

Biodiesel production controlled by a programmable logic controller (PLC)

Cevallos-Echevarría Alejandro Néstor

University Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú. acevallos@unfv.edu.pe

Abstract— The use of fossil fuels has led to a severe climate crisis and a critical deterioration of public health, driving the transition to sustainable biofuels. Under the ASTM D6751 (B100) standard, biodiesel is positioned as a strategic alternative by using raw materials such as soybean, sunflower, rapeseed, and used cooking oils. This bio-based fuel not only reduces polluting emissions but also strengthens energy security and optimizes the trade balance by saving foreign currency on crude oil imports, directly benefiting the Peruvian economy. The main objective of this project is to automate the transesterification process using Programmable Logic Controllers (PLCs) programmed in Ladder logic, integrating a real-time monitoring and control system through a Human-Machine Interface (HMI). This architecture allows for centralized supervision and immediate response to process fluctuations.

The methodology employs an experimental approach that allows for the rigorous manipulation of independent variables to observe their impact on biofuel efficiency. The PLC manages input signals from high-precision sensors (such as thermocouples or PT100s), processing the data to execute corrective actions on the reactor actuators. To optimize thermal stability, a PID control algorithm with a proportional gain ($K=700$) was implemented, maintaining a critical temperature of 60 °C. Statistical analysis of the operating data yielded a mean squared error (MSE) of 2.66 °C, an acceptable tolerance margin that ensures standardization and quality in the industrial production of biodiesel.

Keywords-- Reactors, Transesterification, plc, Control, Automation

Producción de biodiesel controlado por un automata programable (PLC)

Cevallos-Echevarría Alejandro Néstor¹

¹ University Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú. acevallos@unfv.edu.pe

Abstract— The use of fossil fuels has led to a severe climate crisis and a critical deterioration of public health, driving the transition to sustainable biofuels. Under the ASTM D6751 (B100) standard, biodiesel is positioned as a strategic alternative by using raw materials such as soybean, sunflower, rapeseed, and used cooking oils. This bio-based fuel not only reduces polluting emissions but also strengthens energy security and optimizes the trade balance by saving foreign currency on crude oil imports, directly benefiting the Peruvian economy. The main objective of this project is to automate the transesterification process using Programmable Logic Controllers (PLCs) programmed in Ladder logic, integrating a real-time monitoring and control system through a Human-Machine Interface (HMI). This architecture allows for centralized supervision and immediate response to process fluctuations.

The methodology employs an experimental approach that allows for the rigorous manipulation of independent variables to observe their impact on biofuel efficiency. The PLC manages input signals from high-precision sensors (such as thermocouples or PT100s), processing the data to execute corrective actions on the reactor actuators. To optimize thermal stability, a PID control algorithm with a proportional gain ($K=700$) was implemented, maintaining a critical temperature of 60 °C. Statistical analysis of the operating data yielded a mean squared error (MSE) of 2.66 °C, an acceptable tolerance margin that ensures standardization and quality in the industrial production of biodiesel.

Keywords-- Reactors, Transesterification, plc, Control, Automation

Resumen— El uso de combustibles fósiles ha derivado en una crisis climática severa y un deterioro crítico de la salud pública, lo que impulsa la transición hacia biocombustibles sostenibles. Bajo la normativa ASTM D6751 (B100), el biodiésel se posiciona como una alternativa estratégica al emplear materias primas como aceites de soja, girasol, colza y aceites de cocina usados. Este combustible de origen biológico no solo reduce las emisiones contaminantes, sino que fortalece la seguridad energética y optimiza la balanza comercial mediante el ahorro de divisas por importación de crudo, favoreciendo directamente la economía del Perú. El presente proyecto tiene como objetivo principal automatizar el proceso de transesterificación mediante el uso de Controladores Lógicos Programables (PLC) programado con lenguaje Ladder, integrando un sistema de monitoreo y control en

tiempo real a través de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI). Esta arquitectura permite una supervisión centralizada y una respuesta inmediata ante fluctuaciones del proceso. La metodología emplea un enfoque experimental que permite la manipulación rigurosa de variables independientes para observar su impacto en la eficiencia del biocombustible. El autómata PLC gestiona señales de entrada provenientes de sensores de alta precisión (como termocuplas o PT100), procesando los datos para ejecutar acciones correctivas sobre los actuadores de los reactores. Para optimizar la estabilidad térmica, se implementó un algoritmo de control PID con una ganancia proporcional ($K=700$), logrando mantener una temperatura crítica de 60 °C. El análisis estadístico de los datos operativos arrojó un error cuadrático medio (ECM) de 2.66 °C, un margen de tolerancia aceptable que garantiza la estandarización y calidad en la producción industrial de biodiésel.

Palabras clave-- Reactores, Transesterificación, PLC, Control, Automatización

I. INTRODUCCIÓN

La matriz energética global depende predominantemente de los combustibles fósiles, los cuales constituyen reservas limitadas y geográficamente concentradas. Bajo los principios de oferta y demanda, el agotamiento progresivo de estos yacimientos impulsa un incremento sostenido en los precios, obligando al desarrollo de combustibles alternativos con capacidad de sustitución real. En este escenario, el futuro del biodiésel se orienta hacia la sostenibilidad mediante el uso de materias primas de segunda y tercera generación, tales como aceites residuales, biomasa no alimentaria y microalgas. Se proyecta que este biocombustible sea un pilar en la descarbonización del transporte pesado, integrándose estratégicamente con tecnologías de hidrógeno verde para mitigar emisiones y mejorar los indicadores de salud pública. De acuerdo con análisis prospectivos [1], las reservas mundiales de crudo se estiman para un periodo aproximado de 56 años, sujeto al ritmo de consumo actual. En el contexto nacional, el Perú alcanzó su cenit de producción en la década de 1980, superando los 200 mil barriles diarios; sin embargo, la declinación actual de los yacimientos ha acentuado la dependencia de importaciones, incrementando la vulnerabilidad energética del país. Ante esta crisis, surge la necesidad imperativa de producir biodiésel aprovechando las ventajas de la Amazonía peruana, como Loreto, Ucayali, San Martín, Huanuco, que poseen vastas áreas cultivables para la

palma aceitera, insumo fundamental para la industria de biocombustibles.

El mundo de la actualidad sufre el impacto ambiental del parque automotor por las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) como se observa en la tabla I, las cuales alcanzan los 2.5 billones de toneladas anuales [2], catalizando el cambio climático y exacerbando patologías respiratorias crónicas, tales como el asma, la bronquitis y el carcinoma pulmonar.

TABLA I
CONTAMINACION POR CO₂

Orden	Combustible	Emisión CO ₂ (kg/MWh)
1	Carbón	940
2	Diesel fósil	740
3	Gasolina	690
4	Gas Natural	440
5	Biodiesel	130
6	HVO	90
7	Hidrogeno Verde	0

De los datos presentados en la Tabla I, se desprende una conclusión crítica para la salud pública y el medio ambiente: el diésel fósil es aproximadamente seis veces más contaminante que el biodiésel. Esta diferencia radical posiciona al biodiésel no solo como una alternativa, sino como una solución inmediata y eficiente para la descarbonización. mientras que el hidrógeno verde se proyecta como una tecnología de emisión cero a largo plazo, el biodiésel ya representa una reducción drástica y medible de la huella de carbono en la infraestructura de transporte actual.

En la actualidad, la transición energética global apuesta por el biodiésel como una alternativa estratégica a los combustibles fósiles. Su principal ventaja radica en su origen renovable, el cual permite una reducción significativa de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) hacia la atmósfera. De acuerdo con [3], la diversidad de materias primas para biocombustibles ha evolucionado hacia el uso de especies vegetales de rápido crecimiento que prosperan en suelos marginales o regiones áridas, este enfoque es fundamental, ya que estas especies no compiten con la seguridad alimentaria, evitando el uso de cultivos destinados al consumo humano o animal, como el maíz, la caña de azúcar o la soja. Un ejemplo destacado es la *Moringa oleifera*, una planta que actualmente se cultiva en regiones tropicales y semiáridas debido a su extraordinaria resistencia al estrés hídrico. Su capacidad para desarrollarse en condiciones de escasez de agua la posiciona como un insumo de alta viabilidad técnica y económica para la producción sostenible de biodiésel.

La investigación de [4] destaca el uso de aceite de cocina usado, como una estrategia fundamental para reducir los costos operativos en la producción de biodiésel. Esta materia prima no solo es económicamente competitiva, sino que ofrece una ventaja ecológica crítica: transforma un residuo altamente

contaminante en un recurso energético de valor añadido. El estudio subraya, además, la eficiencia del óxido de circonio (ZrO₂) como catalizador sólido en el proceso de transesterificación de triglicéridos, para optimizar el rendimiento del biodiesel.

En su investigación, [5] sostiene que la sustitución de los combustibles fósiles por alternativas de origen biológico constituye uno de los desafíos más críticos de la humanidad en el siglo XXI. Para que el biodiésel se consolide como una alternativa energética competitiva, no basta con que posea propiedades físico-químicas equivalentes al diésel convencional; es imperativo asegurar un balance energético positivo en su ciclo de vida y alcanzar la paridad de precios en el mercado. Actualmente, la viabilidad económica representa el principal obstáculo para su comercialización a gran escala. Por ejemplo, en los Estados Unidos, el costo del biodiésel se sitúa cerca de los US 0.35 /l del diésel de petróleo. Esta brecha de precios se atribuye principalmente al uso de aceites vegetales vírgenes como insumo base, cuyo costo de adquisición eleva significativamente el presupuesto operativo. Por esta razón, las tendencias actuales de investigación se centran en la valorización de aceites residuales y especies no comestibles, estrategias que no solo optimizan la estructura de costos, sino que fortalecen la sostenibilidad del modelo productivo.

A partir del análisis de las investigaciones precedentes, se concluye que el desarrollo de este proyecto es imperativo para la modernización de la industria de biocombustibles a nivel nacional, aprovechando la disponibilidad de la integración de tecnologías de vanguardia, basadas en hardware y software especializado para automatización industrial, permite superar las limitaciones de los sistemas convencionales, por lo cual el objetivo central de esta investigación es simular y optimizar el proceso de producción de biodiésel mediante el uso del Controlador Lógico Programable (PLC) Siemens S7-1200. dispositivo que garantiza niveles superiores de exactitud, velocidad de respuesta y confiabilidad en el control de los reactores, y adicionalmente realizar análisis de datos operativos a través de herramientas computacionales como MATLAB.

Otro aspecto relevante del uso de este autómatas programable, radica en su capacidad de integración vertical dentro de la arquitectura de la organización empresarial mediante el modelo de la Pirámide de Manufactura Integrada por Computadora (CIM) ver (Fig. 1), el sistema propuesto facilita la convergencia entre las redes industriales de la planta que gobierna los actuadores y las redes ofimáticas de nivel administrativo, dicha conectividad asegura un flujo de información bidireccional y en tiempo real hacia los sistemas ERP (Enterprise Resource Planning), optimizando la toma de decisiones estratégicas, la gestión de inventarios y la trazabilidad de la producción. En suma, el proyecto no solo automatiza una tarea técnica, sino que digitaliza el proceso productivo, alineándolo con los estándares de eficiencia de la industria 4.0 y fortaleciendo la competitividad empresarial.

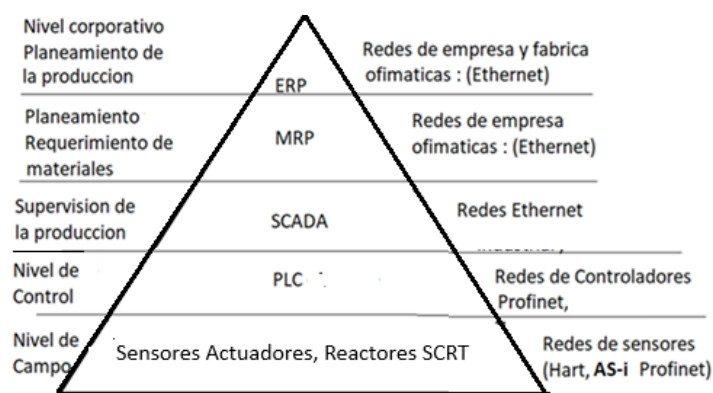


Fig. 1 Pirámide C.I.M.

Bajo el marco de la Pirámide (CIM), de Manufactura Integrada de 5 niveles, se encuentra, a nivel de campo están los actuadores, reactores, instrumentación, sensores de temperatura, transmisores de nivel y actuadores (motores y servo válvulas) que operan directamente sobre los reactores de transesterificación. Inmediatamente superior se encuentra el Nivel de Control, esta el PLC S7-1200 que actúa como el cerebro del sistema, ejecutando algoritmos de control lógico y lazos PID para estabilizar las variables críticas del proceso. Para producción de gran escala, la arquitectura se extiende al nivel de supervisión mediante, sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Esta tecnología permite la gestión de alarmas, el almacenamiento de históricos de producción y la visualización de tendencias mediante una interfaz gráfica avanzada.

La integración es posible mediante protocolos de comunicación industrial con redes (PROFINET), con el nivel de gestión empresarial ERP. Esta conectividad permite que los datos de campo se transformen en indicadores clave de desempeño (KPIs: *Key Performance Indicators*), que permiten medir el éxito y la eficacia de un proceso específico en comparación con objetivos predeterminados convirtiendo la planta en una unidad de producción inteligente y altamente competitiva de la industria (4.0)

II MÉTODO

La metodología de esta investigación se basa en un **enfoque experimental de carácter cuantitativo**, fundamentado en la manipulación deliberada de variables independientes para evaluar su impacto causal sobre las variables dependientes dentro de un entorno controlado. Este diseño permite establecer una relación funcional entre los parámetros de entrada y la respuesta del sistema, garantizando la repetibilidad del proceso de producción de biodiésel. Para la ejecución de este método, se utiliza un **Controlador Lógico Programable (PLC)** como núcleo de procesamiento. La arquitectura del sistema permite la adquisición de señales analógicas y digitales provenientes de la instrumentación de campo (sensores de temperatura, presión y nivel), las cuales son procesadas mediante algoritmos lógicos para actuar sobre

los elementos finales de control. El diseño experimental se centra en la optimización de la respuesta dinámica del sistema; por ejemplo, al ajustar la ganancia proporcional (K_p), el tiempo integral y el tiempo derivativo en un lazo de control PID, se analiza la estabilidad de la función de transferencia del reactor.

Este enfoque permite realizar un análisis de respuesta transitoria, donde se evalúan criterios de desempeño como el sobre impulso (*overshoot*), el tiempo de establecimiento y el error en estado estacionario. Mediante la sintonización precisa de estos parámetros, es posible mitigar perturbaciones externas y asegurar que la temperatura se mantenga dentro del rango operativo óptimo, garantizando así la eficiencia de la reacción de transesterificación y la estandarización de la calidad del biocombustible obtenido según [7].

TABLA II
DOSIFICACIÓN Y RELACIONES DE MEZCLA PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES

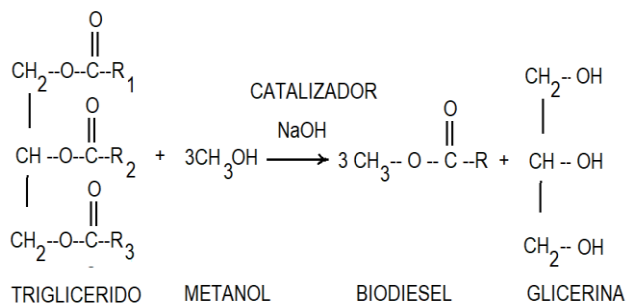
Volumen de aceite (mL)	Volumen de Metanol (mL)	Volumen de Catalizador (mL)
1000	200	2.3
1500	200	3.45
1500	300	2.3

Para el diseño del sistema de automatización, se debe comprender la dinámica físico-química del proceso de producción de biodiésel. El sistema se fundamenta en una configuración de etapas sucesivas: inicialmente, se realiza la preparación del metóxido (mezcla de alcohol y catalizador) y, posteriormente, se ejecuta la transesterificación en un reactor principal. Ambos procesos requieren un control térmico riguroso mediante sensores de precisión, cuyas señales son procesadas por el PLC para garantizar que la reacción se mantenga en el punto de operación óptimo.

La transesterificación es la reacción química central donde los triglicéridos (provenientes de aceites de soja, colza o girasol) reaccionan con un alcohol de cadena corta generalmente metanol debido a su bajo costo y alta reactividad en presencia de un catalizador alcalino. Se emplean comúnmente Hidróxido de Sodio (NaOH) o Hidróxido de Potasio (KOH) en concentraciones que oscilan entre el 0.3% y el 1.5% en peso. Este proceso rompe las moléculas de grasa para transformarlas en ésteres metílicos de ácidos grasos, que constituyen el biodiésel, y un subproducto de alto valor industrial: el glicerol.

Tras la reacción, el sistema de control debe gestionar la fase de separación y decantación, se obtiene el biodiesel inicialmente y el glicerol (más denso) se retira del fondo del reactor, el biodiésel crudo es sometido a un proceso de lavado y secado para eliminar trazas de alcohol, catalizador y jabones residuales, asegurando así el cumplimiento de los estándares de calidad internacionales.

La ecuación química global que rige este proceso según [8] se presenta a continuación:



La Tabla II detalla las relaciones volumétricas típicas entre el aceite vegetal, el metanol y el catalizador para pruebas de laboratorio.

Materias primas: Lípidos (Triglicéridos)

Los aceites vegetales y grasas animales utilizados en la producción de biodiésel están compuestos principalmente por triglicéridos (triacilglicerol). Químicamente, un triglicérido es un éster derivado de una molécula de glicerol unida mediante enlaces éster a tres cadenas de ácidos grasos. Estos ácidos grasos consisten en largas cadenas hidrocarbonadas que pueden ser saturadas o insaturadas, finalizando en un grupo carboxilo que reacciona durante el proceso de transesterificación. La estructura molecular de un triglicérido se representa de forma simplificada con tres radicales de ácidos grasos (R1, R2, R3), los cuales definen las propiedades físico-químicas del biodiésel resultante, tales como la viscosidad y el punto de inflamación:

(CH₂-O-CO-R₁), (CH-O-CO-R₂), (CH₂-O-CO-R₃)

Durante la reacción en el reactor, el catalizador rompe estos enlaces para separar el glicerol de los ésteres metílicos, permitiendo la obtención de un combustible de baja viscosidad apto para motores de combustión interna.

Para la selección de la materia prima, es fundamental analizar los parámetros físico-químicos que determinarán el rendimiento del motor y la vida útil del combustible. La Tabla III resume las propiedades críticas de los aceites más utilizados en comparación con el aceite de cocina usado destacando la necesidad de un control de procesos más riguroso cuando se emplean materias primas recicladas debido a su variabilidad.

TABLA III
CALIDAD DE ACEITES

aceite	Estabilidad a oxidación	Comportamiento en frío	Calidad de Ignición
Colza	Alta	Excelente	Buena
Palma	Muy alta	pobre	Excelente
Soya	Baja	Buena	Media
Aceite Reciclado	Baja	Variable	variable

La normativa **EN 14214** constituye el estándar de calidad más exigente a nivel internacional para los ésteres metílicos de ácidos grasos. A diferencia de otros marcos regulatorios, esta norma impone umbrales estrictos de pureza y límites precisos en la composición química, con el objetivo de garantizar la compatibilidad operativa en motores de combustión interna de última generación y asegurar la protección de los sistemas de inyección de alta presión.

TABLA IV
PARAMETRO FISICO-QUIMICO PRINCIPALES

Parámetro físico-químico	Limite (EN14214)	Relevancia en el desempeño
Contenido de Ester	Min. 96.5%	Asegura la eficiencia de la transesterificación
Numero de Cetano	Min 51.0	Determina la calidad de ignición y suavidad de marcha
Densidad a 15°C	860-900 Kg/m ³	Influye en la dosificación y pulverización del inyector
Viscosidad a 40°C	3.5-5 mm ² /s	Parámetro crítico para la lubricidad y el flujo del sistema
Estabilidad a la oxidación (a 110°C)	Min.8hs	Define la integridad del producto durante el almacenamiento

Metanol

El metanol, o alcohol metílico, es un compuesto orgánico volátil, altamente inflamable y tóxico, que actúa como el reactivo fundamental en el proceso de transesterificación. Su función principal es reaccionar con los triglicéridos para liberar los ésteres metílicos que conforman el biodiésel.

Catalizador

El catalizador es una sustancia crítica que incrementa la velocidad de la reacción química al reducir la energía de activación, sin ser consumida durante el proceso. En la producción industrial de biodiésel, se emplean hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH). Asimismo, se pueden utilizar catalizadores de tipo alcóxido, como el metóxido de sodio, que ofrecen una mayor eficiencia al evitar la formación de agua.

Producción de Biodiésel

En la producción industrial de biodiésel, se emplea frecuentemente el proceso de tipo semicontinuo (*semi-batch*), el cual combina la versatilidad de la carga por lotes con la eficiencia de la circulación de fluidos. Como se ilustra en la Fig. 3, el sistema utiliza reactores de tanque agitado [9], (CSTR - *Continuous Stirred-Tank Reactor*) equipados con una chaqueta de calentamiento por la que circula un fluido de temperatura en un rango óptimo de 50 °C a 60 °C, factor crítico para acelerar la cinética de la transesterificación.

El flujo operativo de producción

se divide en dos etapas principales gestionadas por el sistema de automatización (fig.3)

1.Formación del Metóxido: En un reactor preliminar, se dosifica el alcohol (metanol) y el catalizador hidróxido de potasio (KOH) o de sodio (NaOH) en concentraciones de 0.3% a 1.5% m/m. la cual se somete a una agitación mecánica constante para asegurar la completa disolución del catalizador, obteniendo como resultado el metóxido, un compuesto altamente reactivo.

2.Transesterificación y Separación: El metóxido es transferido al segundo reactor para mezclarse con el aceite vegetal (o residual). Tras completar el tiempo de residencia programado en el PLC, se detiene la agitación para permitir la separación de fases por diferencia de densidades. Mediante un proceso de decantación en condiciones de reposo, el glicerol (fase densa) se deposita en el fondo del reactor, mientras que el biodiésel (fase ligera) permanece en la parte superior. Finalmente, el glicerol es recuperado como un subproducto valioso para la industria cosmética y de jabones, mientras que el biodiésel crudo avanza hacia las etapas de lavado y purificación para cumplir con los estándares internacionales.

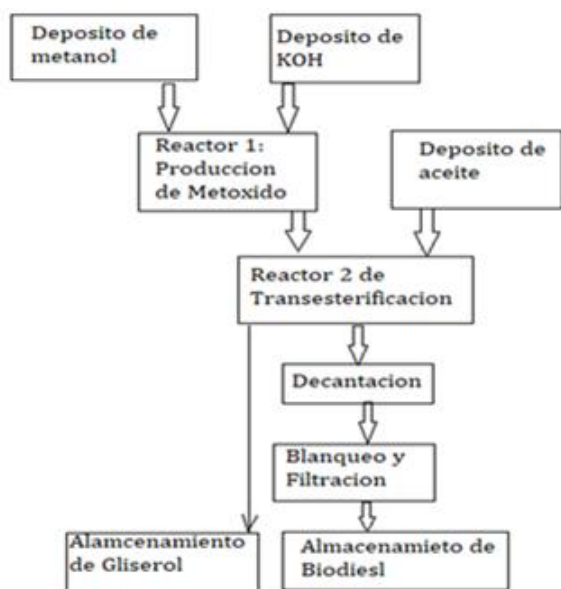


Fig.3 Diagrama de flujo de la producción de biodiésel

Reactores CSTR

Un CSTR (*Continuous Stirred-Tank Reactor*), o Reactor de Tanque Agitado Continuo, son recipientes de reacción utilizados en procesos industriales, utilizados en la producción de biodiésel, hay diversos tipos de reactores [9], tales como los de flujo continuo, discontinuos (batch) y semicontinuos. Para operaciones a pequeña escala, se suele utilizar un reactor semicontinuo (*semi-batch*), el cual permite la adición dosificada de reactivos. Este equipo integra un agitador para la homogeneización de los reactantes y un sistema de

calentamiento que opera a temperaturas cercanas a los 50 °C. Dicho calentamiento se realiza mediante vapor que circula por una camisa térmica, transfiriendo energía al interior del tanque por conducción. Según el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) mostrado en la Fig. 4, el controlador lógico programable (PLC) recibe señales de los sensores de temperatura, nivel y concentración, regula los caudales de entrada y Salida.

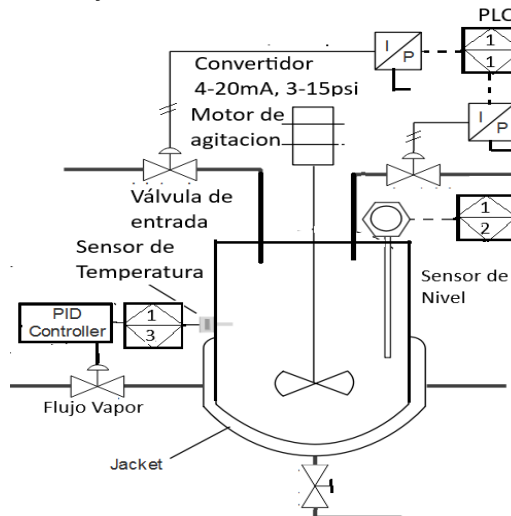


Fig.4 Control de las variables del reactor

Las variables críticas de control son la temperatura y el nivel dentro del tanque. Ambas se consideran salidas medidas o mediciones primarias, ya que son las variables que se regulan de forma directa. No obstante, también es fundamental monitorear la dinámica de la concentración del producto y la temperatura de la chaqueta (camisa), poniendo especial énfasis en esta última para asegurar la estabilidad del proceso térmico."

Partes de un Reactor

Para que un reactor de tanque agitado (CSTR) funcione de forma Segura y eficiente, necesita una combinación de componentes mecánicos e instrumentos de control (Fig. 4)

1. Componentes Mecánicos (Estructura)

- Recipiente (Tanque): donde ocurre la reacción.
- Jacket: Espacio para circular fluido térmico (agua o vapor).
- Agitador (Impulsor): aseguran la mezcla homogénea.
- Baffles (Deflectores): evitan remolinos y turbulencia.
- Motor y Reductor: para el giro del agitador.

2. Instrumentación y Sensores

Estos dispositivos miden las variables y envían la señal al PLC. Son los sensores de Temperatura (RTD), Presión, Medidor de Nivel: (Radar, ultrasónico) Asegura que el volumen de reacción sea constante y evita que el reactor se rebose o trabaje en seco, sensores de Flujo (Caudalímetros): En las líneas de entrada y salida para controlar exactamente cuánto reactivo entra y cuánto producto sale, Sensores Analíticos: (pH, Redox o conductividad) Introducidos directamente en la

mezcla para monitorear el progreso de la reacción en tiempo real, todos estos sensores, instrumentos emiten señales análogas estándar de (0 a 10 V) 0 (4 a 20 mA) para ser procesadas por el PLC.

Diseño del reactor para la producción de metóxido

Para llevar a cabo los estudios térmicos pertinentes, es de importancia diseñar un reactor cilíndrico de fondo cónico; esta geometría es crucial, ya que facilita la decantación y la posterior separación de las fases de biodiésel y glicerina resultantes de la transesterificación. De forma análoga, se diseña un segundo reactor para la mezcla del metóxido con los aceites vegetales. Para el cálculo dimensional, (Fig. 5), se consideran los siguientes parámetros: una altura del cilindro 0.54 m, y del cono 0.071 m, con diámetro de 0.36 m y un diámetro de la base inferior del cono de 0.0254 m. aplicando la formula del volumen del cono truncado y del cilindro:

$$V_{cono} = \frac{1}{3} \pi h (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) = \frac{1}{3} \pi 0.071 (0.18^2 + 0.0127^2 + 0.18 \times 0.0127) =$$

$$0.0026 \text{ m}^3$$

$$V_{cilindro} = \pi (r_1)^2 h_1 = \pi (0.18)^2 \times 0.54 = 0.05496$$

$$V_{Total} = 0.0026 + 0.05496 = 0.0846 = 57.5 \text{ litros}$$

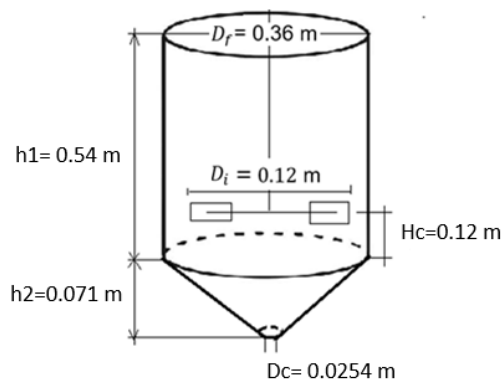


Fig.5 Diseño del reactor para la producción del metóxido,

Se obtiene un volumen Total (57.5 L): Es un tamaño estándar para lotes de 50 litros. Al dejar un pequeño espacio libre (aproximadamente un 13% de "borde libre"), evitas derrames durante la agitación vigorosa y permites la expansión térmica de los reactivos.

Control de temperatura por PID

Para la regulación térmica del reactor se emplea un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). El sistema se basa en la función de transferencia que relaciona la temperatura interna del reactor con el flujo de calor aplicado (Fig 6). Dentro de este lazo de realimentación, un sensor mide la temperatura actual para generar la variable de proceso (PV). Esta señal se compara con el valor de referencia o Set Point (SP) la diferencia entre ambos define el error, el cual actúa como la señal de entrada al algoritmo PID para corregir la temperatura y estabilizar el sistema.

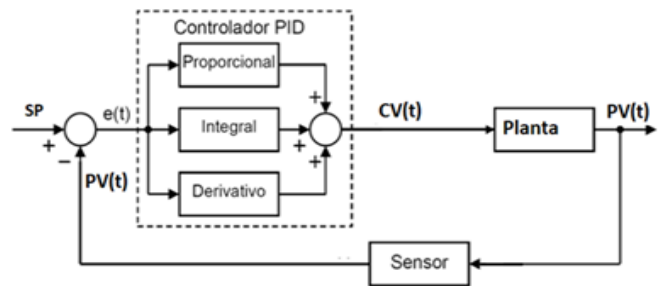


Fig.6 Diagrama de control, función PID

La variable de control CV(t) es la que controla la planta que es el reactor, analíticamente el proceso se describe mediante las ecuaciones siguientes:

$$CV(t) = k_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt}, \text{ aplicando Laplace: } CV = k_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

$$CV = k_c \left(1 + \frac{K_i}{k_p s} + \frac{K_d s}{k_p} \right), \quad t_i = \frac{K_p}{K_i}, \quad t_d = \frac{K_d}{K_p}$$

$$CV = k_c \left(1 + \frac{1}{t_i s} + t_d s \right),$$

$$\text{donde el error: } e = T_{set\ point} - T(t)_{error}$$

Análisis de control de temperatura de reactores

La función de transferencia de calor de primer orden, modelada mediante la transformada de Laplace, relaciona el cambio de temperatura T(s) de salida con una entrada de calor Q(s) expresada por la ecuación, denominada también planta

$$G(s) = \frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{k}{(as+1)}$$

El objetivo es calcular la constante de tiempo (a) y la ganancia K, para el cálculo consideramos las propiedades físicas del metanol que es predominante respecto del KOH para un volumen de reactor de 57.5 litros, con estos datos establecemos la siguiente Tabla V

TABLA V

PROPIEDADES TERMO FISICAS DEL REACTOR

Símbolo	Variable	Valor	Unidad
V	Volumen de reactor	0.0575	m ³
D	Densidad (Metanol)	792	Kg/m ³
Ce	Calor específico	2530	J/(Kg. K)
w	Flujo Masico	0.05	Kg/s
h	Coficiente transferencia	350	W/(m ² . K)
A	Área de la chaqueta	0.75	m ²

Cálculo de los parámetros del reactor CSRT para producir metóxido:

1.Determinación de la masa y capacidad térmica

La masa total contenida en el reactor (m) y la energía necesaria para elevar su temperatura un grado (m. Ce)

$$m = D.V = 792 \times 0.0575 = 45.54 \text{ Kg}$$

$$m.Ce = 45.54 \times 2530 = 115,216.2 \text{ J/K}$$

2. Cálculo de la tasa de pérdida y transporte de energía
Sumamos el calor transportado por el flujo de salida y el calor transferido a través de la chaqueta

$$w. Ce = 0.05 \times 2530 = 126.5W/K$$

$$h. A = 350 \times 0.750 = 262.5W/K$$

$$\text{Total (T): } 126.5+262.5=389W/K$$

3. obtención de la constante de tiempo a y ganancia K

$$\text{Constante de tiempo: } a = m. Ce / T = 115,216.2 / 389 = 296.18s$$

$$\text{Ganancia : } K = w. Ce / T = 126.5 / 389 = 0.325$$

Sustituyendo en la función transferencia de primer orden

$$\frac{T(s)}{Q(s)} = \frac{k}{(as+1)} = \frac{0.325}{(296.18s+1)}$$

Esta función denominada planta es controlada por un PID con las siguientes constantes:

$$Kc=2000 \text{ ganancia PID}$$

$$Ti=10000 \text{ Tiempo integrativo}$$

$$Td=30 \text{ Tiempo derivativo}$$

CV=Kc. (1+1/ (Ti. s) +Td.s) controlador PID, con estos datos realizamos un programa en MATLAB, y aplicando la función escalón obtenemos la siguiente respuesta

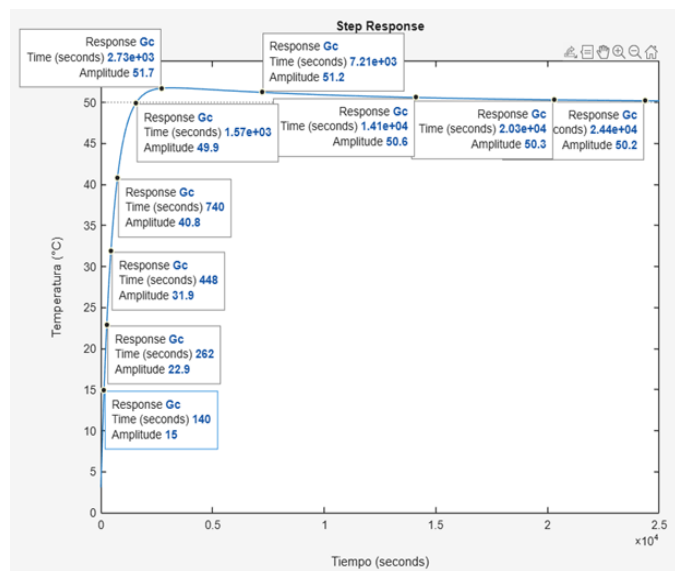


Fig.7 Temperatura en función del tiempo

El escalón unitario es la herramienta fundamental para evaluar la robustez de un sistema de control. Representa un cambio brusco e instantáneo en la consigna (setpoint), forzando al controlador PID a corregir el error máximo posible en el menor tiempo posible. De la respuesta al Escalon unitario obtenemos los siguientes valores

TABLA VI
VALORES OBTENIDOS DE MATLAB

N	Tiempo (s)	Temperatura °C
1	0.0140	16.0
2	0.0262	22.9
3	0.0468	31.9
4	0.0740	40.8
5	0.1670	49.9
6	0.2730	51.7
7	0.7210	51.2
8	1.4100	50.6
9	2.0300	50.3
10	2.4400	50.2

Análisis estadístico: control de temperatura reactor 1

Para los cálculos utilizamos la TABLA VI, para evaluar el "Error medio cuadrático (MSE) y el Chi cuadrado.

a) Valor medio cuadrático medio

Mide la magnitud de las variaciones alrededor del valor de la temperatura objetivo que es 50°C para las 10 muestras mediante la formula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{objetivo})^2}$$

Donde T_i = temperatura medida, $T_{objetivo} = 50^\circ C$ $N= 10$ muestras

$$RMS = \sqrt{\frac{(16-50)^2 + (22.9-50)^2 + \dots + (50.2-50)^2}{10}} = 15.19^\circ C$$

Análisis de los resultados

El RMSE es relativamente alto 15.19 principalmente debido a los primeros cuatro valores de temperatura (16, 22.9, 31.9, 40.8) que están muy lejos del objetivo 50 °C.

Estabilidad en estado estacionario

a partir de la quinta medición el RMSE disminuye drásticamente a 0.897, esta reducción evidencia que el controlador logra mantener la temperatura con una desviación mínima, asegurando que el proceso sea altamente controlado

b) Chi Cuadrado

Esta prueba evalúa si las desviaciones observadas son consistentes con el error esperado del sistema. Al no disponer de un error experimental previo, se utiliza la suma de las desviaciones respecto al valor objetivo como medida de dispersión:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(T_i - T_{objetivo})^2}{T_{objetivo}}$$

donde T_i es la temperatura medida, y T_o la temperatura objetivo, denominado También Set-Point.

$$\chi^2 = \frac{(49.9-50)^2}{50} + \frac{(51.79-50)^2}{50} + \dots + \frac{(50.2-50)^2}{50} = 0.096$$

Dado que nuestro χ^2 calculado es 0.0966 cercano a cero, indica una concordancia casi perfecta con lo que se espera que

funcione el reactor, podemos concluir que no hay evidencia de una desviación significativa. El proceso se comporta de manera excelente respecto al objetivo de 50 |C.

Es importante precisar que la producción de biodiésel se utiliza dos reactores. Este análisis estadístico se ha aplicado de igual manera al segundo reactor para garantizar la calidad del producto final.

Programación del automata PLC S7-1200

Para la obtención de biodiésel B100 bajo los estándares de calidad de la norma ASTM D6751, se establecieron las siguientes condiciones experimentales

1. Relación molar (Metanol/Aceite): 6:1.
2. Catalizador: (NaOH) al 1 % en peso respecto al aceite.
3. Tiempo de reacción: 50 minutos.
4. Temperatura de operación: 50 °C.

Estos parámetros sirvieron como base para la programación del PLC S7-1200, utilizando el software TIA portal

Arquitectura de la Programación:

El programa se estructuró mediante la división por bloques

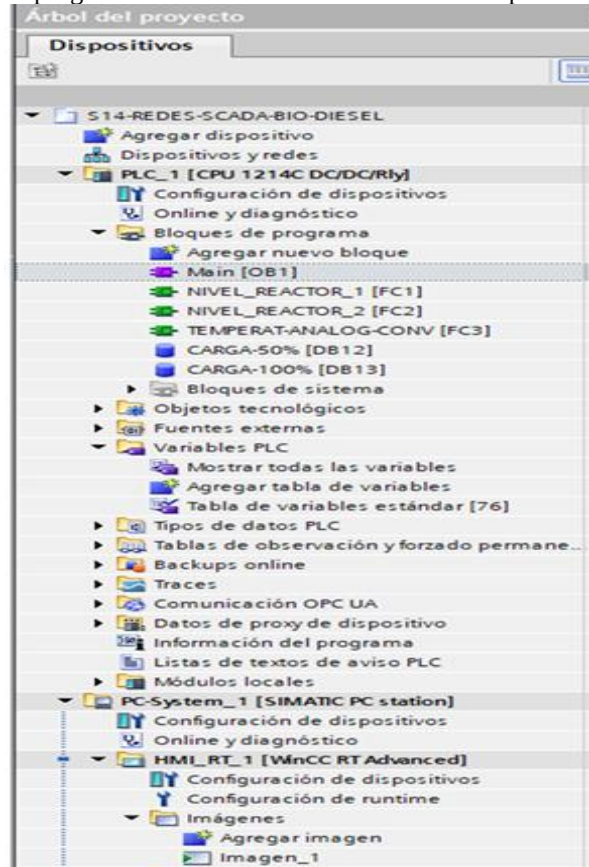


Fig.8 Bloques de programación en Ladder

En el bloque de organización OB1 se ha desarrollado el programa y se han creado 3 bloques de funciones de control FC1, FC2, FC3 con sus respectivas variables locales (Fig.8) lo que facilita el modularidad, el mantenimiento del programa.

Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Se ha desarrollado la interfaz HMI (Human-Machine-interface) presentada en la (Fig. 9). que permite la supervisión y el control del proceso productivo, facilitando al operador la monitorización de variables (temperatura, presión, caudal) el estado de los actuadores. En la lógica programada el PLC S7-1200 es el núcleo del sistema de control, ejecuta las funciones críticas de: dosificación, entrada de reactivos según las relaciones molares establecidas, sincronización: Gestión de los tiempos de residencia en los reactores de metóxido y transesterificación.

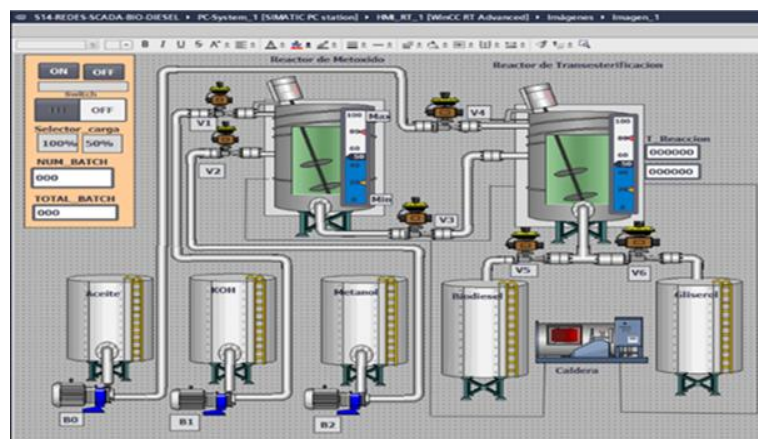


Fig.9 Planta de producción de biodiesel: HMI

Las pruebas experimentales y la validación del programa se llevaron a cabo en el laboratorio de electrónica de la Universidad Nacional Federico Villarreal, utilizando el hardware del PLC S7-1200 disponible en dichas instalaciones.

Norma ISA 5.1 y Diagrama P&ID

Un diagrama P&ID (Piping and Instrumentación Diagram) es una representación gráfica detallada de la arquitectura de los procesos industriales. Utilizando la simbología estándar de la norma ISA 5.1 [12], se han representado los componentes de la planta de biodiésel, mediante software P&ID, Fig. 10.

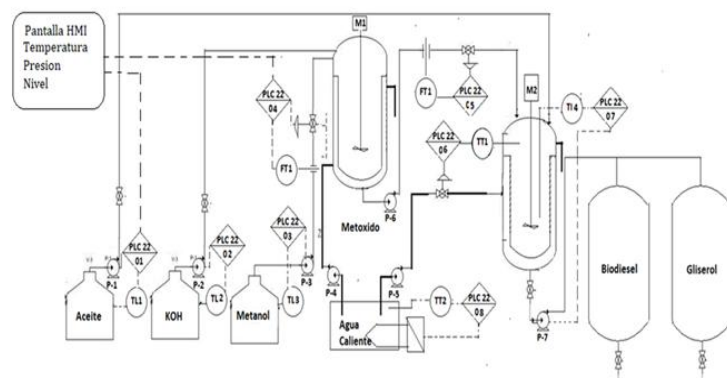


Fig.10 Planta de producción de biodiesel: diagrama P&ID

III RESULTADOS

En esta sección se describe la secuencia de actividades desarrolladas y los hallazgos técnicos derivados de la experimentación. Se analizan las frecuencias de eventos, las observaciones cuantitativas y la causalidad entre las variables de control y la respuesta del sistema.

a) Análisis de la estabilidad térmica del reactor

La primera novedad relevante surge del análisis del comportamiento térmico mediante la función de transferencia de primer orden (relación: Temperatura / Calor). Al aplicar el controlador PID con los parámetros seleccionados, se observaron los siguientes fenómenos dinámicos (Fig. 7):

1. Respuesta Transitoria: Se identificó un ligero sobre impulso (overshoot) que alcanza una temperatura máxima de 51.7 °C en el instante $t=0.2730$ seg. Este comportamiento es típico en sistemas donde se busca una respuesta rápida.

2. Régimen Permanente: Tras el periodo de estabilización, el sistema entra en estado estacionario, manteniendo la temperatura de forma constante.

3. Error de Estado Estable: La temperatura final alcanzada es de 50.2 °C, lo que representa una desviación de apenas 0.2 °C respecto al valor objetivo o *Set Point* (50 °C). se confirma que los parámetros del PID elegidos proporcionan un control óptimo de la inercia térmica del reactor.

b) Análisis de seguridad térmica

En el proceso de producción, es fundamental el control estricto de la temperatura debido al uso de alcoholes. En este caso, el etanol presenta un punto de ebullición de aproximadamente 78.37 °C; al ser una sustancia volátil e inflamable, su presión de vapor aumenta rápidamente con la temperatura. Debido a que hierve a una temperatura considerablemente menor que el agua producto de sus fuerzas intermoleculares y puentes de hidrógeno se recomienda trabajar a 50 °C. Esta temperatura de operación garantiza una cinética de reacción eficiente sin riesgo de evaporación excesiva o ignición del reactivo.

c) Evaluación estadística del desempeño:

Para validar la estabilidad del sistema, se analizaron 10 muestras de temperatura en estado estacionario, obteniéndose los siguientes indicadores:

1. Error Cuadrático Medio (RMSE):

Se obtuvo un valor de 0.897. Este resultado, al ser inferior a la unidad, confirma que el proceso está bajo control y mantiene una alta precisión respecto al objetivo (Set-Point).

2. Prueba de Chi-cuadrado (χ^2):

El valor calculado fue de 0.0966.

Al ser un valor extremadamente bajo y cercano a cero, se concluye que existe una concordancia casi perfecta entre los datos observados y el valor esperado. No se encontró evidencia estadística de desviaciones significativas, lo que demuestra un comportamiento excelente del lazo de control frente al objetivo de 50 °C.

d) **Diseño de un reactor:** de 57.5 litros, tipo cilíndrico con terminación cónica en el fondo, este tipo de diseño es muy importante porque facilita la decantación y separación de las fases de biodiésel y glicerina, las cuales se forman como subproductos del proceso de transesterificación. Es la más común en plantas de pequeña y mediana escala, así como en reactores que funcionan de forma híbrida: mezcla y decantación

e) **Programación en lenguaje Ladder:** se ha programado el funcionamiento de una planta de biodiesel, para capacidades plena carga (100%) y producción a media carga (50%), con sensores de nivel, temperatura, control sobre las válvulas de los tanques y accionamiento del motor de agitación de los dos reactores. listo para ser implementado, en una situación real.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

a) Según la referencia [2] nos dice que “el nivel de emisión de dióxido de carbono CO₂ del petróleo, es de 2.5 billones-tonelada” que contaminan el medio ambiente y producen severos cambios climáticos, sin embargo, se encuentra que: El biodiesel también contamina el medio ambiente al producir por emisión por medio de los vehículos: óxidos de nitrógeno (NOx) y de acuerdo a la TABLA I, el nivel de emisión de (CO₂) biodiesel ocupa el cuarto lugar en contaminación ambiental

b) según la referencia [13] Durante las últimas dos décadas, Brasil, ha producido 30.000 millones de litros de etanol al año, En 2010, el país se convirtió en el segundo productor mundial de biodiesel con una producción de 2,4 millones, sin embargo, se encuentra un problema en la producción de biodiesel, debido a que utiliza mayor cantidad de áreas cultivables para las materias primas poniendo en compromiso las áreas para la alimentación humana, “su producción puede fomentar la deforestación”

c) Según la referencia [14] otras las tendencias de usar combustibles para vehículos son el Hidrógeno verde: producido mediante la electrólisis del agua, utilizando energía renovable para separar el hidrógeno del oxígeno. Así mismo los combustibles sintéticos: creados al combinar CO₂ capturado de la atmósfera con hidrógeno verde, generando compuestos químicos similares a los combustibles fósiles, pero con menor impacto ambiental.

d) según [15] la adaptación de las políticas y los mercados, y las capacidades institucionales y humanas. Todas estas áreas están estrechamente vinculadas a la seguridad energética, que todavía se ve predominantemente dominada por los combustibles fósiles. Esta opinión se contradice con [13], en donde Brasil se ha convertido en el segundo productor de mundial de bio diésel.

CONCLUSION

La relevancia de esta investigación sobre biocombustibles radica en su potencial como alternativa estratégica frente a los combustibles fósiles derivados del petróleo, en este contexto,

el uso del biodiésel ha cobrado un impulso global, consolidándose en las matrices energéticas de un número creciente de países, por las ventajas competitivas y socioambientales de este biocombustible

Tensiones estructurales y seguridad alimentaria

A pesar de los beneficios del biodiésel en la reducción de gases de efecto invernadero, su producción enfrenta desafíos estructurales relacionados con el uso del suelo, la producción de alimentos y la geopolítica energética. Estos conflictos surgen principalmente de la competencia entre el modelo agrícola energético y el alimentario, según datos de la FAO, aproximadamente el 12% de las tierras agrícolas mundiales se destinan actualmente a la bioenergía, esto crea tensiones sobre la seguridad alimentaria global.

d) Mejoras: mediante Reactores Ultrasónicos

Como propuesta de mejora (Fig. 11), se plantea el uso de reactores ultrasónicos, que operan en un rango de frecuencia de 20 kHz a 30 kHz. Que producen ondas de cavitación acústica que provoca la formación, crecimiento y colapso violento de microburbujas de vapor, el colapso de estas burbujas genera puntos localizados de alta temperatura y presiones extremas a escala microscópica, lo que acelera drásticamente la cinética de la transesterificación.

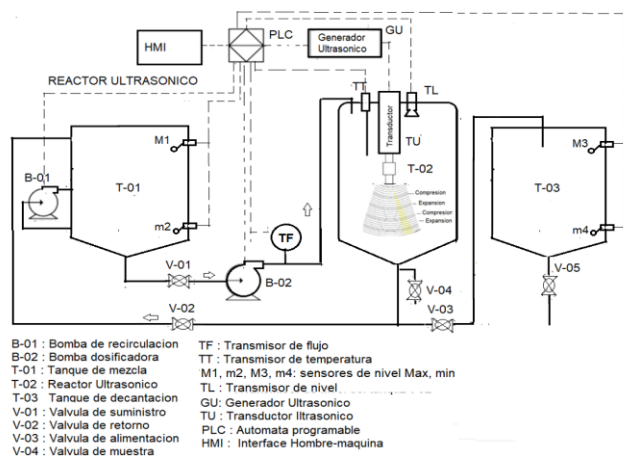


Fig.11 Planta de producción de biodiesel con ultrasonido

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue posible gracias al apoyo y las facilidades brindadas por la Facultad de Ingeniería Electrónica e Informática de la Universidad Nacional Federico Villarreal. Expreso mi especial gratitud por el acceso al equipamiento del laboratorio de automatización, cuyos controladores lógicos programables (PLC S7-1200) y software especializado permitieron la validación experimental y el desarrollo técnico de este proyecto.

V. REFERENCIAS

[1] Grahnan, «are we running out of fossil Fuels?»
<https://bkvenergy.com/learning-center/running-out-of-fossil-fuels/>

fuels/#:~:text=de%20energ%C3%ADa%20crecen.-,Aceite,m%C3%A1s%20corto%2C%20de%20a%C3%B1os. 2025

[2] Hannah, «Emisiones de CO₂ por combustible»
<https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel. 2020>

[3] Hernández «Análisis de competitividad y rentabilidad de producción de biodiesel», revista mexicana de ciencias ISSN 2007-9230 <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.716. .2018>

[4] Maldonado: «obtención de biodiesel a partir de aceite reciclado»
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7081/T010_72208840_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.2020

[5] Medina «Biodiesel, un combustible renovable», red revistas científicas Ridalg.Org Número 55, (62-70) ISSN: 1665-4412
<https://www.redalyc.org/pdf/674/67424409008.pdf.2012>

[6] Ilesanmi «Automation and Control of a Multi- feedstock Biodiesel Production Plant»
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03772063.2023.2220285.2022>

[7] Murillo, «Métodos de investigación de enfoque experimental»https://www.academia.edu/37784416/M%C3%89TODOS_DE_INVESTIGACI%C3%93N_DE_ENFOQUE_EXPERIMENTAL.2016

[8] Torossi, «la transesterificación en la producción de biodiesel» <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2082917.pdf.2006>

[9] Miranda, «Modelado de un reactor CSTR Universidad de Carabobo»
https://www.researchgate.net/publication/237039047_Modelado_de_un_react_or_quimico_tipo_CSTR_y_evaluacion_del_control_predictivo_aplicando_Ma_tlab-Simulin.2008

[10] Mayur K, «Analysis of CSTR Temperature Control with PID, MPC & Hybrid MPC-PID Controller»
https://www.researchgate.net/publication/360416362_Analysis_of_CSTR_Temperature_Control_with_PID_MPC_Hybrid_MPC-PID_Controller#full-text.2022

[11] Diquima, «Control de reactores químicos»
https://www.diquima.upm.es/old_diquima/docencia/control_procesos/docs/Tema6_reactores.2018

[12] rubio, «estandarización según norma isa s5.1»
<https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0063155.pdf.2022>

[13] Bergmann, «Produccion de biodiesel en Brasil y materias primas alternativas»
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113000142.2013>

[14] Descartes; «Combustibles del futuro»
<https://www.descartes.com/es/resources/blog/combustible-del-futuro-que-es-y-cuales-son-sus-beneficios.2024>

[15] Irena, «Geopolítica de la transición energética seguridad energética»
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Apr/IRENA_Geopolitics_transition_energy_security_2024_ES.pdf.2024

[16] Hielscher, «Ultrasonic Technology»
https://www.hielscher.com/es/biodiesel_ultrasonic_mixing_reactors.htm.2023

[17] López, «Análisis de biodiesel mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas»
https://www.edu.xunta.gal/centros/iessardineira/system/files/Proyecto%20Dua_l_BDGC-MS2015.pdf.2015