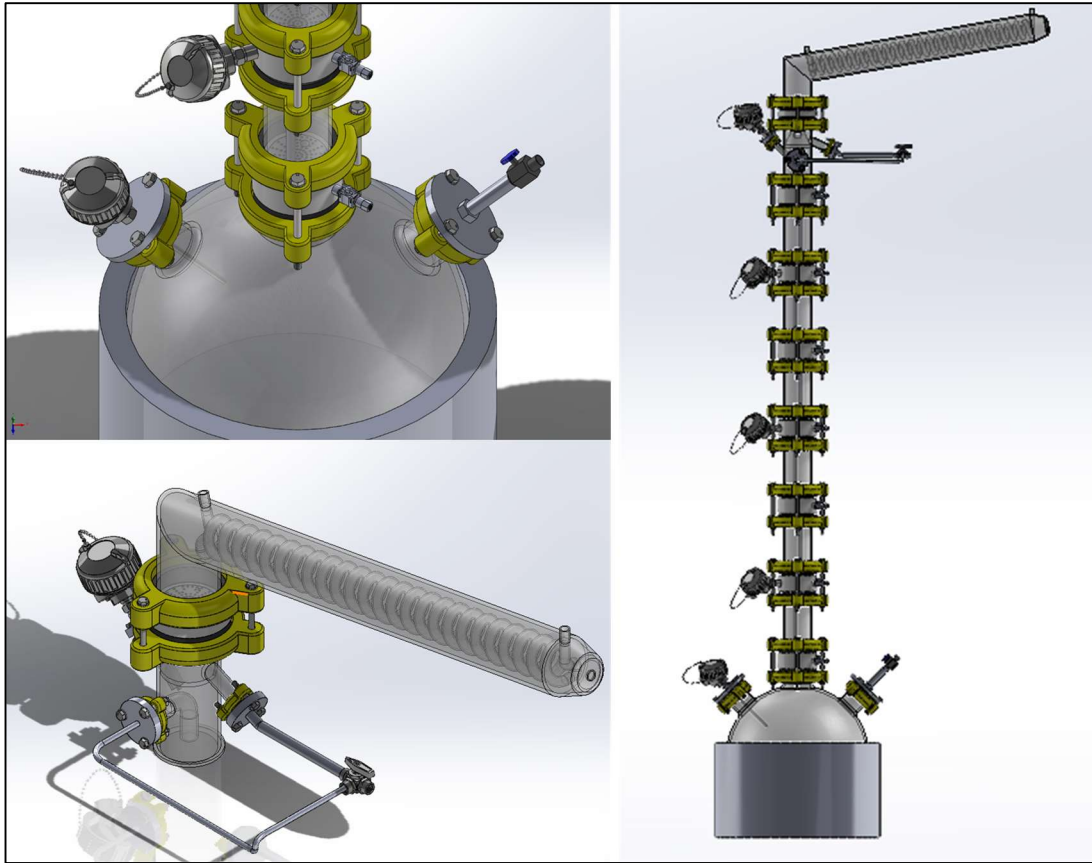


Figura 28. Vistas del gemelo digital en SolidWorks.

La Figura 28 presenta parte del gemelo digital de una máquina destiladora de etanol modelado en SolidWorks, destacando tres componentes clave.

Vista superior izquierda: Representa el hervidor, encargado de calentar el líquido inicial para generar vapores alcohólicos. Se observan conexiones estratégicas para sensores y válvulas que optimizan su funcionamiento.

Vista derecha: Muestra la columna empaquetada, un elemento vertical compuesto por múltiples secciones que permite la separación de compuestos por medio de condensación y evaporación repetidas. Este diseño modular garantiza un alto nivel de eficiencia en la destilación.

Vista inferior izquierda: Corresponde al área de reflujo, diseñada para volver a destilar el producto de la parte final del proceso y maximizar la concentración de alcohol en el destilado. Incluye un serpentín de condensación y sistemas de retorno que aseguran un control preciso del flujo y la pureza del producto final.

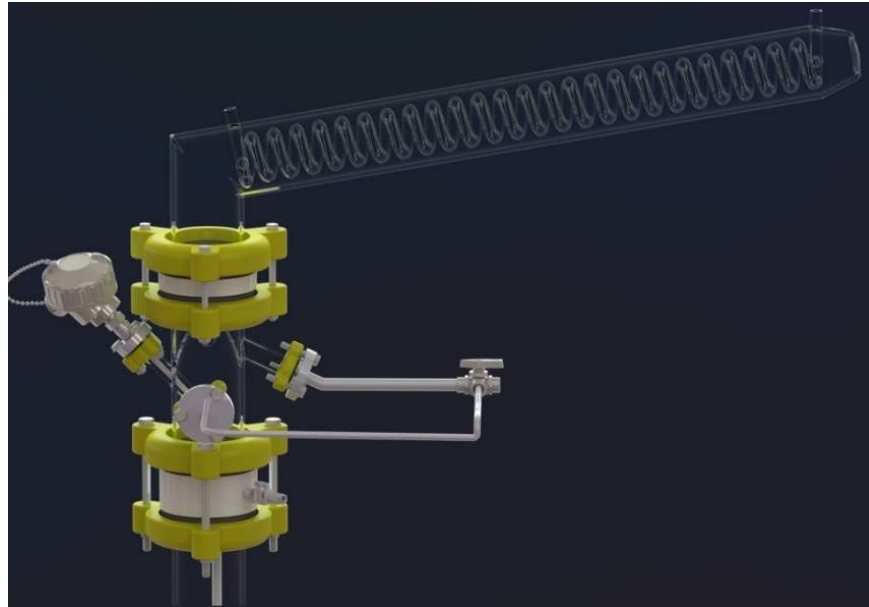


Figura 29. Render del área de reflujo.

El render muestra el área de reflujo de la destiladora, un componente crítico para alcanzar altos niveles de pureza en el etanol. El diseño incluye un serpentín de enfriamiento y conexiones integradas que facilitan la recirculación eficiente.

## 4. Resultados

Durante el estudio se realizaron un total de cuatro corridas: dos antes de la mejora y dos después de la mejora. En las dos primeras corridas (antes de la mejora), los datos de temperatura fueron obtenidos mediante observación manual, mientras que, en las corridas posteriores, los datos fueron recabados automáticamente utilizando el sistema de adquisición de datos desarrollado, el cual permitió un monitoreo más preciso y en tiempo real.

Además, el tiempo a pie de máquina del operador también fue registrado de manera manual antes de la mejora y monitoreado en tiempo real durante la mejora, con una reducción significativa en el tiempo de intervención, lo que se refleja en las gráficas de reducción de tiempo a pie de máquina. De este modo, se confirma que las mejoras implementadas no solo impactaron el control de la temperatura, sino que también optimizaron el tiempo de intervención del operador en el proceso, corroborando la eficacia de la implementación del Gemelo Digital en este sistema.

La primera gráfica muestra el comportamiento de la temperatura en un proceso de control antes y después de la mejora implementada. En el gráfico de la izquierda, los datos correspondientes a "Antes de la mejora" fueron recopilados mediante observación manual, con fluctuaciones de la temperatura entre un 5% y un 7% por encima y por debajo del Setpoint de 78.5°C, lo que indica un control menos preciso y más inestable. Por otro lado, la gráfica a la derecha muestra los datos "Después de la mejora", donde se observa una reducción significativa en la variabilidad de la temperatura, con fluctuaciones menores entre un 1.75% y un 2.8%.

Estos datos fueron recolectados automáticamente a través de un sistema de adquisición de datos conectado a la base de datos de la plataforma de monitoreo. La mejora en el control de temperatura evidencia la efectividad de las mejoras implementadas y resalta la importancia de la automatización en la recolección de datos, lo que permite un control más preciso y una optimización del proceso.

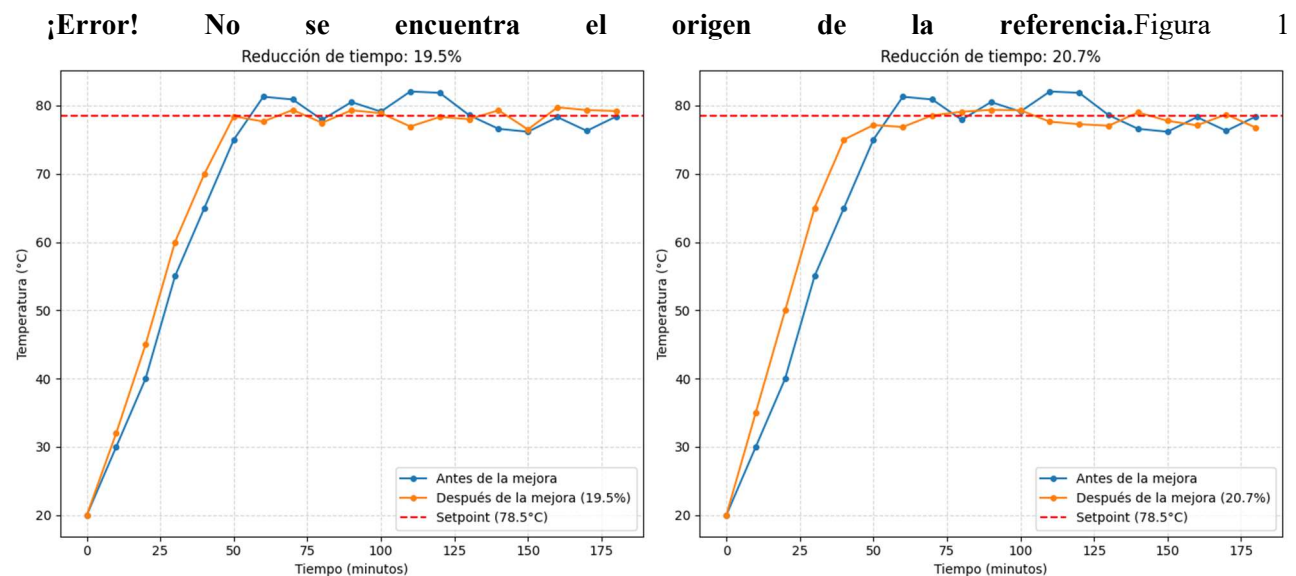


Figura 30. Comparación de resultados control de temperatura.

En la Figura 31, se comparan los tiempos a pie de máquina antes y después de la mejora. A la izquierda, se muestra el tiempo que el operador estuvo a pie de máquina antes de la mejora, representado en azul, el cual ocupa un 75% del total de los 180 minutos del proceso. Después de la mejora, se observa una reducción significativa en el tiempo de trabajo del operador, con una división en el tiempo, mostrando un 27% en verde y un 33% en naranja de los 75% previamente empleados.

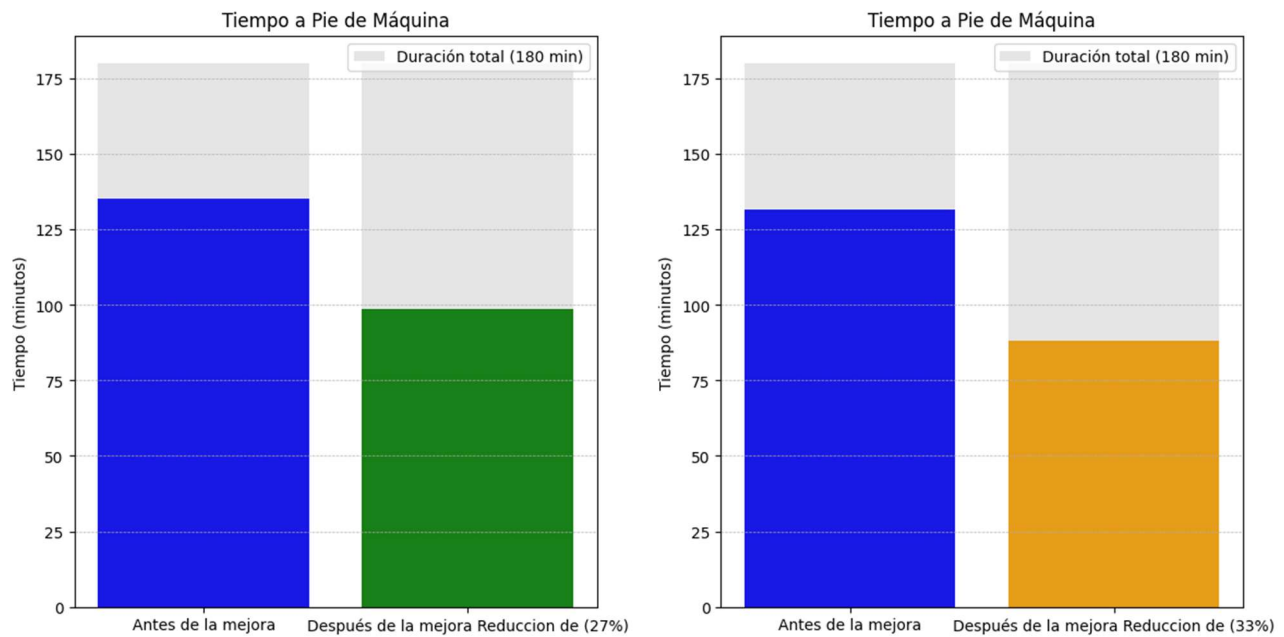


Figura 31. Comparación de resultados Reducción de tiempo a pie de máquina.

Este cambio demuestra un avance en la eficiencia del proceso, gracias a la reducción del tiempo que el operador debe estar presente a pie de máquina. Los datos para esta comparación fueron observados manualmente antes de la mejora y se registraron a través de la plataforma de monitoreo durante las corridas posteriores. Esta reducción en el tiempo de intervención del operador también se traduce en una mejora en la eficiencia operativa general del proceso.



## 5. Conclusión

Los resultados obtenidos tras la implementación de la plataforma MO (Monitoreo y Operación) para la máquina destiladora de etanol en AWS muestran una mejora significativa en los procesos de monitoreo y control de la máquina. A través de la recopilación automática de datos mediante la tarjeta de adquisición (Raspberry Pi 3B) y la plataforma basada en la nube, se alcanzaron dos principales objetivos: primero, un control de temperatura más preciso, con una reducción notable en las fluctuaciones, y segundo, una optimización en la intervención del operador, reflejada en una reducción de hasta el 33% del tiempo a pie de máquina.

Estas mejoras evidencian no solo la efectividad de la plataforma para gestionar grandes cantidades de datos a través de MongoDB, sino también su capacidad de adaptarse a diferentes tipos de máquinas, gracias a la flexibilidad de la arquitectura de IoT. Además, el sistema de monitoreo ha facilitado el acceso remoto mediante cualquier navegador web, brindando una gestión eficiente desde cualquier ubicación.

En cuanto al modelo de Gemelo Digital, ha mostrado un potencial prometedor al permitir la exploración del modelo 3D de la destiladora, lo que facilita la capacitación de nuevo personal y mejora la comprensión del funcionamiento de la máquina. Si bien se espera que este modelo proporcione más beneficios en términos de visualización y control en el futuro, los resultados preliminares indican una gran promesa.

Por último, la comparación entre las corridas realizadas antes y después de la mejora ha mostrado que el sistema desarrollado no solo mejora la precisión y el control, sino que también reduce significativamente el tiempo de operación y monitoreo, acercándose al objetivo de una reducción del 20%. Esto valida la eficacia de la implementación y sienta las bases para futuras expansiones y optimizaciones del sistema.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran el éxito de la mejora implementada, con un impacto positivo en la eficiencia, control y facilidad de operación de la máquina destiladora de etanol, asegurando su viabilidad y aplicabilidad en otros contextos industriales.

## 6. Productos Generados



### TABLA DE CONTENIDOS CONIIN 2023

21. Miguel Angel Cuba Moran, Gonzalo Macías Bobadilla, Aldo Amaro Reyes and Jorge Noel Gracida Rodríguez.  
*Upgrading Manual Control Systems with Digital Twins and Virtual Reality: A Case Study on a Batch Packed Column for Ethanol Distillation.*

Figura 32. Artículo Publicado en el CONIIN 2023.

### OBJETO DE LA INVENCIÓN

La invención tiene como objeto proporcionar un sistema avanzado de supervisión y control de procesos industriales mediante la integración de tecnologías emergentes, tales como Gemelos Digitales, Realidad Virtual y el Internet de las Cosas (IoT). Este sistema está diseñado para mejorar la eficiencia, precisión y flexibilidad operativa de los procesos industriales. Mediante el uso de una plataforma de monitoreo y operación basada en la nube y una tarjeta de adquisición de datos, la invención permite la visualización y análisis en tiempo real, optimizando la toma de decisiones y reduciendo la necesidad de intervención manual.

### DESCRIPCIÓN DE LA FIGURA

La **FIGURA 1** muestra un diagrama de flujo del sistema avanzado de supervisión y control de procesos industriales. En el diagrama se representan los componentes principales y el flujo de datos entre ellos.

FIGURA 1

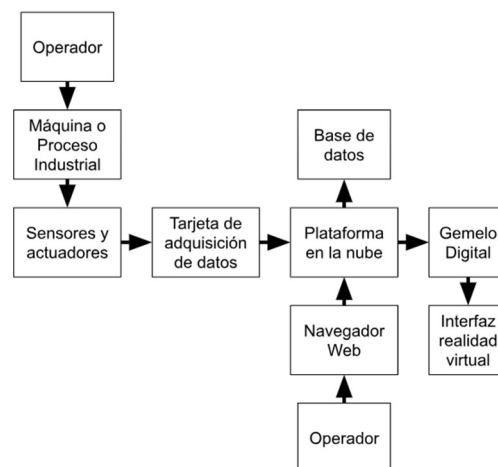


Figura 33. Patente pendiente de registro.

## 7. Bibliografía

- [1] J. Macias-Aguayo, L. Garcia-Castro, K. F. Barcia, D. McFarlane, y J. Abad-Moran, “Industry 4.0 and Lean Six Sigma Integration: A Systematic Review of Barriers and Enablers”, *Appl. Sci.*, vol. 12, núm. 22, Art. núm. 22, ene. 2022, doi: 10.3390/app122211321.
- [2] “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group”, acatech - National Academy of Science and Engineering. Consultado: el 7 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>
- [3] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, y M. Hoffmann, “Industry 4.0”, *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, núm. 4, pp. 239–242, ago. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [4] R. Drath y A. Horch, “Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]”, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, núm. 2, pp. 56–58, jun. 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2312079.
- [5] M. Hermann, T. Pentek, y B. Otto, “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios”, en *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, ene. 2016, pp. 3928–3937. doi: 10.1109/HICSS.2016.488.
- [6] G. Xu, M. Li, C.-H. Chen, y Y. Wei, “Cloud asset-enabled integrated IoT platform for lean prefabricated construction”, *Autom. Constr.*, vol. 93, pp. 123–134, sep. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.012.
- [7] L. Lai, L. Zhang, L. Ren, y L. Wang, “Overview on intelligent scheduling models and methods for industrial Internet-of-things”, *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong Computer Integr. Manuf. Syst. CIMS*, vol. 28, núm. 7, pp. 1966–1980, 2022, doi: 10.13196/j.cims.2022.07.004.
- [8] K. P. Seng, L. M. Ang, y E. Ngharamike, “Artificial intelligence Internet of Things: A new paradigm of distributed sensor networks”, *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 18, núm. 3, p. 15501477211062835, mar. 2022, doi: 10.1177/15501477211062835.
- [9] S. Sumathi y P. Surekha, *LabVIEW based Advanced Instrumentation Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-48501-8.
- [10] K. J. Åström y T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Research Triangle Park, North Carolina: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995.

- [11] W. K. Bolton y W. K. Bolton, *Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*, Sexta edición. en Ingeniería Eléctrica-Electrónica. México, D.F. (México): Alfaomega, 2013.
- [12] “User guide - simple-pid 2.0.0”. Consultado: el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://simple-pid.readthedocs.io/en/latest/user\\_guide.html](https://simple-pid.readthedocs.io/en/latest/user_guide.html)
- [13] G. Yadav y K. Paul, “Architecture and security of SCADA systems: A review”, *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.*, vol. 34, p. 100433, sep. 2021, doi: 10.1016/j.ijcip.2021.100433.
- [14] A. Sharma, E. Kosasih, J. Zhang, A. Brintrup, y A. Calinescu, “Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions”, *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 30, p. 100383, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2022.100383.
- [15] Q. Min, Y. Lu, Z. Liu, C. Su, y B. Wang, “Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry”, *Int. J. Inf. Manag.*, vol. 49, pp. 502–519, dic. 2019, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020.
- [16] Q. Qi *et al.*, “Enabling technologies and tools for digital twin”, *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 3–21, ene. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- [17] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, y F. Sui, “Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, núm. 9, pp. 3563–3576, feb. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0233-1.
- [18] J. W. Cortada, *Information and the Modern Corporation*. The MIT Press, 2011. doi: 10.7551/mitpress/9054.001.0001.
- [19] M. Gogolla, J. Bohling, y M. Richters, “Validating UML and OCL models in USE by automatic snapshot generation”, *Softw. Syst. Model.*, vol. 4, pp. 386–398, ene. 2005, doi: 10.1007/s10270-005-0089-y.
- [20] C. Narvaez Rojas, G. A. Alomia Peñafiel, D. F. Loaiza Buitrago, y C. A. Tavera Romero, “Society 5.0: A Japanese Concept for a Superintelligent Society”, *Sustainability*, vol. 13, núm. 12, Art. núm. 12, ene. 2021, doi: 10.3390/su13126567.
- [21] P. K. R. Maddikunta *et al.*, “Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications”, *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 26, p. 100257, mar. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2021.100257.

- [22]A. Adel, “Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas”, *J. Cloud Comput.*, vol. 11, núm. 1, p. 40, sep. 2022, doi: 10.1186/s13677-022-00314-5.
- [23]A. Sharma, R. Mehtab, sanjay mohan Sharma, M. Kamal, y M. Shah, “Augmented reality -an important aspect of Industry 4.0”, nov. 2021, doi: 10.1108/IR-09-2021-0204].
- [24]L. A. Cárdenas-Robledo, Ó. Hernández-Uribe, C. Reta, y J. Cantoral-Ceballos, “Extended reality applications in industry 4.0. - A systematic literature review”, *Telemat. Inform.*, vol. 73, p. 101863, jul. 2022, doi: 10.1016/j.tele.2022.101863.
- [25]Generatoris S.A. de C.V., “Generatoris”, EQUIPO PARA ESTUDIO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL BT-BE-050/EL. Consultado: el 1 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.generatoris.com//home/index?type=&locale=&title=&image=&description=>
- [26]International Organization for Standardization, “ISO 45001:2018 Occupational Health and Safety Management Systems”. ISO, 2018.
- [27]International Organization for Standardization, “ISO 31000:2018 Risk Management — Guidelines”. ISO, 2018.
- [28]International Organization for Standardization, “ISO 14001:2015 Environmental Management Systems — Requirements with Guidance for Use”. ISO, 2015.