



UNIVERSIDAD EAN

**Diseño de un Sistema de Automatización de un Reactor Anaeróbico de
Conversión de Biomasa (RACB) para el Control de Variables de Proceso**

PROYECTO DE GRADO – PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Mateo Castro Serna

Juan Manuel Perez Muñoz

Gabriel Esteban Rodríguez Fajardo

En colaboración con Johanna Karina Solano y Luisa Fernanda Carvajal

Programa de Ingeniería Mecatrónica

Bogotá D.C., Colombia

2024



Tabla de contenido

Resumen ejecutivo.....	3
Introducción	7
Objetivos	8
Definición del problema	9
Justificación.....	10
Análisis de requerimientos	12
Marco de referencia	14
Análisis de Restricciones	22
Diagnóstico del Sistema Actual del Reactor	24
Metodología para la selección y desarrollo de la solución.....	29
Descripción técnica del sistema del control del reactor.....	66
Análisis de costos	68
Conclusiones	70
Referencias.....	71



Tabla de figuras

Figura 1	24
Figura 2	24
Figura 3	25
Figura 4	25
Figura 5	26
Figura 6	27
Figura 7	27
Figura 8	28
Figura 9	28
Figura 10	29
Figura 11 Sensor ultrasónico	31
Figura 12 Vegaplug 31	32
Figura 13 Vegaplug 6X	33
Figura 14 Válvula solenoide	35
Figura 15 Bomba eléctrica	37
Figura 16	38
Figura 17	39
Figura 18	40
Figura 19	40



Figura 20	41
Figura 21	41
Figura 22	41
Figura 23	47
Figura 24	49
Figura 25	50
Figura 26	53
Figura 27	53
Figura 28	54
Figura 29	55
Figura 30	56
Figura 31	56
Figura 32 Termocupla tipo K.....	57
Figura 33 Termocupla tipo J	58
Figura 34 Relé de estado sólido	59
Figura 35 Control de temperatura.....	59
Figura 36 Medidor de oxígeno disuelto	60
Figura 37	62
Figura 38	64
Figura 39	64



Figura 4068



Resumen ejecutivo

El objetivo principal de este proyecto es el diseño y desarrollo de un sistema de automatización de temperatura, nivel y oxígeno para un reactor anaeróbico en la producción de ácido poliláctico (PLA), ubicado en el laboratorio de la Universidad EAN en la sede de la calle 71. La producción de PLA, un biopolímero ampliamente utilizado en plásticos biodegradables requiere condiciones de temperatura precisas para garantizar la eficiencia de los procesos biotecnológicos involucrados. Actualmente, el control de temperatura del reactor se realiza de forma manual, lo que genera inconsistencias en el proceso, afecta la calidad del PLA producido y reduce la eficiencia energética del sistema.

El diseño de automatización propuesto busca resolver estos problemas proporcionando un control preciso y confiable que garantice la estabilidad del proceso de producción de PLA, mejore la eficiencia operativa, reduzca costos y promueva el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles. El sistema involucrará la integración de sensores de temperatura, nivel y oxígeno distribuidos estratégicamente dentro del reactor para monitorear en tiempo real las condiciones térmicas. Estas lecturas serán procesadas por un controlador lógico programable (PLC) que regulará automáticamente los sistemas de calefacción o enfriamiento para mantener la temperatura dentro de los límites establecidos. Además, el sistema será escalable, permitiendo su implementación en reactores de diferentes capacidades, e integrable con sistemas de supervisión más amplios. Esto facilitará el control remoto y la recolección de datos históricos, optimizando aún más el proceso. Con este enfoque, se busca no solo mejorar la estabilidad, la eficiencia, el rendimiento del proceso y la calidad del PLA, sino también reducir el consumo energético del reactor, alineándose con los principios de sostenibilidad de la Universidad EAN.



Introducción

Actualmente, la automatización de procesos se ha vuelto esencial para mejorar la eficiencia y reducir costos en múltiples sectores, incluidos los ámbitos industrial y académico. Este enfoque optimiza el rendimiento y disminuye los márgenes de error, especialmente en tareas que exigen precisión continua, como el control de temperatura en sistemas biotecnológicos. En este contexto, la Universidad Ean ha identificado la necesidad de implementar un sistema de automatización para regular térmicamente un reactor anaeróbico utilizado en la producción de ácido poliláctico (PLA), un biopolímero biodegradable con aplicaciones sostenibles en diversas industrias.

Este proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema automatizado para el control de temperatura, nivel y oxígeno en dicho reactor, asegurando la estabilidad del proceso, mejorando la eficiencia energética y optimizando la calidad del PLA producido. Debido a su naturaleza ecológica y capacidad de biodegradarse sin dejar microplásticos, el PLA se destaca como una alternativa clave a los plásticos tradicionales. Su versatilidad lo convierte en un material ampliamente utilizado en las industrias textil, médica, de impresión 3D y de embalaje, lo que subraya la importancia de producirlo de manera eficiente y sostenible.

En esta fase inicial, el enfoque será el diseño y selección de sensores y dispositivos de control. Para ello, se analizarán las especificaciones técnicas del reactor anaeróbico y se identificarán los sensores óptimos para medir y controlar variables clave como la temperatura, el nivel y la concentración de oxígeno. Además, se seleccionarán los controladores lógicos programables (PLC) que mejor se ajusten a las necesidades del proceso y que ofrezcan la capacidad de integración y escalabilidad para futuras ampliaciones del sistema.



Objetivos

2.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema de automatización para la medición de variables de control para un reactor anaerobio de Conversión de Biomasa

2.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico de la operatividad actual del reactor (RACB) con el fin de identificar posibles mejoras al proceso.

- Diseñar el sistema de automatización de variables para el RACB que incluya control de temperatura, nivel y oxígeno.

- Validar el desempeño del sistema de control automatizado mediante simulaciones y pruebas experimentales, garantizando su fiabilidad en diferentes escenarios operativos.



Definición del problema

Para optimizar la producción de ácido poliláctico (PLA), es fundamental mantener condiciones térmicas estables y precisas en el reactor anaeróbico, ya que cualquier desviación en la temperatura puede impactar directamente el proceso de polimerización y, con ello, las características del biopolímero obtenido. Actualmente, en el laboratorio de la Universidad EAN, el control de temperatura, nivel y oxígeno se realiza manualmente, lo cual presenta desafíos significativos. La ausencia de un sistema automatizado de regulación provoca que los ajustes de las variables sean reactivos, aumentando la probabilidad de errores humanos, generando inestabilidad en el proceso y afectando la calidad del PLA producido. Estas variaciones no solo alteran las propiedades finales del PLA, sino que también incrementan el consumo energético y los costos operativos, debido a la necesidad de realizar ajustes manuales constantes. Además, el control manual dificulta el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética, que son claves en la producción de biopolímeros. Por tanto, la implementación de un sistema automatizado es crucial para mantener las variables del proceso, como la temperatura, dentro de rangos óptimos, maximizando el rendimiento y la eficiencia en la producción. En este contexto, se hace necesaria la instalación de un sistema automatizado que permita el monitoreo y ajuste en tiempo real de las variables críticas. Esto reduciría los riesgos de fluctuaciones térmicas y permitiría un uso más eficiente de la energía, alineando el proyecto con los principios de sostenibilidad. Con base en estas necesidades, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se podría automatizar un reactor anaeróbico para la producción de PLA, de manera que permita controlar variables esenciales, como la temperatura, el nivel y el oxígeno, y así mejorar el rendimiento, la calidad y la eficiencia del proceso?



Justificación

La automatización de procesos es una estrategia clave para mejorar la eficiencia, reducir tiempos y minimizar costos en proyectos tanto industriales como domésticos. Su aplicación es casi ilimitada, lo que ha impulsado a más empresas a implementar sistemas de control automáticos. Este enfoque proporciona beneficios en productividad y ahorro, ya que las máquinas tienen menos errores que los humanos (Serna, 2003). Además, invertir en automatización puede ser más rentable que los costos asociados a la mano de obra, ya que las máquinas pueden operar de manera continua sin interrupciones. Para los ejecutivos, resulta a menudo más eficiente utilizar máquinas en lugar de empleados, ya que las máquinas no enfrentan problemas personales que puedan afectar su desempeño (La república, 2014).

El ácido poliláctico (PLA) es un biopolímero producido a partir de ácido láctico, obtenido mediante fermentación anaeróbica o síntesis química de carbohidratos. Su capacidad para degradarse en condiciones de compostaje sin dejar microplásticos ni metales pesados lo convierte en una alternativa ecológica a los plásticos convencionales. Además, al provenir de recursos renovables, reduce la dependencia de combustibles fósiles. Su apariencia es similar a la de los plásticos tradicionales, lo que permite su uso en procesos industriales existentes sin necesidad de ajustes (Selma, 2024).

El PLA, material principal de este reactor, se destaca por su versatilidad en varias industrias. En el sector textil, es valorado por su durabilidad y sostenibilidad en tejidos de muebles; en medicina, se emplea en implantes y suturas por su biocompatibilidad. También es popular en impresión 3D para filamentos de bajo impacto ambiental y en embalaje, especialmente en alimentos, donde



produce bandejas y botellas sostenibles. La incorporación del PLA en estas áreas refuerza su rol como alternativa ecológica a los plásticos convencionales, favoreciendo una economía circular (Selma, 2024).

La automatización de un reactor anaeróbico en cuanto a las variables de nivel y temperatura es crucial para mejorar la eficiencia en la producción de biogás y otros derivados de la biomasa. Controlar la temperatura de manera precisa es esencial, ya que los microorganismos que llevan a cabo la degradación anaeróbica funcionan mejor dentro de un rango específico de temperaturas. Al automatizar este control y mantener la temperatura dentro de los límites óptimos, se garantiza un rendimiento eficiente del reactor, aumentando la velocidad y la calidad del proceso de fermentación y, en consecuencia, la producción de biogás (Sudiartha, 2023).

Asimismo, la automatización del nivel del reactor es de suma relevancia. Un control adecuado del nivel de los líquidos y sólidos dentro del reactor asegura que la cantidad correcta de sustratos y biomasa permanezca en el sistema, evitando problemas como sobrecargas o deficiencias que podrían afectar su operación. Al automatizar este proceso, se puede controlar el tiempo de retención de los materiales, lo que permite maximizar la producción de biogás y minimizar las posibles interrupciones en el sistema (Sudiartha, 2023).

En resumen, automatizar estas variables no solo optimiza el funcionamiento del reactor, sino que también reduce la necesidad de intervención humana, disminuyendo la posibilidad de errores. Esto permite que el reactor funcione de manera constante y eficiente, lo que, en términos económicos, se traduce en un uso más eficiente de la energía y los recursos, haciéndolo más sostenible y rentable a largo plazo



Análisis de requerimientos

El proyecto de automatización del reactor anaeróbico en la Universidad Ean se centra en lograr los objetivos de manera puntual y en cumplir con los requisitos funcionales definidos, minimizando ajustes de diseño en fases finales y asegurando el cumplimiento de todas las especificaciones técnicas.

La iniciativa tiene como propósito desarrollar un sistema completo para la automatización del control y monitoreo de variables clave en un reactor anaeróbico, tales como temperatura, nivel de líquido y oxígeno disuelto, con el fin de optimizar la producción de ácido poliláctico (PLA). La meta es crear un sistema que permita obtener mediciones precisas, reducir la intervención manual, disminuir los costos de operación y minimizar errores humanos. Esto permitirá que los operadores mantengan el reactor en condiciones óptimas, mejorando tanto la eficiencia del proceso como la calidad del PLA producido.

La temperatura es una de las variables más importantes para el proceso anaeróbico, y para su control se emplearán sensores de alta precisión, como termopares, que suministran datos en tiempo real. Los ajustes de temperatura se realizarán automáticamente mediante algoritmos de control que regulan el sistema de calefacción o enfriamiento según los datos obtenidos. Además, se implementará un sistema automatizado para monitorear el nivel de líquido, otra variable crítica para la estabilidad del proceso. La solución se basará en microcontroladores que procesarán la información de los sensores y harán ajustes en tiempo real, manteniendo las condiciones del reactor en los valores establecidos, y generarán alertas en caso de que las variables se desvíen de los límites predeterminados.



Asimismo, se ha calculado la potencia necesaria para operar los sensores y elementos de control, asegurando un consumo energético eficiente que no impacte de manera significativa en el presupuesto del laboratorio. En cuanto a precisión, el sistema deberá mantener la temperatura dentro de un margen de $\pm 0,5$ °C y controlar con exactitud el nivel de líquido para asegurar la estabilidad del proceso anaeróbico.

El sistema también debe responder rápidamente a cambios en temperatura y nivel, evitando que el reactor sobrepase los límites operativos. Este enfoque técnico sienta las bases para un diseño eficiente, asegurando que el reactor anaeróbico cumpla con los requisitos de la Universidad Ean y permita una operación confiable y optimizada.



Marco de referencia

El desarrollo y uso del ácido poliláctico (PLA) está vinculado a la investigación de materiales sostenibles. Torres Cárdenas (2019) describe un proceso para producir PLA fermentando ácido láctico en un biorreactor utilizando cepas bacterianas como *Lactobacillus casei* y *Staphylococcus aureus*. Este enfoque biotecnológico utiliza cepas de bacterias anaeróbicas para convertir fuentes biológicas en ácido láctico, que luego se esterifica en lactida y luego, mediante un proceso de polimerización con apertura de anillo (ROP), en PLA, un ácido biodegradable.

Por otro lado, Campozano Mendoza y Riera (2022) discuten la producción y uso del PLA desde una perspectiva más amplia, enfatizando su papel en la economía circular y su potencial para sustituir a los polímeros sintéticos, así como su impacto en la sostenibilidad ambiental y económica.

Según este estudio, Loor Ch et al. (2023) desarrollaron un reactor químico especial para la producción de PLA a partir de ácido láctico para resolver los problemas ambientales asociados con los plásticos convencionales. Su diseño también utiliza el método ROP para sintetizar PLA, destacando la importancia de este polímero biodegradable como alternativa sostenible a los plásticos derivados del petróleo y optimizando los procesos de fabricación.

Murillo Varón (2008) también se suma a esta discusión, explorando el desarrollo del PLA como una alternativa biodegradable, enfatizando sus aplicaciones biomédicas y su importancia en la mitigación de los problemas ambientales asociados a los plásticos convencionales.

Swetha et al. (2023) ofrecen una revisión sobre la producción de ácido poliláctico (PLA) biodegradable a partir de residuos alimentarios fermentativos en su artículo "A review on biodegradable polylactic acid (PLA) production from fermentative food waste - Its applications and degradation". El artículo explora las aplicaciones del PLA en diversas industrias y su



comportamiento en términos de degradación, subrayando tanto los beneficios ecológicos como los desafíos en la implementación de PLA como alternativa a los plásticos convencionales (Swetha, Ananthi, Bora, Sengottuvelan, Ponnuchamy, Muthusamy, & Arun, 2023).

Siguiendo estos estudios, Castro Gómez y Vera Calderón (2012) se centraron en el diseño de reactores para la producción de PLA combinando modelado cinético, dimensionamiento de reactores y simulación de fluidos con herramientas como COMSOL Multiphysics. Este enfoque proporciona información detallada sobre la optimización de los procesos de fabricación de PLA.

De igual forma, Rosales y Cordón (2018) estudiaron la viabilidad económica del PLA en Guatemala, proponiendo usar caña de azúcar como materia prima y evaluando la viabilidad económica de establecer instalaciones de producción local y global.

Rezvani Ghomi et al. (2021) abordan la evaluación del ciclo de vida del ácido poliláctico (PLA) en su artículo "The life cycle assessment for polylactic acid (PLA) to make it a low-carbon material". Los autores realizan un análisis exhaustivo para identificar las etapas del ciclo de vida del PLA que impactan su huella de carbono y proponen estrategias para reducir este impacto, con el objetivo de convertir al PLA en un material de bajo carbono.

McKeown y Jones (2020) revisan el reciclaje químico del ácido poliláctico (PLA) en su artículo "The chemical recycling of PLA: A review". El artículo examina las diferentes técnicas y métodos para reciclar químicamente el PLA, un plástico biodegradable, con el objetivo de recuperar monómeros o transformarlo en nuevos productos. Los autores discuten la viabilidad y eficiencia de estos métodos de reciclaje, así como los desafíos asociados con su implementación.

Ortega-Yago et al. (2024) investigan la resistencia mecánica de matrices óseas de ácido poliláctico (PLA) creadas mediante impresión 3D para la reconstrucción de defectos óseos en su artículo "Resistencia mecánica de matrices óseas de ácido poliláctico desarrolladas por impresión 3D para



la reconstrucción de defectos óseos". El estudio evalúa cómo las matrices de PLA, fabricadas con técnicas de impresión 3D, pueden soportar las cargas mecánicas en aplicaciones ortopédicas y su efectividad en la reparación de defectos óseos.

Murillo et al. (2023) investigan la fabricación de filamentos para impresión 3D utilizando ácido poliláctico (PLA) comercial y reciclado, con residuos de café en su artículo "Fabricación de filamentos de impresión 3D con ácido poliláctico comercial y reciclado rellenos con residuos de café". El estudio aborda cómo estos filamentos, hechos de PLA mezclado con residuos de café, pueden ofrecer una alternativa más sostenible y ecológica para la impresión 3D.

Con respecto a la automatización de procesos relacionados, Donoso Millingalli e IpiALES Pupiales (2009) han estudiado el diseño e implementación de sistemas de automatización de reactores químicos para mejorar la precisión y eficiencia del proceso utilizando interfaces HMI y PLC.

Este enfoque de la automatización también se observó en el trabajo de Esteven Daniel Acosta Campoverde (2017), quien propuso un sistema de automatización de la producción de yogurt basado en PLC y HMI que optimiza el uso de recursos y aumenta la eficiencia del proceso. Jovanović, Đurić y Šibalija (2018) proporcionan una visión general sobre la automatización de Procesos Robóticos (RPA) y sus oportunidades en el artículo "Robotic process automation: overview and opportunities". Los autores destacan que RPA se está convirtiendo en una herramienta clave para mejorar la eficiencia operativa en diversas industrias al automatizar tareas repetitivas y basadas en reglas.

Jämsä-Jounela (2007) analiza las tendencias futuras en la automatización de procesos en el



artículo "Future trends in process automation". El autor examina cómo la evolución tecnológica está configurando el futuro de la automatización, destacando el avance hacia sistemas más integrados y adaptativos.

Los autores analizan cómo la integración de RPA e IA está transformando los procesos industriales al mejorar la eficiencia, reducir errores y permitir una mayor flexibilidad en la producción. La revisión también aborda los desafíos y las oportunidades que estas tecnologías presentan para las empresas, destacando la necesidad de una implementación estratégica para maximizar los beneficios y enfrentar las barreras asociadas (Ribeiro, Lima, Eckhardt, & Paiva, 2021).

Segun Li, Liu, Yang (2021) La encapsulación de microorganismos para lograr nitrificación y desnitrificación simultáneas en reactores aeróbicos en su artículo "Encapsulation of microorganisms for simultaneous nitrification and denitrification in aerobic reactors". Los autores detallan cómo la encapsulación de microorganismos en matrices específicas permite realizar ambos procesos biológicos en un solo reactor, mejorando la eficiencia del tratamiento de aguas residuales. El estudio demuestra que esta técnica no solo optimiza la eliminación de nitrógeno, sino que también facilita una gestión más efectiva y estable de los reactores aeróbicos

Los autores examinan diversas tecnologías de sensores que permiten la monitorización continua y precisa de condiciones dentro de reactores de flujo, como temperatura, presión y concentración de reactivos. La revisión destaca cómo estos sensores in situ mejoran la precisión del control de procesos y la eficiencia operativa, además de abordar los retos asociados con su implementación, como la integración con sistemas existentes y la durabilidad en entornos reactivos Li (2021).



Neves et al. (2016) investigan el arranque de un reactor anaeróbico a baffled en serie con un reactor anaeróbico de lodo en suspensión en su artículo "Start-up of anaerobic baffled reactor in series with upflow anaerobic sludge blanket reactor reactors, using parameters of sedimentation for formation of sludge". El estudio se centra en cómo se pueden usar parámetros de sedimentación para optimizar la formación de lodo en estos sistemas combinados. Los autores analizan la eficiencia de este enfoque en la estabilización y el rendimiento de los reactores anaeróbicos, destacando las ventajas del uso de estos parámetros para mejorar el proceso de tratamiento de aguas residuales.

Kabeyi y Olanrewaju (2022) exploran la producción de biogás y sus aplicaciones en el contexto de la transición hacia una energía sostenible en su artículo "Biogas production and applications in the sustainable energy transition". Los autores revisan los métodos actuales para producir biogás a partir de residuos orgánicos y discuten cómo este biogás puede ser utilizado como una fuente de energía renovable para apoyar la transición hacia un sistema energético más sostenible.

Loaces et al. (2015) exploran la mejora de la conversión de glicerol a etanol utilizando *E. coli* con un fragmento metagenómico aislado de un reactor anaeróbico en su artículo "Improved glycerol to ethanol conversion by *E. coli* using a metagenomic fragment isolated from an anaerobic reactor". El estudio investiga cómo la incorporación de un fragmento metagenómico específico, obtenido de un entorno anaeróbico, puede aumentar la eficiencia de *E. coli* en la conversión de glicerol en etanol.

Syed Shuja et al. (2024) realizan una revisión exhaustiva sobre la mejora de reactores de secuenciación por lotes para tratamiento de aguas residuales en su libro "Enhancing sequencing batch reactors for efficient wastewater treatment across diverse applications: A comprehensive



review”. El libro examina las tecnologías y metodologías para optimizar el rendimiento de los reactores de secuenciación por lotes en diversas aplicaciones de tratamiento de aguas residuales.

Además, Méndez-Alba et al. (2017) se centraron en la producción de ácido láctico en la industria azucarera utilizando simulaciones ASPEN PLUS para evaluar la viabilidad del proceso desde el pretratamiento hasta la fermentación, con énfasis en el uso de subproductos industriales.

García James et al. (2023) y Pachón Hernández y Pinilla Murcia (2013) también analizan la automatización en sus respectivos campos; (2023) utilizaron control de temperatura en un reactor discontinuo de biopolímero, mientras que Pachón Hernández y Pinilla Murcia (2013) desarrollaron un sistema de control para reactores anaeróbicos utilizando software como LabView y Matlab para mejorar el tratamiento de aguas residuales en curtidurías.

En un contexto relacionado, la investigación de Ronquillo (2023) se centra en modelar el proceso anaeróbico de producción de biogás a partir de residuos municipales. Se ha demostrado que la digestión anaeróbica es un método eficaz de tratamiento de residuos orgánicos y producción de metano. Utilizando modelos matemáticos y simulaciones en MATLAB, la producción promedio de metano fue de 606,44 m³/día, la producción de biogás fue de 932,99 m³/día y la concentración de metano fue del 65%.

El artículo de Tamayo sigue un enfoque similar, centrándose en el modelado y control de reactores UASB utilizando un modelo matemático adaptado de un reactor de tanque agitado continuo (CSTR) y proponiendo un controlador de temperatura proporcional. eliminación de materia orgánica mediante verificación por simulación.

Así mismo, el proyecto Montes de Oca de García (2021) se enfoca en la automatización del control de temperatura en la producción de cerveza artesanal siguiendo métodos tradicionales en procesos en cascada y HMI.



En el libro *Automation and the Future of Work*, Benanav (2020) explora cómo la automatización está transformando el panorama laboral y las implicaciones futuras para los trabajadores y la economía en general. Benanav argumenta que, aunque la automatización promete aumentar la eficiencia y reducir costos, también plantea desafíos significativos, como la posible pérdida de empleos y la creciente desigualdad económica.

El artículo titulado "Análisis del nivel de automatismo de sistemas robóticos en la industria nuclear" (2023) examina cómo la automatización y los sistemas robóticos están siendo implementados en la industria nuclear. El estudio analiza los niveles de automatismo alcanzados en esta industria, destacando las ventajas de estos sistemas en cuanto a seguridad y eficiencia operativa.

Adicional el estudio realizado por Jhonny Pérez, Gerardo Aldana y Carmen Cárdenas evaluó la eficiencia de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) operando a 30°C, alimentado con glucosa a concentraciones de 500 mg/L. Se analizó el impacto de la carga orgánica volumétrica y el tiempo de retención hidráulico, alcanzando una eficiencia de eliminación de DQO de 86,87% con una edad del lodo de 165 días. Los coeficientes cinéticos obtenidos permitieron predecir el rendimiento del reactor con un error estándar del 1,88%.

Por su parte, Åström y Hägglund amplían los fundamentos de los controladores PID básicos integrando técnicas avanzadas como la sintonía automática, la planificación y la adaptación de ganancia. Su trabajo proporciona una comprensión práctica y profunda para implementar características que optimizan el rendimiento del sistema, mejorando su precisión, estabilidad y capacidad de respuesta. Por otro lado, Johnson y Moradi, en **PID Control**, abordan la efectividad de estos controladores en la industria y su evolución académica, organizando métodos desde enfoques sin modelo hasta técnicas predictivas y multivariadas, destacando los



avances en la sintonización y aplicación de los PID. Ambas perspectivas complementan el marco teórico al ofrecer bases sólidas y técnicas avanzadas para el diseño y control de sistemas.



Análisis de Restricciones

En el desarrollo del proyecto de automatización para el control de temperatura, nivel y oxígeno en un reactor para la producción de ácido poliláctico (PLA), se han identificado diversas limitaciones que podrían restringir su implementación total, pero que también ofrecen la oportunidad de mejorar y avanzar en el proceso.

Restricciones económicas: Un desafío clave es el costo de los sensores necesarios para automatizar el nivel del reactor. Aunque ya se dispone de termocuplas y sensores de pH, los sensores adicionales necesarios son caros y escasos. No obstante, este obstáculo económico no detendrá el proyecto. Se buscarán soluciones más accesibles y alternativas técnicas para continuar con el diseño sin comprometer la efectividad del sistema a largo plazo.

Restricciones técnicas: Aunque la integración de sensores industriales requiere habilidades especializadas, y el equipo aún carece de experiencia suficiente en este ámbito, esta limitación no se considera insuperable. A medida que el proyecto avance, se tendrá la oportunidad de adquirir estos conocimientos y mejorar la experiencia en la integración de sensores. Aunque el equipo puede controlar la temperatura mediante las termocuplas, la automatización del nivel aún está en desarrollo debido a esta limitación. Este reto se abordará a través de formación y colaboración con expertos.

Restricciones de seguridad y salud: Las normativas de seguridad son esenciales cuando se trabaja con reactores anaeróbicos, debido a los riesgos asociados con la exposición a gases y productos químicos peligrosos. La Ley 9 de 1979 y la Resolución 2400 de 1979 imponen requisitos estrictos sobre la seguridad industrial y el manejo adecuado de equipos. A pesar de estas restricciones, ofrecen la oportunidad de garantizar que el diseño del sistema automatizado cumpla



con las mejores prácticas de seguridad, creando un entorno de trabajo más seguro para los operadores. Se implementarán medidas para cumplir con las normativas, promoviendo así la seguridad laboral.

Aunque estas restricciones presentan retos adicionales, el proyecto sigue adelante y está diseñado para hacer una contribución significativa a la mejora del proceso de producción de PLA. Aunque las limitaciones actuales podrían afectar la implementación total, el trabajo realizado en la fase de diseño establecerá las bases para futuras mejoras, superando los obstáculos conforme se obtengan más recursos y conocimientos técnicos. Este enfoque permitirá avanzar con un plan detallado que optimice los recursos disponibles, facilitando el desarrollo de un sistema de automatización eficiente, seguro y con un impacto positivo en la producción de PLA.



Diagnóstico del Sistema Actual del Reactor

Control de Temperatura: El reactor cuenta con un controlador, el cual es el componente encargado de regular la temperatura del sistema. Sin embargo, se la termocupla no está en uso en el sistema, lo que significa que el controlador PID no tiene una medición precisa de la temperatura interna del reactor. Además, la ausencia de un sensor de temperatura adecuado impide que el sistema ajuste de manera precisa la temperatura del reactor, afectando la estabilidad del proceso.



Figura 1



Figura 2



Figura 3

Control de Nivel: Actualmente, el reactor dispone únicamente de un indicador de nivel, lo que proporciona una visualización del nivel del fluido, pero no permite la automatización del control. Este indicador no tiene la capacidad de regular el nivel de manera activa, por lo que el sistema no puede realizar ajustes automáticos para mantener el nivel dentro de los parámetros definidos. No hay sensores de nivel instalados, ni un sistema que controle la entrada o salida de fluido basado en el nivel medido. Además, el reactor está equipado con una válvula de bola para vaciar el tanque, lo que implica que el vaciado del fluido se realiza de manera manual. No existe automatización en el vaciado o control de sobrellenado, lo que podría afectar la eficiencia del proceso.



Figura 4



Control de Agitación: El reactor tiene un motor que se encarga de agitar el contenido interno. Este motor está siendo controlado por un PLC, lo que permite que el sistema gestione la agitación del reactor de manera efectiva. Sin embargo, no existe un sistema de monitoreo o control de la velocidad de agitación, lo que podría ser una limitación en cuanto a la precisión del proceso de mezcla. Aunque el motor parece funcionar correctamente, no se dispone de información detallada sobre su eficiencia o la capacidad del PLC para manejar el control en diversas condiciones operativas.



Figura 5



Figura 6



Figura 7



Control de Oxígeno: El sistema actual no cuenta con ningún mecanismo para monitorear o controlar los niveles de oxígeno dentro del reactor. El oxígeno es un parámetro crítico en muchos procesos químicos y biológicos, y su control es necesario para asegurar una reacción óptima. La ausencia de un sistema para controlar el oxígeno puede generar condiciones inestables dentro del reactor, afectando la calidad y eficiencia del proceso de producción.



Figura 8



Figura 9



Figura 10

Metodología para la selección y desarrollo de la solución

Este proyecto no contempla soluciones incoherentes o ilógicas dentro del diseño propuesto. Es fundamental realizar una selección minuciosa y detallada de los sensores y componentes electrónicos para la creación del diseño. Esta selección no solo se debe basar en la funcionalidad, que es el aspecto más relevante, sino también en factores como el costo y el uso previsto. No todos los sensores serán adecuados para una futura implementación, especialmente si consideramos aspectos relacionados con la medición, la transferencia de información a bases de datos o la forma en que el controlador implementado en el reactor requiere recibir y procesar la información.

En la actualidad, la mayoría de los reactores permiten cierto grado de uso bajo estándares de automatización. Sin embargo, la automatización completa de estos equipos puede ser costosa, como se evidencia en los reactores ya ensamblados que se encuentran en el mercado. Existe una diferencia considerable en los costos entre aquellos con procesos automatizados y los que operan



de manera completamente manual. Esta diferencia de precios es notable y afecta las decisiones de adquisición o implementación de estos equipos. (1)

En comparación con estos reactores preensamblados, no se puede definir de manera categórica si un sistema automatizado es necesariamente mejor o peor que uno manual. Ambos enfoques tienen ventajas según el contexto de uso. Existen reactores en los que todas las variables se controlan manualmente con éxito, mientras que otros gestionan todas sus variables de forma totalmente automatizada. En este proyecto, no se pretende comparar ambos enfoques de manera directa, ya que el diseño se centrará en la automatización de variables específicas, como la temperatura y el nivel, dejando otras variables fuera de control automatizado. Así, el objetivo es proponer una solución que sea efectiva y precisa para las necesidades puntuales del reactor, sin intentar cubrir la totalidad del espectro de control automatizado de un sistema completo.

Esta visión más focalizada garantiza que el proyecto se mantenga dentro de los límites técnicos y económicos, proporcionando una solución viable para un sistema que podría expandirse a futuro.

Diseño de control de nivel:

Componentes:

Sensor ultrasónico (Modelo 7ML5201-0FA0 Siemens)



Figura 11 Sensor ultrasónico

Este sensor ultrasónico es una excelente elección para la medición de nivel en sistemas de automatización debido a su precisión, fiabilidad y facilidad de integración en sistemas industriales.

Hay distintas razones para elegir este sensor:

1. **Precisión y fiabilidad:** Este sensor es conocido por su alta precisión en la medición de distancias, lo que permite obtener datos más exactos del nivel de líquido en el reactor. La precisión es fundamental en procesos industriales donde la variabilidad del nivel puede afectar la calidad y la eficiencia de la producción. Siemens, como fabricante, garantiza un producto confiable.
2. **Rango de medición adecuado:** Este sensor tiene un rango de medición que se adapta a distintas aplicaciones de monitoreo de nivel, desde líquidos hasta sólidos. Su capacidad de medir distancias de forma eficiente lo convierte en una buena opción para el control de nivel en tanques y reactores de diferentes tamaños.
3. **Tecnología de ultrasonido:** Los sensores ultrasónicos son adecuados para mediciones sin contacto, lo que minimiza el desgaste mecánico y reduce la necesidad de mantenimiento frecuente.



4. **Resistencia en entornos industriales:** El sensor está diseñado para resistir condiciones como altas temperaturas, humedad y presencia de vapores. Esto lo hace ideal para aplicaciones en procesos industriales donde las condiciones pueden ser cambiantes y exigentes.

5. **Facilidad de integración:** Este modelo es compatible con sistemas de automatización industriales, lo que facilita su integración con controladores como PLCs o microcontroladores como el Arduino. Además, cuenta con salida analógica y digital, lo que permite flexibilidad en su implementación, adaptándose tanto a sistemas de control simples como a sistemas más complejos.

Sensor de radar (Modelos VEGAPULS 31 o VEGAPULS 6X)



Figura 12 Vegaplus 31



Figura 13 Vegapuls 6X

Los sensores de radar como el VEGAPULS 31 y el VEGAPULS 6X son una muy buena opción en cuanto a aplicaciones industriales debido a su alta precisión, robustez y adaptabilidad a condiciones extremas. Hay distintas razones para elegir este sensor:

1. Alta Precisión y Estabilidad

Los sensores de radar como los VEGAPULS 31 y VEGAPULS 6X ofrecen mediciones altamente precisas incluso en condiciones complejas. Esto es importante, ya que permite una medición confiable del nivel en un reactor o tanque industrial, lo cual puede ser crítico para el funcionamiento óptimo del proceso. A diferencia de los sensores ultrasónicos, que pueden verse afectados por condiciones como vapor, espuma o temperatura, los sensores de radar funcionan sin contacto.

2. Rango de Medición Extendido

El VEGAPULS 31 tiene un rango de medición de hasta 30 metros, y el VEGAPULS 6X puede llegar hasta 70 metros. Esto hace que estos sensores sean ideales para aplicaciones con grandes volúmenes o tanques de gran altura. Un sensor con este rango de medición asegura que no se tendrán limitaciones por distancia y garantizarás mediciones



precisas a lo largo del sistema.

3. Condiciones Extremas

Estos sensores están diseñados para operar en condiciones industriales, como altas temperaturas, alta presión, y en ambientes con presencia de polvo o vapor. Dado que los VEGAPULS 31 y VEGAPULS 6X no tienen partes móviles y utilizan ondas de radar para realizar mediciones, son menos susceptibles al desgaste o a fallos mecánicos.

4. Baja Susceptibilidad a Interferencias

Los VEGAPULS 31 y VEGAPULS 6X utilizan tecnología de radar que es menos susceptible a interferencias, como las generadas por cambios de temperatura, presión o la presencia de vapores. En comparación con los sensores ultrasónicos, los sensores de radar garantizan mediciones consistentes y fiables, incluso cuando el entorno es agresivo.

5. Alta Precisión y Estabilidad en un Sistema PID

Los sensores de radar como el VEGAPULS 31 y el VEGAPULS 6X son ideales para aplicaciones que requieren mediciones de nivel precisas y continuas, lo cual es crucial para un sistema PID. El control PID se basa en la retroalimentación continua y precisa de la medición del nivel para ajustar la salida de la bomba o válvula en tiempo real. Esto mejora la eficiencia y estabilidad del control PID, permitiendo que el sistema ajuste las variables de manera más exacta y constante.

6. Medición Continua y Compatibilidad con el Control PID

El control PID depende de mediciones continuas y estables para generar una respuesta adecuada. Los VEGAPULS 31 y VEGAPULS 6X pueden proporcionar



mediciones en tiempo real con alta frecuencia, lo que los hace perfectos para trabajar con sistemas de control PID. En comparación con los sensores On/Off, que solo dan una lectura aproximada del nivel, los sensores de radar permiten una medición precisa lo que proporciona al controlador PID datos confiables para hacer ajustes precisos al sistema.

Válvula solenoide PARKER 3768317 24 V:



Figura 14 Válvula solenoide

1. Fiabilidad y Durabilidad

Parker es una marca reconocida mundialmente por la calidad de sus productos, especialmente en sistemas industriales y de control de fluidos. Las válvulas solenoides de Parker están diseñadas para ser altamente duraderas.

2. Control Preciso

La válvula está diseñada para ofrecer un control preciso y rápido del flujo de fluidos. Esto es ideal para aplicaciones donde el flujo de entrada o salida debe ser regulado de forma eficiente para mantener el nivel deseado del líquido.



3. Voltaje y Potencia

Esta válvula opera a 24V, un voltaje que es adecuado para aplicaciones industriales, esto brinda una mayor capacidad de control. El voltaje de 24V es comúnmente usado en sistemas automáticos, asegurando que la válvula funcione correctamente sin riesgos de sobrecalentamiento, además de ofrecer una buena relación entre consumo de energía y eficiencia operativa.

4. Adaptabilidad a Condiciones de Trabajo

Es adecuada para trabajar con agua y otros líquidos no corrosivos, lo que la hace adecuada para el reactor, donde se utilizarán líquidos como el agua o el ácido poliláctico en su proceso. Además, estas válvulas pueden funcionar en una variedad de entornos industriales con condiciones de presión y temperatura controladas.

5. Mantenimiento y Disponibilidad

Al ser de una marca ampliamente utilizada, hace que sea fácil de mantener y que se puedan conseguir repuestos o asistencia técnica en caso de ser necesario. La disponibilidad de repuestos y el soporte de Parker aseguran que el sistema siga funcionando sin problemas a lo largo del tiempo.

6. Costo-beneficio

Aunque puede ser más cara que opciones de marcas desconocidas, la calidad de esta justifica el precio, ya que ofrece una mayor fiabilidad y vida útil, lo que a largo plazo puede ahorrar costos de mantenimiento y reemplazo de componentes defectuosos.



Bomba Eléctrica Centrífuga Acero Inoxidable Norma Aisi304 1hp:



Figura 15 Bomba eléctrica

Usar una bomba centrífuga de acero inoxidable tiene distintas ventajas. Por ejemplo:

1. Resistencia a la Corrosión

- El acero inoxidable es altamente resistente a la corrosión, lo que lo convierte en el material ideal para trabajar con líquidos agresivos o corrosivos, como el ácido poliláctico.
- Este material asegura que la bomba mantenga su integridad durante todo el proceso de producción, evitando costosos reemplazos y mantenimiento.

2. Durabilidad y Larga Vida Útil

- Las bombas de acero inoxidable son extremadamente duraderas debido a su resistencia a la abrasión, la corrosión y el desgaste general.
- Además, reducen el riesgo de fugas o fallos mecánicos, lo que es ideal para mantener la seguridad del sistema.



3. Compatibilidad con líquidos

- Las bombas de acero inoxidable no solo son adecuadas para trabajar con ácidos, sino también con otros líquidos químicos, disolventes, bases y fluidos industriales.
- El acero inoxidable es compatible distintos líquidos, lo que da flexibilidad en caso de que necesites ajustar el tipo de fluido en tu reactor en el futuro sin tener que cambiar la bomba.

5. Fácil Mantenimiento

- Las bombas de acero inoxidable requieren menos mantenimiento. Esto se debe a que no sufren tanto daño por la exposición a productos químicos agresivos o por la fricción interna del fluido. La vida útil prolongada también significa que las piezas de repuesto son menos frecuentes y costosas a largo plazo.

Diagrama P&ID:

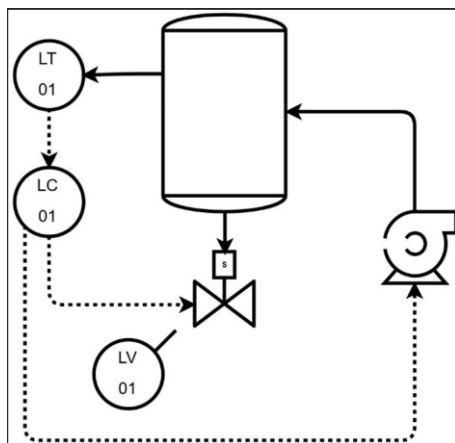


Figura 16



En este caso se usó un software virtual llamado VisualParadim Online en el que se especifican los datos como:

LT= Se refiere a Level Transmitter (Transmisor de nivel), este es el encargado de medir el nivel del líquido en el reactor y transmite los datos al respectivo controlador. En este caso el LT sería el respectivo sensor (Ultrasonido, radar)

LC= Se refiere a Level Controller (Controlador de nivel), este es el que se encarga de recibir la señal del LT (Transmisor de nivel) y usa esta información para controlar el nivel en el tanque con la válvula o la bomba. En este caso el LC sería el Arduino

LV=Se refiere a Level Valve (Valvula de nivel), este es un dispositivo de control que se utiliza para regular el nivel de un fluido dentro del tanque, funciona en relacion a los datos obtenidos por los sensores (LT). En este caso el LV sería la valvula solenoide

Simulación en Tinkercad:

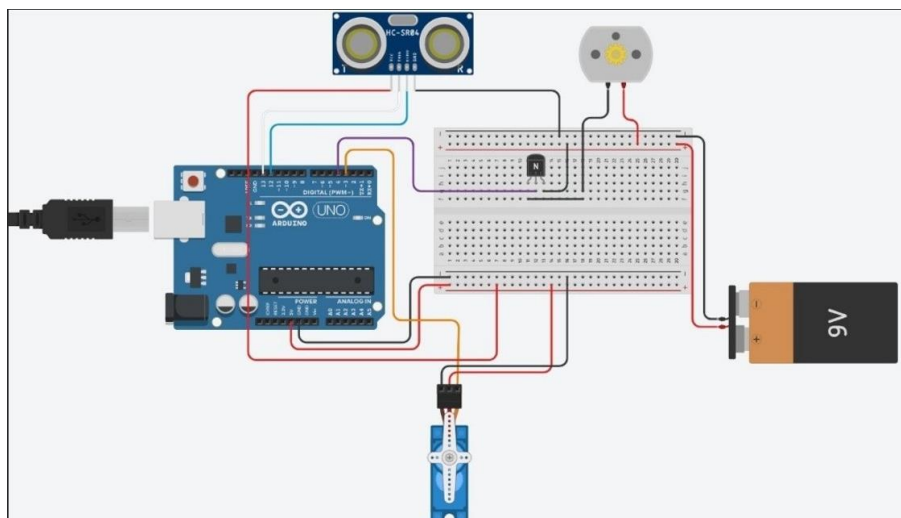


Figura 17



Tinkercad no cuenta con componentes necesarios para el proyecto del reactor, sin embargo, consideramos usar los siguientes componentes para la simulación:

Arduino R3, Board, Transistor NPN, Servomotor (Simulando la válvula), Motor DC (Simulando la bomba de agua), Sensor HC-SR04 (Simulando el sensor ultrasónico o de radar) mFuente de voltaje (En este caso de 9V)

Código

```
#include <Servo.h>

// Definir pines
#define trigPin 13
#define echoPin 12
#define motorPin 4
#define servoPin 9

// Definir las constantes PID
float Kp = 6.0; // Constante proporcional
float Ki = 0.2; // Constante integral
float Kd = 0.3; // Constante derivativa

// Variables PID
float setpoint = 30.0; // Nivel deseado (en cm)
float input, output;
float error, previousError = 0;
float integral = 0;
float derivative;

// Crear objeto Servo para controlar la válvula solenoide
Servo myServo;
```

Figura 18

```
void setup() {
  // Inicialización de pines
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  pinMode(motorPin, OUTPUT);

  // Iniciar comunicación serial
  Serial.begin(9600);

  // Iniciar el servomotor
  myServo.attach(servoPin);

  // Iniciar la válvula en una posición inicial (0 grados)
  myServo.write(0);
}
```

Figura 19



```
void loop() {
  // Leer la distancia desde el sensor ultrasónico
  input = readDistance();
  Serial.print("Distancia medida: ");
  Serial.print(input);
  Serial.println(" cm");

  // Calcular el error
  error = setpoint - input;
  // Calcular la integral y el derivativo
  integral += error;
  derivative = error - previousError;
  // Calcular la salida PID
  output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative;

  // Controlar la bomba (motor DC) en función de la salida PID
  controlMotor(output);

  // Controlar la válvula (servomotor) en función de la salida PID
  controlValve(output);

  // Actualizar el error previo para la siguiente iteración
  previousError = error;
  // Retardo de tiempo para estabilizar el sistema
  delay(100);
}
```

Figura 20

```
// Función para leer la distancia del sensor ultrasónico
float readDistance() {
  long duration, distance;

  // Enviar pulso al trigPin
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);

  // Leer la duración del eco
  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

  // Calcular la distancia (en cm)
  distance = duration * 0.0344 / 2;

  return (float)distance;
}
```

Figura 21

```
// Función para controlar el motor DC (bomba de agua)
void controlMotor(float controlOutput) {
  // Restringir el valor de salida PID entre 0 y 255 (valor para PWM)
  int motorSpeed = constrain(controlOutput, 0, 255);

  // Controlar la velocidad del motor (bomba de agua)
  analogWrite(motorPin, motorSpeed);
}

// Función para controlar la válvula solenoide (servomotor)
void controlValve(float controlOutput) {
  // Restringir el valor de salida PID para controlar el servomotor (0 a 180 grados)
  int valvePosition = constrain(controlOutput, 0, 180);

  // Mover el servomotor a la posición deseada
  myServo.write(valvePosition);
}
```

Figura 22



Este código implementa un sistema de control PID para regular el nivel de un tanque utilizando un sensor ultrasónico, una bomba de agua (motor DC) y una válvula solenoide (servomotor). El código mide la distancia al nivel del agua mediante el sensor ultrasónico, calcula la desviación entre el nivel deseado y el medido, y ajusta la velocidad de la bomba y la posición de la válvula con base en los valores calculados por el controlador PID para mantener el nivel en el valor objetivo.

- **Sensor Ultrasónico:** Este sensor mide la distancia y se usa como referencia para determinar el nivel de agua.
- **Control PID:** El control PID ajusta continuamente la salida de la bomba (motor DC) y la válvula (servomotor) basándose en el error entre la distancia medida y el valor deseado (setpoint).
- **Motor y Servomotor:** La salida PID se usa para ajustar la velocidad del motor y la posición del servomotor para controlar el nivel del agua.
- **Declaración de Librerías y Definición de Pines**

Se incluye la librería Servo.h que permite controlar servomotores (en este caso, la válvula solenoide).

Se definen los pines del microcontrolador a los que se conectarán el sensor ultrasónico, el motor DC y el servomotor:

- **trigPin:** Pin de disparo del sensor ultrasónico.



- **echoPin:** Pin de eco del sensor ultrasónico.
- **motorPin:** Pin que controla el motor (bomba de agua).
- **servoPin:** Pin que controla el servomotor (válvula solenoide)

□ **Constantes PID**

- **Kp:** La constante proporcional, que ajusta la respuesta proporcional al error.
- **Ki:** La constante integral, que acumula los errores a lo largo del tiempo para corregir desviaciones persistentes.
- **Kd:** La constante derivativa, que ajusta la respuesta según el cambio en el error.

□ **Variables PID**

- **setpoint:** El nivel deseado (en cm), que es la distancia de referencia que queremos que se mantenga (ej. el nivel de agua que queremos alcanzar).
- **input:** La distancia medida por el sensor ultrasónico.
- **output:** El valor calculado por el controlador PID que se usará para ajustar el motor y la válvula.
- **error:** La diferencia entre el valor deseado (setpoint) y el valor actual (input).
- **previousError:** El error de la iteración anterior, necesario para calcular la derivada.
- **integral:** La suma acumulativa de los errores, usada en el control integral.
- **derivative:** La tasa de cambio del error, usada en el control derivativo.



□ **Configuración de pines:**

- Se configura el trigPin como salida para disparar el pulso que envía el sensor ultrasónico.
- Se configura el echoPin como entrada para recibir el pulso de eco.
- El motorPin se configura como salida para controlar el motor (bomba de agua).
- **Servo:** Se conecta el servomotor al pin definido servoPin y se posiciona inicialmente en 0 grados (válvula cerrada).
- **Serial:** Se inicializa la comunicación serial a 9600 baudios para enviar datos.

□ **Medición de la distancia:**

- Se envía un pulso de 10 microsegundos al trigPin para activar el sensor ultrasónico.
- Luego, se mide el tiempo que tarda en regresar el pulso (el eco) usando pulseIn().
- La distancia se calcula con la fórmula $distancia = \frac{duración * 0.034}{2}$, donde 0.034 es la velocidad del sonido en cm/μs.
- Se imprime la distancia medida en el monitor serial.

□ **Cálculo del error y PID:**

- Se calcula el error como la diferencia entre el setpoint y la distancia medida.
 - El valor del error se usa para calcular la integral (acumulación del error) y el derivado (cambio del error respecto al tiempo).
 - Luego, se calcula la salida del PID (output) usando las constantes Kp, Ki y Kd.



- **Control del motor y servomotor:**
 - La función `controlMotor()` ajusta la velocidad del motor en función de la salida del PID.
 - La función `controlValve()` ajusta la posición del servomotor en función de la salida del PID.
 - **Actualizar el error:** Al final de cada ciclo, se guarda el valor actual del error para usarlo en el cálculo del derivado en la próxima iteración.

- **Control del motor:**
 - La salida del PID se restringe entre 0 y 255 (valor válido para PWM).
 - La función `analogWrite()` ajusta la velocidad del motor de acuerdo con la salida calculada por el PID.

- **Control del servomotor:**
 - La salida del PID se restringe entre 0 y 180 grados (para un servomotor).
 - La función `servo.write()` mueve el servomotor a la posición calculada.

Formulas usadas

Sensor Ultrasónico

El sensor ultrasónico o de radar calcula la distancia a partir del tiempo que tarda un pulso de sonido en ir y regresar desde un objeto

$$Distancia = \frac{duracion\ del\ pulso \cdot velocidad\ del\ sonido}{2}$$



Donde la duración del pulso es el tiempo que tarda el pulso de sonido en viajar desde el sensor hasta el objeto y regresar. Teniendo en cuenta que la velocidad del sonido es $0.034 \text{ cm}/\mu\text{m}$.

Además, la fórmula para calcular la distancia en centímetros es:

$$\text{Distancia} = \frac{\text{Duracion del puslo} * 0.034}{2}$$

Formulas control PID

El control PID se basa en tres componentes: Proporcional, Integrativo, Derivativo.

Donde la formula del proporcional (P) es:

$$P = Kp * \text{error}$$

Teniendo en cuenta que Kp es la constante proporcional y el *error* es la diferencia entre el valor deseado (en el código se menciona como setpoint) y el valor actual (distancia medida).

La fórmula del integrativo (I) es:

$$I = I_{prev} + \text{error}$$

Teniendo en cuenta que I_{prev} es la integral acumulada de los errores previos y el error sigue siendo la diferencia entre el valor deseado y el valor actual

La fórmula del derivativo (D) es:

$$D = \frac{\text{error} - \text{error anterior}}{\text{tiempo}}$$

Teniendo en cuenta que el error sigue siendo la diferencia entre el valor actual y el deseado y el error anterior es el error medido en la iteración anterior.



Finalmente, la salida del control PID se calcula de la siguiente manera:

$$output = K_p * error + K_i * integral + K_d * derivativo$$

Teniendo en cuenta que el output es la señal de control que se utiliza para ajustar el motor y el servomotor. Además de que los K_p , K_i , K_d son las constantes mencionadas anteriormente.

Simulación en simulink

Simulink es un entorno de programación donde podemos modelar y simular sistemas para poder observar el comportamiento de este. En este caso lo usamos para analizar y poder definir los valores correspondientes al control PID, precisamente los valores de K_p , K_i , K_d

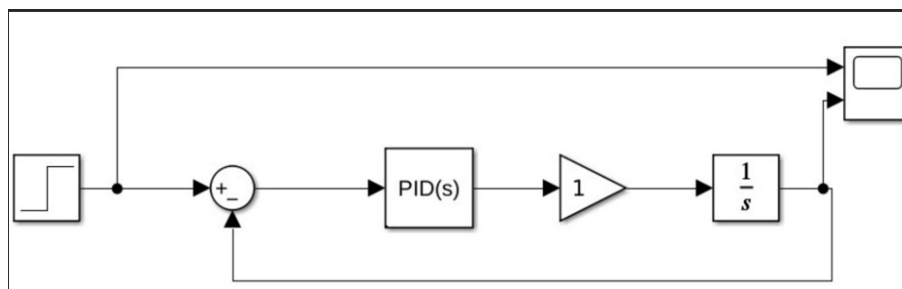


Figura 23

En esta simulación contamos con 6 componentes que cumplen funciones diferentes:

Step: Se encarga de generar una señal escalonada, que cambia de valor en el tiempo, iniciando en 0 y finalizando en 30

Sum: Se encarga de realizar una operación de suma o resta entre las señales que recibe, en este caso lo usamos para calcular el error entre el nivel deseado y el nivel actual (Salida del integrator)



PID Controller: Este bloque implementa el algoritmo PID para controlar el sistema, teniendo tres componentes, el proporcional (P) el cual ajusta la salida en función del error actual, el integrativo (I) el cual ajusta la salida en función del error acumulado, el derivativo (D) el cual ajusta la salida en función a la tasa de cambio del error. Además, se configura modificando los valores de K_p , K_i , K_d El cual determina que tan fuerte es la corrección proporcional al error, controla la acumulación de error en el tiempo y controla la velocidad de cambio de error, respectivamente.

Gain: Este bloque se encarga de multiplicar la señal de entrada por una constante, en este caso lo usamos para ajustar la salida del controlador PID y simular como responde el sistema (Por ejemplo, la velocidad de la bomba o de la válvula). Teniendo en cuenta esto, un valor mayor hace que el sistema reaccione más rápidamente y si la ganancia es baja, la salida se controla más suavemente.

Integrator: Este bloque se encarga de tomar una señal de entrada y la integra a lo largo del tiempo, simulando el comportamiento acumulativo del sistema (por ejemplo, el nivel de agua en el tanque); convierte una tasa de cambio (como la velocidad de llenado) en una cantidad acumulada (como el nivel total de agua).

Scope: Este bloque se usa para visualizar las señales en tiempo real durante la simulación. En este caso se usa para ver cómo cambia el nivel del tanque a lo largo del tiempo y ver como se acerca al nivel deseado. En este caso lo conectamos a la salida del integrator (para ver el nivel actual del tanque) y a la salida del step (para ver el nivel deseado)

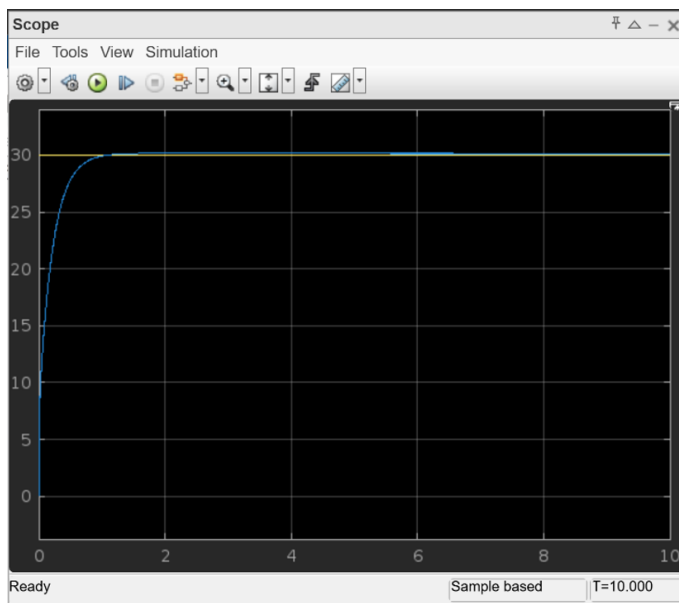


Figura 24

Podemos ver en la gráfica que se estabiliza correctamente a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta el valor deseado (Línea amarilla) y el valor actual (Línea azul).

Temperatura:

Diagrama de conexiones

Este es el diagrama de conexiones que servirá como base para hacer las conexiones directamente al reactor.

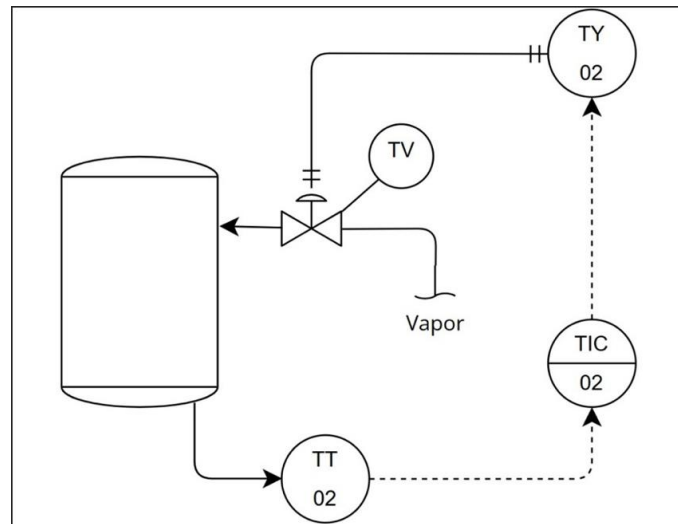


Figura 25

En este diagrama de tuberías podemos ver ciertos elementos importantes para la implementación de este:

- TV significa Temperature valvule que permite la graduación del suministro de temperatura directamente hacía el cilindro del reactor
- TY que es el relé de temperatura, que junto con el controlador se encargan de procesar los datos que este nos brinda.
- TIC significa Temperature Indicator Controller que cumple la función de manejar el control de temperatura para así mismo regular y manejar los datos que este maneje
- TT significa Temperature Transmitter que se encarga de recibir los datos en tiempo real del reactor para poder interpretarlos y mandarlos al controlador



Simulación aproximada del funcionamiento de este artefacto (TinkerCad)

En esta se usaron los siguientes componentes claves para poder simular de manera real el comportamiento de este sistema:

- Sensor de temperatura (no industrial)

Este sensor de temperatura ofrece alta precisión, rápida respuesta y monitoreo continuo en tiempo real, lo que resulta crucial para aplicaciones como la automatización de reactores anaeróbicos o robots que requieren control constante. Son fáciles de integrar en sistemas automatizados, requieren poco mantenimiento y son duraderos, incluso en entornos hostiles. Además, su capacidad para optimizar el control de la temperatura contribuye al ahorro energético, lo que reduce costos operativos. Su versatilidad permite adaptarlos a diferentes rangos y condiciones, garantizando un rendimiento confiable y eficiente en múltiples aplicaciones.

- Bombilla como simulación de calentador de reactor

Esta bombilla sirve como simulador de el calentador que debería haber en el reactor, su funcionamiento sea explicado posteriormente. Estas bombillas alógenas generan calor térmico, es por eso por lo que se usó como símil de un calentador.

- Arduino Uno R3

Esta placa de arduino es una plataforma ideal para proyectos de automatización y prototipos por su simplicidad, versatilidad y bajo costo. Ofrece una excelente facilidad de uso gracias a su amplia comunidad, documentación y librerías disponibles. Su microcontrolador ATmega328P es potente y confiable, con múltiples pines digitales y analógicos que permiten conectar diversos sensores y actuadores, como los que podrías necesitar para automatizar un



reactor anaeróbico o un robot móvil. Además, su compatibilidad con módulos de expansión (shields) y su capacidad para integrarse con otros sistemas lo convierten en una opción flexible para prototipos tanto educativos como profesionales.

- Circuito integrado L293D para el control de motores o actuadores

El circuito integrado L293D es ideal para controlar motores en proyectos de robótica y automatización debido a su capacidad para manejar hasta dos motores de corriente continua o un motor paso a paso, permitiendo el control de la dirección y velocidad. Su ventaja principal radica en que integra un driver puente H doble, lo que facilita invertir la polaridad del motor para cambiar la dirección de giro sin necesidad de circuitos externos complejos. Además, soporta corrientes de hasta 600 mA por canal y tensiones de hasta 36V, lo que lo hace adecuado para motores de distintos tamaños. Su diseño compacto y fácil de usar simplifica el control de motores en plataformas como Arduino, haciendo que sea una opción popular para prototipos de robots y sistemas automatizados.

- Protoboard para integrar conexiones

Una protoboard es una versión compacta de las placas de desarrollo tradicionales, diseñadas para proyectos donde el espacio es limitado. Estas mini placas mantienen muchas de las funcionalidades de sus contrapartes más grandes, como la capacidad de conectar sensores, actuadores y módulos de comunicación, pero en un formato mucho más pequeño. Esto las hace ideales para aplicaciones en dispositivos portátiles. Además, suelen ser más eficientes en términos de consumo de energía, lo que las hace adecuadas para proyectos que funcionan con baterías.

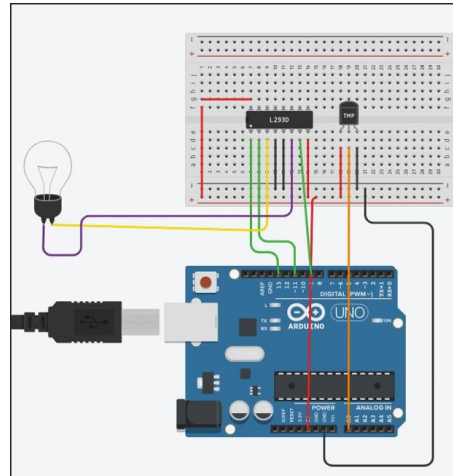


Figura 26

Código control de temperatura

Este código se usa en plataforma de arduino y sería el ideal para añadir a una simulación general del sistema del reactor para recibir los datos y mandarlos al controlador

```

Código ▶ Iniciar simulación Enviar a
Texto 1 (Arduino Uno R3)
1 char degree = 176;
2 void setup()
3 {
4   pinMode(A0, INPUT);
5   pinMode(13, OUTPUT);
6   pinMode(11, OUTPUT);
7   pinMode(9, OUTPUT);
8   digitalWrite(13, HIGH);
9   Serial.begin(9600);
10 }
11
12
13 void loop()
14 {
15   float tmp = analogRead(A0);
16   float voltage = (tmp * 5.0)/1024;
17   float milliVolt = voltage * 1000;
18   float tmpCel = (milliVolt-500)/10;
19   if(tmpCel < 27){
20     digitalWrite(11, HIGH);
21     digitalWrite(9, LOW);
22     Serial.print("Temperature: ");
23     Serial.print(tmpCel);
24     Serial.println(degree);
25     Serial.println("Light is ON now");
26     delay(2000);
27   }else{
28     digitalWrite(11, LOW);
29     digitalWrite(9, HIGH);
30     Serial.print("Temperature: ");
31     Serial.print(tmpCel);
32     Serial.println(degree);
33     Serial.println("Light is Off now");
34     delay(2000);
35   }
36 }
37

```

Figura 27



Funcionamiento control de temperatura

El set point de la temperatura es de 27°C, lo que quiere decir que si la temperatura excede este valor el bombillo se apagara, sabiendo que el bombillo simula el sistema de calentamiento del reactor, si la temperatura está por debajo de dicho valor, pasara lo contrario, el bombillo prendera hasta que alcance el set point. Cabe resaltar que el set point es ajustable, este valor es ajustable mediante el código

Aquí el funcionamiento:

```
{
float tmp = analogRead(A0);
float voltage = (tmp * 5.0)/1024;
float milliVolt = voltage * 1000;
float tmpCel = (milliVolt-500)/10;
if(tmpCel < 27){
digitalWrite(11, HIGH);
digitalWrite(9, LOW);
Serial.print("Temperature: ");
Serial.print(tmpCel);
Serial.println(degree);
Serial.println("Light is ON now");
delay(2000);
}else{
digitalWrite(11, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
Serial.print("Temperature: ");
Serial.print(tmpCel);
Serial.println(degree);
}
```

Figura 28

- Temperatura mayor a 27°C, el bombillo se apaga simulando que dejara de calentar el reactor (el bombillo se usa como referencia al calentador que este tiene, sin embargo, no es así exactamente)

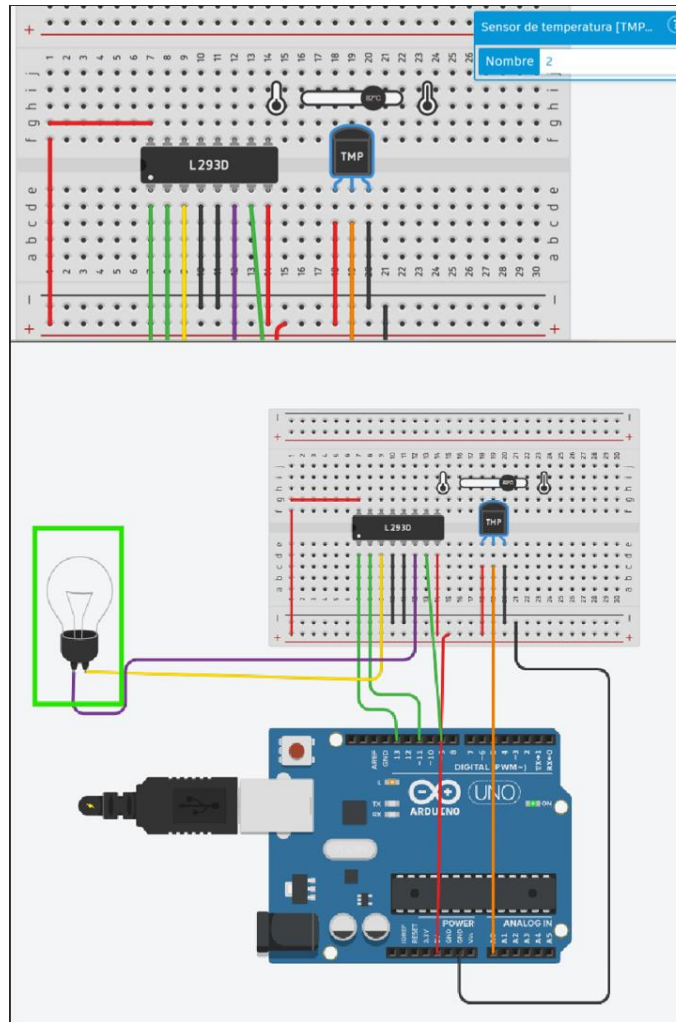


Figura 29

- Temperatura menor a 27°C , el bombillo se prende simulando que va a calentar el reactor (el bombillo se usa como referencia al calentador que este tiene, sin embargo, no es así exactamente)

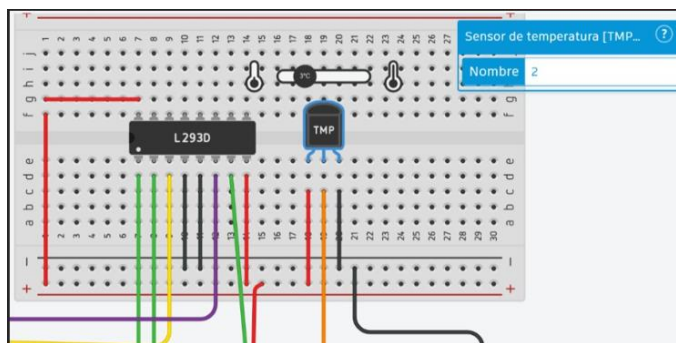


Figura 30

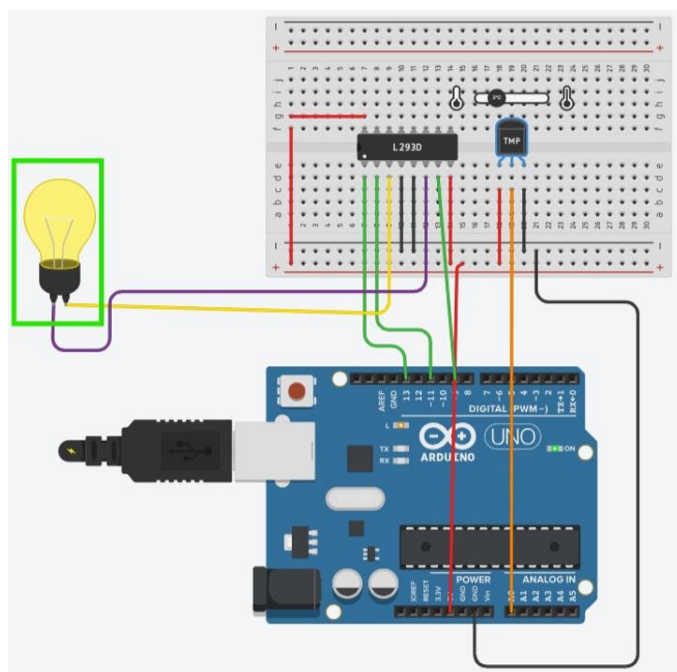


Figura 31

Componentes:

Para el manejo y automatización de la temperatura se pueden usar dos diferentes sensores de temperatura “termocuplas”, tipo J y tipo K, aquí algunas diferencias entre estas dos opciones:



Tipo J: Este tipo de termocupla es de ideal uso cuando las temperaturas del entorno están entre los -40°C y 750°C , esto debido a que por encima de los 500°C este sensor pierde precisión y puede ser propensa a la oxidación, así mismo es de un costo menor con respecto a la termocupla tipo K.



Figura 32 Termocupla tipo K

Tipo K: Este tipo de termocupla es de ideal uso cuando las temperaturas del entorno están entre los -200°C y 1372°C , esto lo hace ideal para manejo de temperaturas más extremas con respecto al tipo J, así mismo no se verá afectado por el óxido en temperaturas altas, sin embargo, el costo de este sensor es mucho mayor al del tipo J.



Figura 33 Termocupla tipo J

Estos sensores de temperatura pueden ser relacionados con el sensor pequeño que se evidencia en la simulación, ambos cumplen la misma función.

Modulo SSR-40-DA: Es un relé de estado sólido de alta potencia que se utiliza principalmente en aplicaciones de control de temperatura, automatización y otros sistemas que requieren conmutación sin contacto físico. Este relé se caracteriza por su uso industrial y su gran vida útil.



Figura 34 Relé de estado sólido

Control de temperatura TCN4S: Este controlador sirve para generar los datos de control de temperatura requeridos por el usuario que este usando el reactor



Figura 35 Control de temperatura



El controlador TCN4S y el módulo SSR-40-DA son los que se encargan de controlar la temperatura, recibir, procesar y enviar los datos, con respecto a la simulación hecha se podría decir que esta parte es la que es ejecutada por el Arduino.

Oxígeno:

Componentes:

HI 9146-04 Medidor de oxígeno disuelto



Figura 36 Medidor de oxígeno disuelto



Diseñado para proporcionar precisión en condiciones ambientales e industriales adversas. Desarrollado para medir el oxígeno disuelto y la temperatura en agua, aguas residuales y pruebas ambientales, este medidor también puede compensar la altitud y la salinidad.

Este cuenta con sistema de medición polarográfica donde la sonda está compuesta por un cátodo de plástico y un ánodo de plata en una solución electrolítica mantenida en su lugar sobre las superficies de los electrodos por una membrana de polímero. Un voltaje externo aplicado a través del sistema es una corriente proporcional a la concentración de oxígeno disuelto. Además, a calibración se puede realizar en uno o dos puntos hasta el 100% y/o el 0% de saturación. El 100% de saturación se realiza en el aire mientras que el 0% se realiza con la solución de oxígeno cero bicomponente HI7040.

Podemos encontrar unos puntos claves de este sensor:

- Compensación automática de temperatura
- Compensación de salinidad
- Compensación de altitud
- Punto de finalización automática

Para empezar, mostraremos el diagrama P&ID para tener un panorama más claro del reactor y este control de variable. Este sistema controla el nivel de oxígeno disuelto en el reactor anaeróbico, asegurando que se mantenga dentro de los parámetros deseados para el proceso:

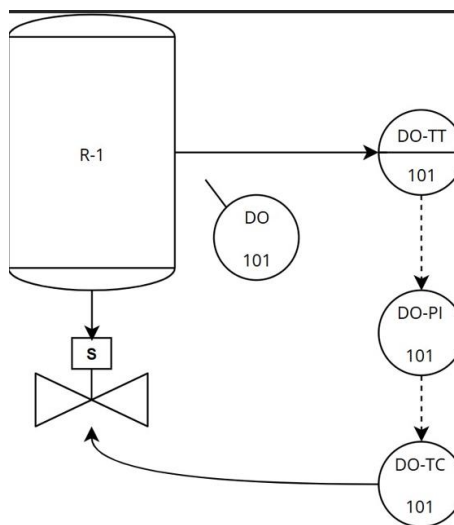


Figura 37

Este diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) representa un sistema de control para la medición y regulación de oxígeno disuelto en un reactor anaeróbico (R-1). Aquí está la explicación de los elementos:

- R-1 (Reactor Anaeróbico): Es el equipo principal donde ocurre el proceso. El reactor está diseñado para funcionar en ausencia de oxígeno, pero el diagrama se centra en el monitoreo y control del oxígeno disuelto.
- DO 101 (Sensor de Oxígeno Disuelto): Ubicado en el reactor, mide el nivel de oxígeno disuelto y envía una señal al transmisor DO-TT 101.
- DO-TT 101 (Transmisor de Oxígeno): Recibe la señal del sensor y la convierte en un formato adecuado para el sistema de control. También envía la señal al indicador y al controlador.



- DO-PI 101 (Indicador de Oxígeno): Es un dispositivo que muestra visualmente los valores de oxígeno disuelto en tiempo real, facilitando el monitoreo por parte de los operadores.
- DO-TC 101 (Controlador de Oxígeno): Procesa la señal recibida del transmisor para comparar los valores medidos con el punto de consigna (setpoint). Según el resultado, ajusta la señal que controla la válvula.
- Actuador (S): Recibe las órdenes del controlador DO-TC 101 y ajusta la apertura o cierre de la válvula de control.
- Válvula de Control: Permite ajustar el flujo de gas (o líquido) para mantener los niveles adecuados de oxígeno en el reactor.

Conexiones en ThinkerCAD:

Simulación de esta variable en ThinkerCAD. Se usaron los siguientes componentes:

- Sensor de oxígeno disuelto (DO) ((Se usa sensor de temperatura para fines de simulación))
- Arduino Uno R3
- Led (Alarma)
- Resistencia 330 ohms
- Protoboard

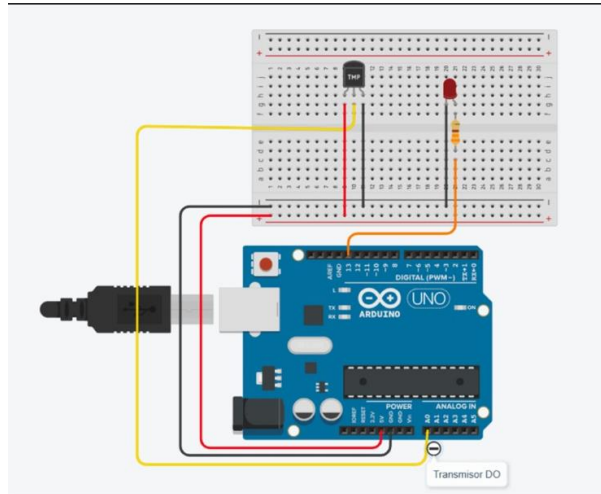


Figura 38

Explicación del código en la simulación en ThinkerCAD:

```
// Definición de pines
const int pinSensorDO = A0; // Pin de entrada para el sensor DO
const int pinLedLarma = 13; // Pin de salida para el LED de alarma

// Umbral de oxígeno disuelto (ajustable según el proceso)
const int umbralOxigeno = 200; // Valor simulado, ajusta según la calibración del sensor

void setup() {
  // Configuración de pines
  pinMode(pinSensorDO, INPUT);
  pinMode(pinLedLarma, OUTPUT);

  // Inicializar comunicación serial (opcional para monitoreo)
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Iniciando monitoreo de oxígeno disuelto...");
}

void loop() {
  // Leer valor del sensor de oxígeno disuelto
  int valorDO = analogRead(pinSensorDO);

  // Imprimir valor en el monitor serial para monitoreo (opcional)
  Serial.print("Nivel de oxígeno disuelto: ");
  Serial.println(valorDO);

  // Comparar el valor del sensor con el umbral
  if (valorDO > umbralOxigeno) {
    // Activar alarma si el nivel de oxígeno excede el umbral
    digitalWrite(pinLedLarma, HIGH);
    Serial.println("¡Alerta! Nivel de oxígeno elevado.");
  } else {
    // Desactivar alarma si el nivel de oxígeno es aceptable
    digitalWrite(pinLedLarma, LOW);
  }

  // Esperar un momento antes de la siguiente lectura
  delay(1000); // 1 segundo
}
```

Figura 39



En un reactor anaeróbico, el sensor de oxígeno disuelto se utiliza principalmente para asegurar que el ambiente se mantenga libre de oxígeno, condición esencial para el proceso anaeróbico. La presencia de oxígeno en el reactor podría inhibir o interrumpir el metabolismo de los microorganismos anaeróbicos que descomponen la materia orgánica.

El sensor permite monitorear niveles bajos de oxígeno disuelto para confirmar que el proceso opera bajo condiciones óptimas anaeróbicas.

Este código ayuda a monitorear los niveles de oxígeno disuelto y activa una alarma si el nivel es demasiado alto, lo que permite intervenir rápidamente para corregir cualquier problema en el sistema.

El sensor toma una lectura analógica del sensor de oxígeno disuelto conectado al pin A0. La lectura del sensor es un valor entre 0 y 1023, donde el rango dependerá del tipo de sensor y de los niveles de oxígeno que mide.

Imprime el nivel de oxígeno disuelto en el monitor serial. Esto permite ver si el reactor está operando bajo las condiciones anaeróbicas adecuadas o si los niveles de oxígeno están aumentando.

El código verifica si el valor del sensor supera el umbral del oxígeno. Si el valor es mayor, significa que el nivel de oxígeno es demasiado alto para un entorno anaeróbico, y el sistema enciende el LED de alarma (pin 13).

El LED indica una condición de alerta al encenderse. Esto sugiere que algo ha fallado en el reactor, como una entrada accidental de aire o una falla en el sistema de sellado, y el oxígeno ha subido más allá del límite aceptable.



Descripción técnica del sistema del control del reactor

Control de Nivel: Se busca mantener un nivel de fluido adecuado dentro del reactor para asegurar el correcto funcionamiento del proceso.

Sensor de Nivel Ultrasónico (Modelo 7ML5201-0FA0 Siemens / VEGAPULS 31/6X):

El sensor ultrasónico mide la distancia entre la superficie del fluido y el sensor. El modelo HC-SR04 será usado para las pruebas y se conecta al Arduino de la siguiente manera: el pin Eco al pin 12 y el pin Trig al pin 13. El modelo VEGAPULS 31/6X de radar es la opción para la implementación final, ofreciendo mayor precisión y fiabilidad en condiciones industriales, con menos dependencia de factores como el tipo de fluido o las condiciones ambientales.

Válvula Solenoide PARKER 3768317 (24V): La válvula solenoide regula el flujo de agua dentro del reactor. Está conectada a un circuito controlado por el Arduino. Cuando el sensor de nivel indica que el fluido está bajo, el Arduino activa la válvula solenoide para permitir el ingreso de agua al reactor. Cuando el nivel alcanza el valor deseado, el sistema cierra la válvula para evitar un sobrellenado.

Bomba Eléctrica Centrifuga Acero Inoxidable Norma Aisi304 1hp

La bomba se utiliza para mover el fluido dentro del reactor, asegurando que el nivel se mantenga dentro de los parámetros definidos. Si el sensor de nivel detecta que el nivel está demasiado alto, el Arduino activa la bomba para evacuar el exceso de fluido, transfiriéndolo fuera del reactor.

Control de Temperatura: Se busca mantener la temperatura del reactor en un rango óptimo para la reacción de producción de ácido poliláctico (PLA).

Controlador PID (TCN4S-24R): El controlador PID TCN4S-24R monitorea la temperatura del reactor y ajusta el calentador en función de las diferencias entre la temperatura deseada y la



actual. El controlador utiliza la señal de la termocupla para realizar estos ajustes. La lógica PID ayuda a mantener la temperatura constante y dentro de los límites preestablecidos para el proceso.

Relé de Estado Sólido (SSR-40-DA):

El relé de estado sólido (SSR-40-DA) se encarga de controlar la activación y desactivación del calentador. Recibe la señal del controlador PID y ajusta la corriente que llega al calentador. Si el sistema necesita aumentar la temperatura, el SSR permite el paso de corriente hacia el calentador, y si se supera la temperatura objetivo, el SSR corta el paso de corriente, deteniendo el calentador.

Termocupla: La termocupla se utiliza para medir la temperatura del reactor. Convirtiendo la temperatura en una señal eléctrica, esta información es enviada al controlador PID, que toma decisiones basadas en estos datos para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados.

Controlador de oxígeno: Este sensor se conecta al fluido dentro del reactor, generalmente en un punto donde el oxígeno disuelto pueda ser representativo de todo el volumen del reactor.

Sensor de oxígeno disuelto (DO1200 and DO1200TC Dissolved Oxygen Sensors)

El objetivo principal de un reactor anaerobio es producir biogás, principalmente metano. La presencia de oxígeno puede reducir la producción de metano y favorecer la producción de otros gases como el dióxido de carbono.



Análisis de costos

Costos directos:

Componentes	Precio
Termocupla	\$0
Relé	\$0
Controlador de temperatura PID	\$0
Sensor ultrasónico 7ML5201-0FA0 Siemens	\$3.724.098,66
Sensor de radar Vegaplug 31	\$4.075.061,40
Sensor de radar Vegaplug 6x	\$14.203.662,92
Válvula solenoide PARKER 3768317 24V	\$1.500.934,44
Bomba eléctrica centrífuga de acero inoxidable. 1HP	\$1.111.900
Sensor de oxígeno HI 9146-04	\$4'500.000

Figura 40

Cabe resaltar que la universidad ya cuenta con los instrumentos para la automatización de temperatura, por esta razón los costos son \$0.

El costo final dependerá de los requerimientos que busque el cliente, así como su presupuesto. Teniendo en cuenta esto, tendríamos tres opciones diferentes:

- Opción 1: Con los siguientes componentes; termocupla, relé, controlador de temperatura, sensor ultrasónico, válvula solenoide, bomba centrífuga, sensor de oxígeno. El costo total de esta opción es de \$10.836.933,1 COP; esta opción es considerada la más económica de las tres y proporciona un sensor ultrasónico confiable para la medición de nivel de líquidos. El costo de esta opción es razonable y proporciona un buen equilibrio entre precio y funcionalidad. El costo total de esta opción es de \$10.836.933,1 COP



- Opción 2: Con los siguientes componentes: Termocupla, relé, controlador de temperatura, sensor de radar VEGAPLUS 31, válvula solenoide, bomba centrífuga, sensor de oxígeno; El costo total de esta opción es de \$11.187.895,84 COP, esta opción tiene un costo ligeramente mayor que la opción ultrasónica, pero el sensor de radar VEGAPULS 31 es más preciso y confiable. El radar es menos sensible a las condiciones adversas, como la humedad, el polvo y las variaciones de temperatura, lo que lo convierte en una opción más robusta para aplicaciones industriales. Si bien el costo es mayor, la fiabilidad y precisión superior justifican la diferencia en el precio.

- Opción 3: Con los siguientes componentes; termocupla, relé, controlador de temperatura, sensor de radar Vegapuls 6X, válvula solenoide, bomba centrífuga, sensor de oxígeno; El costo total de esta opción es de \$21.316.497,36, esta es la opción más costosa, utilizando el sensor de radar VEGAPULS 6X, que ofrece la mayor precisión y fiabilidad en condiciones extremadamente exigentes. El VEGAPULS 6X es ideal para situaciones donde la medición de nivel debe ser muy precisa, independientemente de las condiciones del entorno. Sin embargo, su alto costo solo se justifica en aplicaciones donde se necesita un rendimiento excepcional y no hay restricciones presupuestarias.

Capital de trabajo

El reintegro de la inversión no se puede medir sin saber el ingreso de capital de la universidad, esto debido a que el reactor no es comercial y es netamente educativo y para efectos de la universidad.



Conclusiones

Se logró diseñar un sistema de automatización que permite la medición y control eficiente de variables críticas en el reactor anaerobio de conversión de biomasa (RACB). Este diseño incluye un enfoque integral para el control de temperatura, nivel y oxígeno, mejorando la estabilidad operativa del sistema y su capacidad para cumplir con los parámetros requeridos.

El diagnóstico realizado permitió identificar puntos críticos en la operatividad actual del reactor. Se detectaron ineficiencias en el control de variables clave, las cuales fueron abordadas mediante la implementación del sistema automatizado propuesto, teóricamente optimizando así el rendimiento del reactor.

Las simulaciones y pruebas experimentales confirmaron la fiabilidad y precisión del sistema de control. Esto garantiza que el diseño propuesto pueda adaptarse a condiciones variables, manteniendo un desempeño estable y eficiente.

El sistema de control automatizado representa una mejora significativa en la operación del reactor, al facilitar una gestión más precisa y reducir la dependencia de supervisión manual. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también sienta las bases para futuras optimizaciones en el tratamiento de biomasa.



Referencias

- La república. (2014). ¿Prefiere invertir en máquinas o en gente? *La república*.
<https://www.larepublica.co/opinion/analistas/prefiere-invertir-en-maquinas-o-en-gente-2152901>
- Selma Penalva, A. (2024). ¿El trabajo del ser humano será totalmente sustituido por una máquina? *Periódico UNAL*. <https://periodico.unal.edu.co/articulos/el-trabajo-del-ser-humano-sera-totalmente-sustituido-por-una-maquina>
- Liliana Serna, C. & Aida Rodríguez, de S. & Fred Albán, A. (2003). *Revista ingeniería univalle*, 5(1), 1-11.
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2301/3051
- Torres Cárdenas, H. (2019). Obtención de Ácido Poliláctico (PLA) Utilizando Ácido Láctico de Origen Biológico Fermentado por Cepas de *Lactobacillus Casei* y *Staphylococcus Aureus* en un Biorreactor PFTR. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/7646c1dd-9033-44ce-ad33-efad905c46a8>
- Ch, A. L., Mejía, Y., Gómez, Y., & Riera, M. (2023). Diseño de un reactor químico de



polimerización para la producción de ácido poliláctico. Revista de Iniciación Científica, 9(1), 64-

70. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3384815007/3384815007.pdf>

Castro Gómez, Y., & Vera Calderon, M. P. (2012). Diseño de reactores de prepolimeración y polimerización para la producción de ácido poliláctico en una planta industrial.

<https://repositorio.unicartagena.edu.co/entities/publication/f0a46016-25ca-430a-8b88-9364499bd448>

Mendoza, I. R. C., & Riera, M. A. (2022). Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones. Publicaciones en Ciencias y Tecnología, 16(1), 42-53.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8572671.pdf>

Rosales, F., Cerdón, I., de Sacarosa-CENGICANA, R., & Internacionales-ASAZGUA, A. (2018). Proyecto de factibilidad técnica-financiera para la producción de ácido poliláctico (pla) a partir de la glucosa contenida en la melaza de la caña de azúcar. Memoria Presentación de Resultados, 2019. <https://cengicana.org/files/20190930123933731.pdf>

Murillo Varón, C. E. (2008). Estudio de las condiciones de reacción para la producción de ácido poliláctico por fusión directa. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/1b3bedc8-df16-4e72-853f-e1b7a18bd78a/download>

Méndez-Alva, J. A., Pérez-Cisneros, E. S., & Morales-Rodríguez, R. (2017). Diseño conceptual de una planta de producción de ácido láctico a partir de residuos de la industria azucarera. Jóvenes en la ciencia, 3(2), 736-740.

<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/download/2028/152>



Donoso Millingalli, B. D., & Ipiales Pupiales, S. V. (2009). Diseño e implementación de la automatización de un reactor de alta presión (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2009).

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4244/1/CD-2525.pdf>

Jaimes, L. E. G., Cárdenas, S. C., & González, Á. B. R. (2023). Propuesta de automatización para el proceso químico de elaboración de un polímero funcional en un reactor discontinuo. *Revista Mutis*, 13(2), 1-16.

<https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/download/Propuesta-automatizacion-proceso-quimico-elaboracion-polimero-funcional-reactor-discontinuo/2035>

Pachon Hernandez, C. A., & Pinilla Murcia, C. A. (2013). Modelamiento, simulación y prueba de un sistema de control automático para un reactor anaerobio de contacto utilizado en el tratamiento de aguas residuales de curtiembres.

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/22447/Documento%20de%20Grado.pdf?sequence=1>

Ronquillo Castro, S. & Villa Manosalvas, G. & Vera Obando, G. & Martinez Vera, V. (2023). Aplicación de sistemas basados en el modelado de procesos anaerobios utilizando residuos urbanos para la producción de biogás. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E64), 148-163. <https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/aplicación-de-sistemas-basados-en-el-modelado/docview/2973217799/se-2>



Tamayo, R. M., García, F. A., & Marín, J. E. MODELADO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA EN UN REACTOR ANAEROBIO DE MANTO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE UASB PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN EL RANGO MESOFÍLICO. UN ESTUDIO TEÓRICO.

https://www.academia.edu/download/43235468/Modelado_y_control_automtico_de_Temperat20160301-5306-118i6ce.pdf

Acosta Campoverde, E. D. (2017). Análisis y diseño de la automatización del reactor para la simulación del proceso de elaboración de yogurt, utilizando herramientas electrónicas aplicadas en la industria (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena).

<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/4103/1/UPSE-TET-2017-0008.pdf>

García, E. F., Quezada, J. C. Q., Medina, R. V. H. C., & de Oca, D. G. M. (2021). Control basado en PLC y monitoreo mediante HMI de la temperatura en el proceso de maceración y cocción en la elaboración de cerveza artesanal. Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca, 6(12), 44-49.

<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/investigium/article/download/6338/7796>

Jovanović, S. Z., Đurić, J. S., & Šibalića, T. V. (2018). Robotic process automation: overview and opportunities. International Journal Advanced Quality, 46(3-4), 34-39.

Jämsä-Jounela, S. L. (2007). Future trends in process automation. Annual Reviews in Control, 31(2), 211-220.



Benanav, A. (2020). *Automation and the Future of Work*. Verso Books.

Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0—a literature review. *Procedia Computer Science*, 181, 51-58.

Li, H., Liu, Q., Yang, P., Duan, Y., Zhang, J., & Li, C. (2021). Encapsulation of microorganisms for simultaneous nitrification and denitrification in aerobic reactors. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105616.

Li, J., Šimek, H., Ilioaie, D., Jung, N., Bräse, S., Zappe, H., ... & Ladewig, B. P. (2021). In situ sensors for flow reactors—a review. *Reaction Chemistry & Engineering*, 6(9), 1497-1507.

Swetha, T. A., Ananthi, V., Bora, A., Sengottuvelan, N., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., & Arun, A. (2023). A review on biodegradable polylactic acid (PLA) production from fermentative food waste—Its applications and degradation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123703.

Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Saedi Ardahaei, A., Dai, Y., Neisiany, R. E., Foroughi, F., ... & Ramakrishna, S. (2021). The life cycle assessment for polylactic acid (PLA) to make it a low-carbon material. *Polymers*, 13(11), 1854.

McKeown, P., & Jones, M. D. (2020). The chemical recycling of PLA: A review. *Sustainable Chemistry*, 1(1), 1-22.

Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas production and applications in the sustainable energy transition. *Journal of Energy*, 2022(1), 8750221.

(2023). Análisis del nivel de automatismo de sistemas robóticos en la industria nuclear.



UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.

<https://doi.org/10.5944/bicim2022.187> Ortega-Yago, A. et al. (2024). Resistencia mecánica de matrices óseas de ácido poliláctico desarrolladas por impresión 3D para la reconstrucción de defectos óseos. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 68(3), 262-270.

<https://doi.org/10.1016/j.recot.2023.02.001>

Syed Shuja, A. et al. (2024). Enhancing sequencing batch reactors for efficient wastewater treatment across diverse applications: A comprehensive review. *Academic Press Inc*, 260.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119656>

Neves, C. S. et al. (2016). Start-up of anaerobic baffled reactor in series with upflow anaerobic sludge blanket reactor reactors, using parameters of sedimentation for formation of sludge. *ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL*, 20(4), 623-634.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020040119235>

Loaces, I. et al. (2015). Improved glycerol to ethanol conversion by *E. coli* using a metagenomic fragment isolated from an anaerobic reactor. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 43(10), 1405-1416. [https://doi-](https://doi.org/bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s10295-016-1818-7)

[org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s10295-016-1818-7](https://doi.org/bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s10295-016-1818-7)

Murillo, C. A. et al. (2023). Fabricación de filamentos de impresión 3D con ácido poliláctico comercial y reciclado rellenos con residuos de café. *Revista ION*, 36(2), 7-13.

<https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.18273/revion.v36n2-2023001>

Régimen legal de Bogotá [Res.] Res. 2400. 22 de mayo de 1979 (Colombia).

El congreso de la república [Ley]. Ley 9. 24 de enero de 1979 (Colombia).

Pérez, J., Aldana, G., & Cárdenas, C. (2012). Funcionamiento de un reactor anaerobio de



flujo ascendente (RAFA) a través de la edad del lodo y los coeficientes cinéticos. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 35(1), 098-108. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702012000100012

Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). Control PID avanzado. Pearson, Madrid. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2009). Control PID avanzado. Pearson, Madrid. <https://portal.research.lu.se/en/publications/control-pid-avanzado>

Johnson, M. A., & Moradi, M. H. (2005). PID control (pp. 47-107). London, UK: Springer-Verlag London Limited. <https://perpus.univpancasila.ac.id/repository/EBFT180152.pdf>

Sudiartha, G. A. W., Imai, T., Mamimin, C., & Reungsang, A. (2023). Effects of temperature shifts on microbial communities and biogas production: an in-depth comparison. Fermentation, 9(7), 642. <https://www.mdpi.com/2311-5637/9/7/642/pdf>

Siemens. (2024). Transmisor de nivel Siemens serie SITRANS LU150 de PBT, montaje de abrazadera [Figura 1]. RS. <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-nivel/1442575>

VEGA. (2024). Sensor radar compacto para la medición continua de nivel [Figura 2]. Home of values. <https://www.vega.com/es-es/productos/catalogo-de-productos/medicion-de-nivel/radar/vegapuls-31>

VEGA. (2024). Sensor radar para la medición continua de nivel de líquidos y sólidos a granel [Figura 3]. Home of values. <https://www.vega.com/es-es/productos/catalogo-de>



[productos/medicion-de-nivel/radar/vegapuls-6x](#)

CNSHENZHENJIDIYIGUOJIMACOR. (2024). Válvula Solenoide Proporcional 3768317 24v Para 923636.0756 [Figura 4]. Mercado libre. https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1503001479-valvula-solenoide-proporcional-3768317-24v-para-9236360756-JM#polycard_client=search-nordic&position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=319b486d-ab4c-48dd-b591-f44c5622c000

Homecenter. (2024). Bomba Electrica Centrifuga Acero Inox Norma Aisi304 1hp [Figura 5]. Homecenter. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/680942/bomba-electrica-centrifuga-acero-inox-norma-aisi304-1hp/680942/>

EBCHQ. (2024). Termocupla tipo J [Figura 6]. Eléctricas Bogotá Ltda. <https://electricasbogota.com/es/termocupla-tipo-j-de-montaje?srsId=AfmBOoq59jVIpHLn114hBX0mA1KFWXsvzjn-zrt7MEjHbtxxl3Vqiqk0>

Vistrónica. (2024). Relé estado sólido 24-380VAC 40A SSR-40DA. [Figura 7]. Tienda Virtual de electrónica. <https://www.vistronica.com/potencia/rele-estado-solido-24-380vac-40a-ssr-40da-detail.html>



Vistrónica. (2024). TERMOCUPLA TIPO K 2 METROS CON SONDA DE 100MM.

[Figura 8]. Tienda Virtual de electrónica. <https://www.vistronica.com/sensores/termocupla-tipo-k-2-metros-con-sonda-de-100mm-detail.html>

Autonics. (2021). Control de temperatura Autonics TCN4S-24R. [Figura 9]. Exhibir https://exhibirequpos.com/producto/control-temperatura-autonics-tcn4s-24r/?srsltid=AfmBOorbBMyV_F3M047lnvBJZX9kWzOjQDZNas4o7FOlp_pbLtysnfuR

Tinkercad - From mind to design in minutes. (s. f.). Tinkercad. <https://www.tinkercad.com/>

MATLAB Login | MATLAB & Simulink. (s. f.). <https://matlab.mathworks.com/>

Ideal Modeling & Diagramming Tool for Agile Team Collaboration. (s. f.). <https://www.visual-paradigm.com/>