

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Automatización de la planta de Biodiésel del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

Andrés Mauricio Monsanto González

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2017



Automatización de la planta de Biodiésel del Laboratorio de  
Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Automatización de la planta de Biodiésel del Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

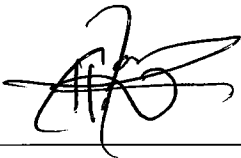
Andrés Mauricio Monsanto González

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

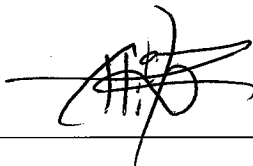
Guatemala

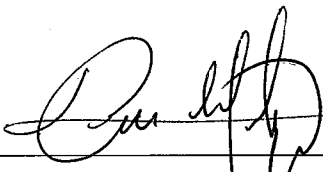
2017

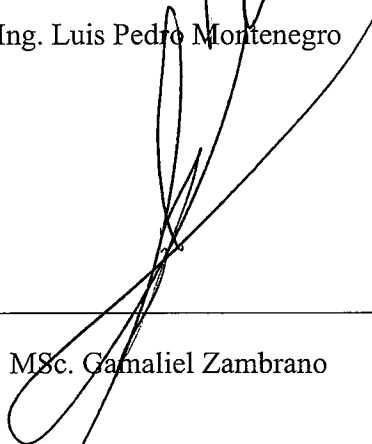
Vo. Bo. :

(f)   
MSc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
Ing. Luis Pedro Montenegro

(f)   
MSc. Gamaliel Zambrano

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de junio de 2017

# ÍNDICE

|                                       |      |
|---------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE CUADROS.....                | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                | VII  |
| RESUMEN .....                         | VIII |
| I. INTRODUCCIÓN.....                  | 1    |
| II. OBJETIVOS .....                   | 2    |
| A. GENERALES .....                    | 2    |
| B. ESPECÍFICOS.....                   | 2    |
| III. JUSTIFICACIÓN .....              | 3    |
| IV. MARCO TEÓRICO .....               | 4    |
| A. Generalidades del biodiésel: ..... | 4    |
| B. Automatización industrial.....     | 5    |
| C. Variador de frecuencia.....        | 8    |
| V. ANTECEDENTES .....                 | 10   |
| VI. METODOLOGÍA .....                 | 12   |
| A. Familiarización del proceso .....  | 12   |
| B. Rediseño de planta .....           | 12   |
| C. Automatización de la planta.....   | 12   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| D.    | Diseño de interfaz gráfica y diagramas eléctricos unifilares ..... | 13 |
| VII.  | RESULTADOS .....   | 15 |
| VIII. | DISCUSION DE RESULTADOS .....                                      | 36 |
| IX.   | CONCLUSIONES .....   | 40 |
| X.    | RECOMENDACIONES .....  | 41 |
| XI.   | BIBLIOGRAFÍA .....   | 42 |
| XII.  | ANEXOS .....   | 43 |
| A.    | Sistema de diseño de automatización .....                          | 43 |
| B.    | Planos eléctricos unifilares .....                                 | 48 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 1: Listado de válvulas electrónicas utilizadas en el sistema ..... | 16 |
| Cuadro 2: Listado de sensores utilizados en el sistema .....              | 18 |
| Cuadro 3: Listado de salidas en el sistema .....                          | 18 |
| Cuadro 4: Listado de entradas del sistema.....                            | 22 |
| Cuadro 5: Escalamiento utilizado para los sensores .....                  | 23 |
| Cuadro 6: Memoria y banderas utilizadas para el sistema.....              | 24 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Diagrama de funcionamiento de un PLC .....                             | 6  |
| Figura 2: Generalización de un sistema automatizado .....                        | 6  |
| Figura 3: Ciclo de operación de un PLC.....                                      | 7  |
| Figura 4: Porción de un programa Ladder para PLC.....                            | 8  |
| Figura 5: Variador de frecuencia Powerflex 4.....                                | 9  |
| Figura 6: Diagrama de primera fase de automatización de planta de biodiésel..... | 10 |
| Figura 7: Panel de control para la planta de biodiésel .....                     | 11 |
| Figura 8: Botones para el funcionamiento de motores en forma manual .....        | 11 |
| Figura 9: Diagrama de planta rediseñada.....                                     | 15 |
| Figura 10: Calibración de sensor RTD .....                                       | 32 |
| Figura 11: Calibración de sensor de conductividad.....                           | 32 |

## RESUMEN

El presente trabajo contiene el estudio e implementación de un proceso de automatización para la planta de biodiésel que se encuentra en el laboratorio de operaciones unitarias en la Universidad del Valle de Guatemala.

Dicha planta poseía un proceso ya automatizado. Por la alta demanda, la planta creció, cambiando así el proceso de producción y descartando el proceso de automatización anterior. Actualmente, la producción de biodiésel se realiza de manera manual, justificando así la re-automatización de la planta.

Ya que la planta se encontraba automatizada previamente, el equipo previamente instalado se utilizó nuevamente. Adicionalmente, se realizó un estudio para determinar la cantidad de material que se requirió. También se añadió cableado para la reacomodación de sensores y actuadores. Este cableado se instaló con un código de color para su fácil inspección. Se procedió a programar un controlador lógico programable para llevar a cabo la automatización y accionamiento de los actuadores y sensores.

Por último, como parte indispensable de cualquier máquina o equipo de automatización, se realizó un manual de usuario para que cualquier operario conozca su funcionamiento, previo a utilizar la máquina.

Los resultados obtenidos fueron exitosos, ya que se logró una automatización del proceso de biodiésel, para la producción manual o automática. La automatización permitió eficiencia en la producción del biocarburante, obteniendo una reacción completa del aceite con el neutralizante.

# I. INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un combustible que sustituye la gasolina para motores diésel. Este es producido normalmente de materia prima como aceites vegetales o grasas animales. A pesar de su diferente composición, el biodiésel posee las mismas propiedades que un combustible diésel de origen fósil. El biodiésel es altamente utilizado en el mundo ya que posee el beneficio de reducir considerablemente la cantidad de emisión de dióxido de carbono, el cual perjudica la capa de ozono del planeta. Hoy en día, este combustible alternativo ha crecido dado a la popularidad de métodos de generación alterna de energía.

La producción de biodiésel en la Universidad del Valle de Guatemala comenzó en el año 2007, produciendo 60 kg cada semana. A raíz de la alta demanda, el departamento de ingeniería química buscó la ampliación de dicha planta para aumentar la capacidad de producción, y realizar el proceso de forma automática. La automatización industrial es un fenómeno que está tomando protagonismo en el mundo globalizado en la actualidad.

Este trabajo se delimitó en la automatización de la planta piloto de biodiésel que se encuentra en el laboratorio de operaciones de la Universidad del Valle de Guatemala. Para poder realizar dicha automatización, fue necesario poder entender el proceso de realización y reacción del biodiésel, por lo que se requirió formar parte del equipo de producción.

Como resultado principal, se obtuvo la correcta y exitosa automatización del sistema, obteniendo un programa con una interfaz gráfica amigable para el personal y estudiantes del Departamento de Ingeniería Química. Se logró una independencia de la planta de biodiésel con el personal encargado de la utilización.

## II. OBJETIVOS

### A. GENERALES

Automatizar la planta de biodiésel localizada en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, la cual ha recibido un incremento de capacidad de 316%.

### B. ESPECÍFICOS

- Implementación y programación de diferentes componentes electrónicos y eléctricos para el escalamiento de la planta e instrumentación electrónica faltante para el proceso.
- Calibración de los componentes electrónicos instalados en la planta.
- Programación del proceso de fabricación de biodiésel por medio de un Controlador Lógico Programable PLC.
- Diseñar e implementar una interfaz gráfica amigable al usuario
- Realizar un manual de usuario y los diagramas eléctricos correspondientes de la máquina.

### III. JUSTIFICACIÓN

Cuando se habla de automatización de una máquina, se habla de tener un proceso ordenado, económico y eficiente.

La planta de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala está posicionada en el mercado de combustibles y energía renovable. Actualmente su cliente más importante es la municipalidad capitalina de Guatemala. Como potencial segundo cliente, se encuentra el condado de Cayalá.

La compra de biodiésel por parte de la municipalidad de la capital es semanal. Teniendo un proceso manual para la creación de este mismo es ineficiente, perdiendo tiempo al momento de tener el producto listo.

Debido a la alta demanda, la planta recibió un aumento de capacidad, pasando de 60L por lote a una capacidad de 250L por lote de aceite, teniendo así un incremento de capacidad de 316% en la producción de biodiésel.

Como objetivo, se busca llevar a cabo la implementación de actuadores e instrumentación de la planta con la nueva capacidad, así como mejorar la eficiencia de la producción, programando y automatizando la máquina.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Generalidades del biodiésel:

Biodiésel consiste en ésteres metílicos de ácidos grasos, derivados de aceites vegetales o grasas animales. Tiene como resultado combustible para motores diésel, obtenido a partir de la reacción química de transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol generalmente metílico. (Dickson, 2011)

El biodiésel posee las mismas características que el gasóleo de automoción en cuanto a densidad. Además, presenta un punto de inflamación superior. Por esta razón el biodiésel tiende a ser mezclado junto combustibles fósiles e incluso llega a sustituirlo al adaptarlo de manera conveniente. (Miliarium, 2007)

El proceso de biodiésel está generalmente separado en seis etapas: (Dickson, 2011)

1. Formación de metóxido
2. Reacción química (transesterificación)
3. Separación biodiésel con glicerina
4. Lavado con agua
5. Separación
6. Secado

1. Formación de metóxido. Para obtener el metóxido se utiliza de manera general un catalizador como el metanol, que junto al hidróxido de sodio, ejecutan una reacción exotérmica previa a la reacción con el aceite. Esta etapa suele realizarse con mucha precaución ya que la reacción secreta vapores tóxicos. (Dickson, 2011)

2. Reacción química. Esta reacción es llamada transesterificación, que consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen dichas reacciones y posteriores fases de separación, purificación y estabilización. Las condiciones de operación más habituales son a temperaturas de 65°C, aunque rangos de temperaturas desde 25°C a 85°C también han sido publicadas. Es necesaria una agitación rápida para una correcta mezcla en el reactor del aceite, el catalizador y el alcohol. (Miliarium, 2007)

3. Separación de biodiésel con glicerina. Al terminar la reacción, se obtiene una fase en el fluido que difiere una con otra. Por un lado, se obtiene el biodiésel crudo, y por otra parte se obtiene glicerina. Por diferencia de densidades, la glicerina se encuentra al fondo del reactor. La glicerina se tiende a desechar o reciclar.

4. Lavado con agua. La reacción da como resultado biodiésel el cual se encuentra en estado de crudeza. El lavado del biodiésel consiste en mezclar este biocarburante con 50% del volumen con agua para eliminar la glicerina restante al momento de separación. Para obtener un biodiésel que alcance altos niveles de pureza, se realiza una cantidad de 10 lavados aproximadamente, de 20 minutos cada uno.

5. Separación. Cuando se realiza el lavado del biodiésel, se deja la mezcla en asentamiento para nuevamente tener dos fases diferentes en el fluido. Parecido a la separación luego de la reacción, esta separación consiste en la mezcla de glicerina con agua, y el carburante biodegradable. A diferencia de la glicerina mezclada con agua, esta es desecheda inmediatamente luego de su extracción.

6. Secado. Para eliminar el agua restante que queda en la mezcla de biodiésel, se realiza un calentamiento en tanque, donde la temperatura llega a más de 100° C. El secado de biodiésel dura 8 horas. Al finalizar este proceso, se obtiene ya el carburante biológico deseado.

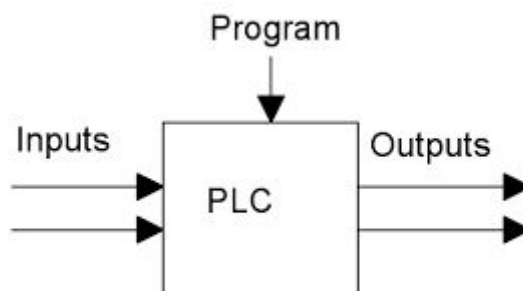
## B. Automatización industrial

La Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas define la automatización como el conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas. De la definición original se desprende la definición de automatización como la aplicación de la automática al control de procesos industriales. (Ponsa, 2007)

Un proceso se refiere a aquella parte del sistema en que a partir de la entrada de material, energía e información, se genera una transformación ligada a cambios en el entorno. Los procesos industriales son conocidos como procesos continuos. Durante tres décadas se han utilizado autómatas programables en la industria, al reconocer su labor eficaz en el control secuencial de procesos. (Ponsa, 2007)

El PLC es un dispositivo de estado sólido, diseñado para controlar procesos secuenciales que se ejecutan generalmente en un ambiente industrial. Este va relacionado con la máquina que desarrolla procesos de producción y controlan su trabajo. El PLC realiza funciones como la recolección de datos de las fuentes de entrada a través de fuentes digitales y analógicas, tomar decisiones en base a criterios programados, actuar sobre los dispositivos externos mediante las salidas analógicas y digitales. (Prieto, 2007)

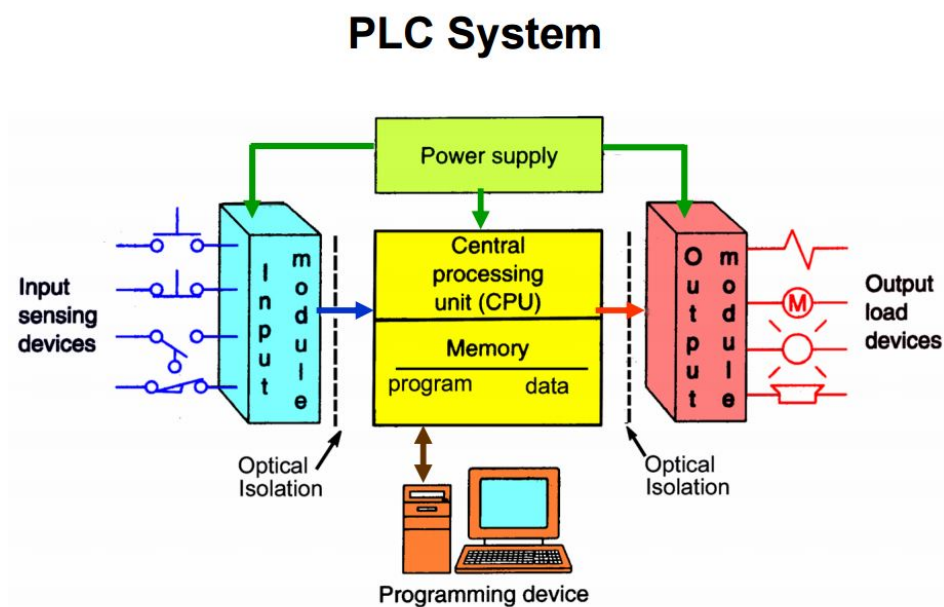
Figura 1: Diagrama de funcionamiento de un PLC



(Bolton, 2006)

1. Entradas y salidas. La sección de entradas mediante el interfaz adapta y codifica de forma comprensible las señales procedentes de los dispositivos de entrada. Hay dos tipos de entradas: entradas digitales y analógicas. La sección de salida trabaja de forma inversa a las entradas. Decodifica las señales procedentes del CPU, estas son amplificadas y manda con ellas los dispositivos de salida o actuadores existentes en el proceso. (Bolton, 2006)

Figura 2: Generalización de un sistema automatizado

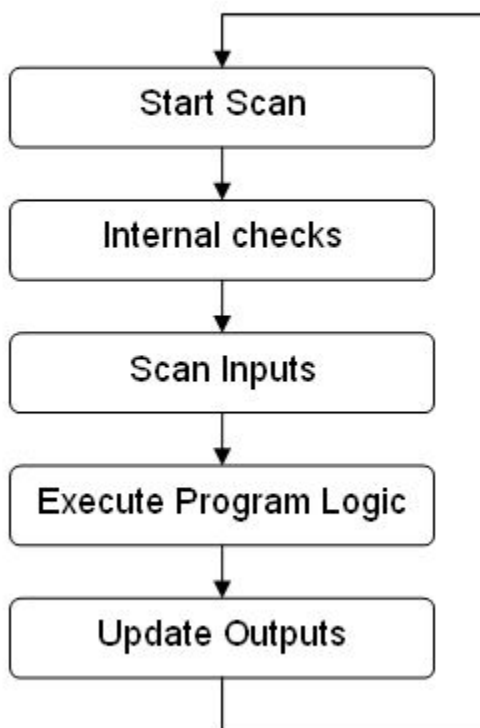


(González, 2015)

Los PLC leen señales de diferentes sensores y dispositivos de entrada. Estos dispositivos de entrada pueden variar desde teclados, switches hasta sensores. Dichas entradas pueden ser digitales o analógicas. Las salidas, que pueden ser motores o válvulas solenoide completan el sistema automatizado. (González, 2015)

Figura 3: Ciclo de operación de un PLC

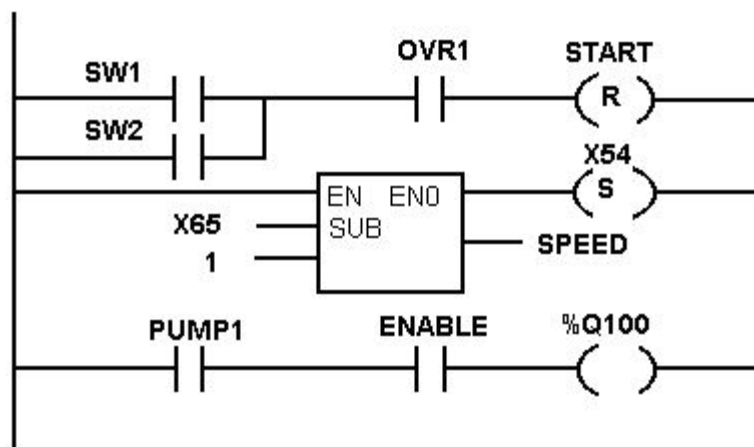
### CPU Operating Cycle



(González, 2015)

Al iniciar el PLC, este comienza el análisis de escaneo interno. Procede por el escaneo de entradas en el sistema, para así ejecutar el programa lógico. Con la ejecución del programa, las salidas conectadas al PLC son actualizadas. El programa lógico es regularmente realizado en una computadora en lenguaje Ladder. El programa es transferido desde la computadora al PLC por diversos protocolos de comunicación como el método RS-232. (Bolton, 2006)

Figura 4: Porción de un programa Ladder para PLC



(González, 2015)

### C. Variador de frecuencia

El accionamiento de motores en la industria es de las aplicaciones más utilizadas en la industria. Desde hace dos décadas, el desarrollo de la electrónica de potencia y los procesadores ha permitido variar la velocidad de los motores de tres fases de manera rápida, robusta y fiable, mediante los reguladores electrónicos de velocidad. Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia. La variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas. Primeramente, se tiene una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua y la otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables. (UTN, 2012)

El modo de trabajo puede ser manual o automático, esto dependiendo de las necesidades del proceso. La mayoría de variadores tienen como prestación la programación sencilla y avanzada para el funcionamiento del motor conectado. Ya que estos componentes son enfocados a la industria, los variadores de frecuencia pueden ser programados por PLC mediante comunicación Modbus. (UTN, 2012)

Otros beneficios que aporta la presencia de un variador de frecuencia en el campo industrial son las siguientes:

- Mejora el proceso de control y por lo tanto la calidad del producto.
- Se puede programar un arranque suave, parada y freno.
- Bucles de velocidad.
- Amplio rango de velocidad y potencia.

Figura 5: Variador de frecuencia Powerflex 4



## V. ANTECEDENTES

El proyecto de automatización de la planta de biodiésel se llevó a cabo en el año 2010. Con el aumento de la capacidad de producción, la automatización previa terminó la compatibilidad con la ampliación de dicha planta.

Previo a la ampliación, la automatización permitió producir una porción del proceso. El proceso de biodiésel estaba solamente contemplado para realizarlo en un reactor, el cual posee la capacidad de 60 litros. Posteriormente a la ampliación de la planta, el proceso regresó a realizarse de manera manual.

La automatización empleada en el proceso consistió en controlar las bombas para transportar el aceite y el producto final, acompañado de válvulas solenoide y sensores de pH para la extracción de glicerina. El proceso no pudo ser del todo automatizado, ya que se requirió la introducción de la materia prima de forma manual.

La disposición de tanques y almacenaje resultó peligrosa, ya que era peligroso y dificultoso introducir la materia prima al proceso en los respectivos tanques.

Figura 6: Diagrama de primera fase de automatización de planta de biodiésel

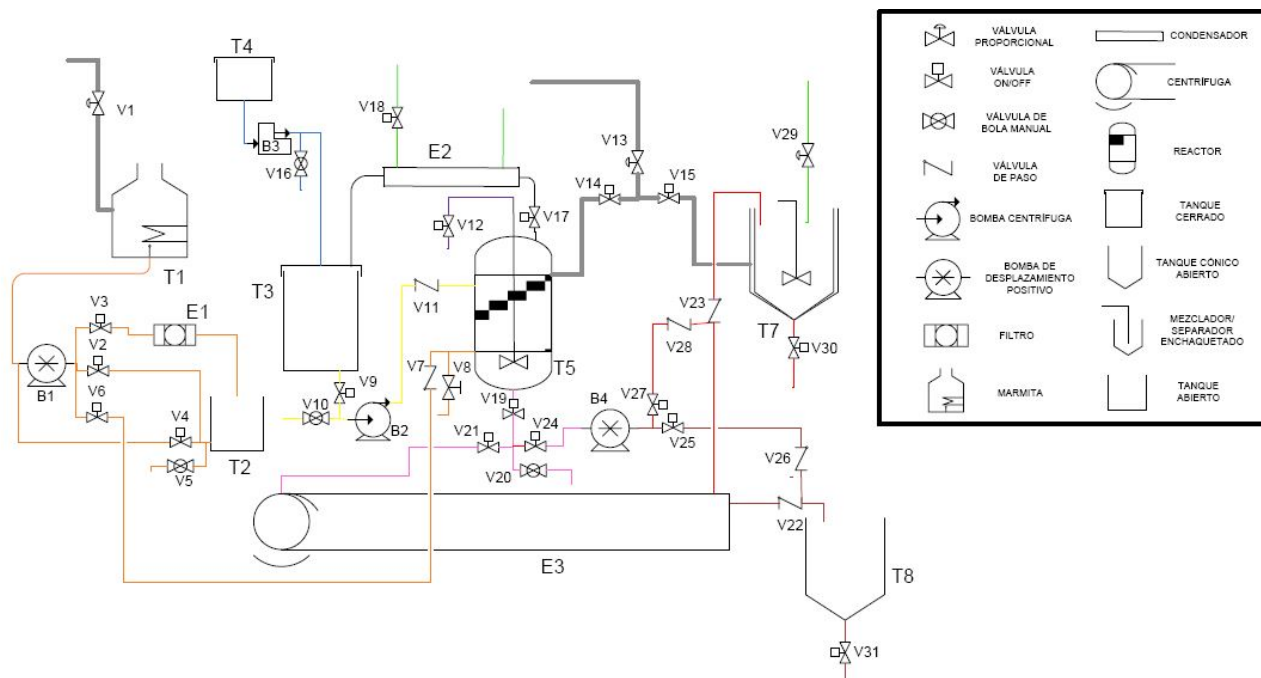


Figura 7: Panel de control para la planta de biodiésel

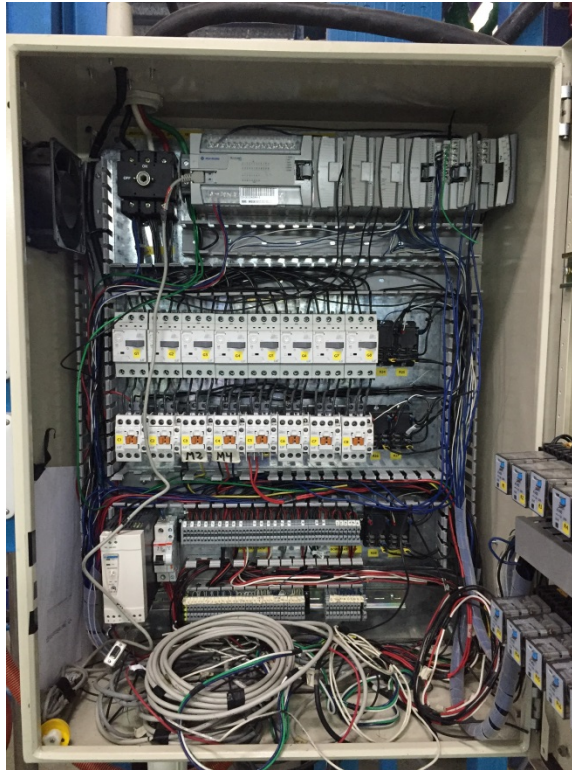


Figura 8: Botones para el funcionamiento de motores en forma manual



## VI. METODOLOGÍA

### A. Familiarización del proceso

1. Hacer conocimiento del proceso actual utilizado en la planta de biodiésel
2. Análisis y diseño para la automatización de dicha planta.

Se busca en esta etapa investigar bibliográficamente acerca del proceso del biodiésel. Además de dicha investigación, se recibió la capacitación de cómo producir biodiésel manualmente en la planta de la universidad. También se analizó el material brindado, el cual fue utilizado para la previa automatización, y que sería de utilidad para este proyecto.

Al entender el proceso químico involucrado en la planta, se busca analizar y empezar el diseño requerido para la automatización que necesita dicho proceso.

### B. Rediseño de planta

1. Modificación en la línea de proceso.
2. Ampliación de reactor R-1
3. Ampliación de tanque de lavado R-3
4. Adición de tanque de recepción R-0
5. Implementación de ampliación de planta

En esta etapa, se realizó el análisis y se participó en la ampliación en la planta la cual fue de 315% teniendo ahora la capacidad de 150 kg de biodiésel por lote. Al modificar el tamaño de tanques y reactores, se instaló la tubería necesaria para dicha automatización.

Con la ampliación de dichos reactores y tanques, se diseñó el proceso nuevamente. Se participó en el nuevo diseño del proceso y se contribuyó a la instalación de nueva tubería en la planta.

### C. Automatización de la planta

1. Listado de entradas y salidas en el sistema
2. Listado de componentes y material existente a utilizar
3. Instalación de válvulas necesarias para el proceso ampliado

4. Instalación de instrumentación necesaria para el proceso ampliado
5. Programación de planta a biodiésel
6. Calibración de sensores

Previo al diseño de automatización del sistema, se realizó un análisis y levantado de entradas y salidas que necesitaría el sistema. Esto incluye desde señalización y botones hasta motores y actuadores en el sistema.

Al saber que la planta estaba automatizada previo a la ampliación, la mayoría del equipo se volvió a utilizar. Dicho equipo consiste en el PLC, las válvulas electrónicas utilizadas, así como la instrumentación que se encontró una vez instalada.

Dado que se trató de una ampliación en el proceso, y se instalaron nuevas líneas este mismo, se instaló una cantidad de válvulas solenoide las cuales no estaban en la previa automatización. Con las válvulas solenoide, se instaló también bypasses en el sistema para poder optar siempre en una producción manual con fines académicos.

Se dio un reacondicionamiento de instrumentación a diferencia de la automatización que una vez existió. Dado que se cambió el orden del proceso y se añadió tanques y reactores más grandes, se movieron sensores de conductividad, sensores de temperatura del sistema.

Una vez instalados los sensores, se procedió por calibrarlos. Se procedió por realizar lecturas de dichos sensores con otros instrumentos de medición para tomarse como referencia. El proceso se realizó cinco veces para cada sensor para obtener datos fieles.

#### D. Diseño de interfaz gráfica y diagramas eléctricos unifilares

1. Diseño de interfaz gráfica para el usuario
2. Sincronización de programa con interfaz gráfica
3. Diseño de planos eléctricos unifilares

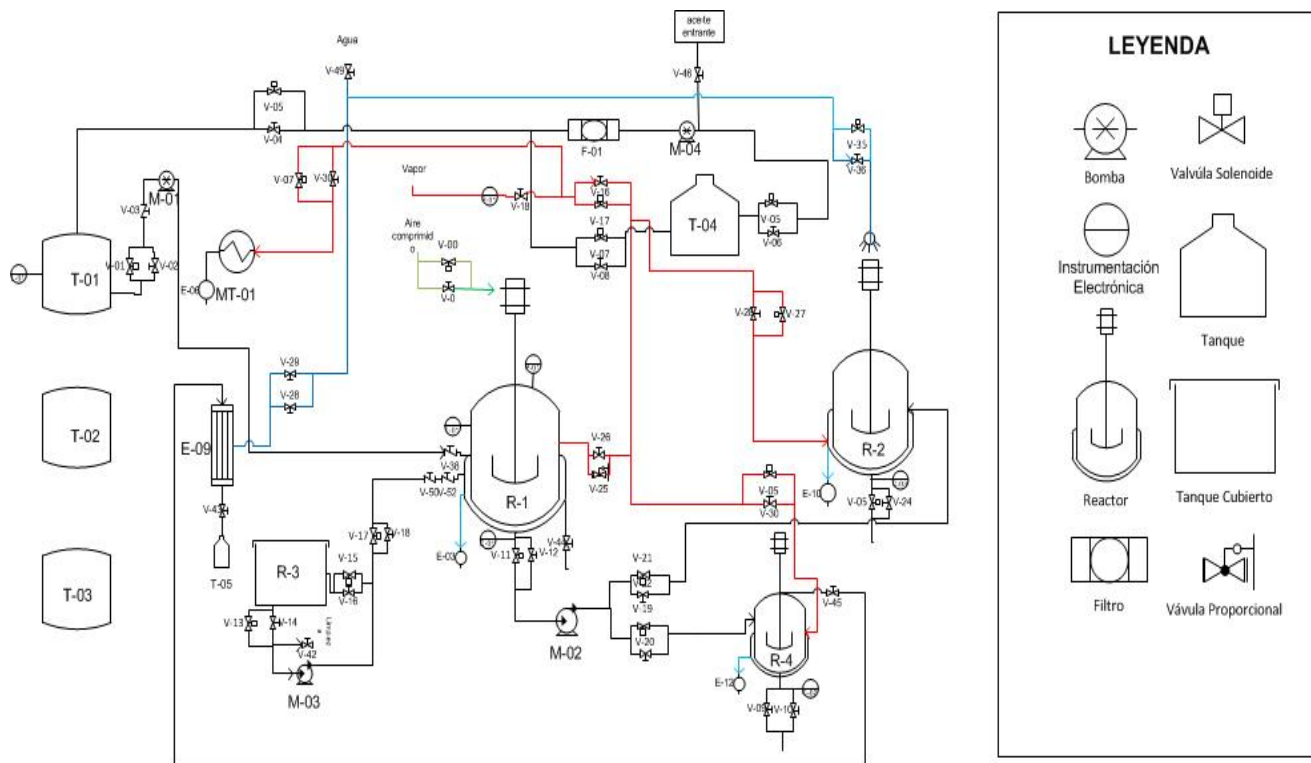
A partir del diseño que se quiere implementar junto a la instalación de todos los componentes a utilizar, se crea el programa que rige el funcionamiento del equipo. A partir del programa realizado, se diseña una interfaz gráfica para que el usuario que utilice la planta pueda entender qué está haciendo, qué parte del proceso va y poder tener control sobre parámetros.

Dado que el programa se escribió en Ladder, por motivos de fácil entendimiento del proceso se debió relacionar el programa realizado con la interfaz gráfica diseñada. El programa tiene banderas habilitadas para poder estar ligadas a la interfaz gráfica. Se busca que el usuario entienda el proceso por medio de las seis etapas previamente expuestas en el marco teórico. Se utilizó el software de la misma familia del PLC, Factory Talk View Studio, el cual permitió la sincronización entre el programa realizado en RsLogix 500 y el mencionado anteriormente.

En caso de ampliación de proceso o modificación de este en un futuro, se realizaron planos eléctricos unifilares para entender el orden en el cableado del panel de control de la planta.

## VII. RESULTADOS

Figura 9: Diagrama de planta rediseñada



Como se muestra en la figura anterior, la planta fue rediseñada. Este diseño añade un reactor con capacidad aumentada para 150 kg de producción de biodiésel. Además, se agregó un tanque para el lavado de biodiésel, así como un reactor con capacidad de 60 litros para el almacenamiento de glicerina.

Cuadro 1: Listado de válvulas electrónicas utilizadas en el sistema

| <b>COMPONENTE</b> | <b>DESCRIPCION</b>                                     | <b>DIAMETRO (Plg.)</b> | <b>ENTRADA/SALIDA</b> | <b>TIPO</b>         | <b>VOLTAJE (V)</b> |
|-------------------|--|------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| <b>V-00</b>       | Válvula de apertura de aire comprimido                 | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 110 AC             |
| <b>V-01</b>       | Válvula Solenoide de cubitanque                        | 1                      | Salida                | Normalmente Abierta | 110 AC             |
| <b>V-03</b>       | Válvula de tanque de llenado a cubitanque              | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-05</b>       | Válvula de tanque de llenado                           | 3/4                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-07</b>       | Válvula de retroalimentación de tanque de llenado      | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-09</b>       | Válvula de liberación de tanque de lavado R-04         | 1                      | Salida                | Normalmente Cerrada | 110 AC             |
| <b>V-11</b>       | Válvula de liberación de reactor R-01                  | 1                      | Salida                | Normalmente Cerrada | 110 AC             |
| <b>V-13</b>       | Válvula de liberación de tanque de metóxido R-3        | 1                      | Salida                | Normalmente Abierta | 110 AC             |
| <b>V-15</b>       | Válvula de retroalimentación de tanque de metóxido R-3 | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-17</b>       | Válvula de añadidura a reactor R-01                    | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-19</b>       | Válvula a tanque de lavado R-04                        | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |

Continuación Cuadro 1

| <b>COMPONENTE</b> | <b>DESCRIPCION</b>   | <b>DIAMETRO (Plg.)</b> | <b>ENTRADA/SALIDA</b> | <b>TIPO</b>         | <b>VOLTAJE (V)</b> |
|-------------------|--|------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| <b>V-21</b>       | Válvula de glicerina a reactor R-03                        | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-23</b>       | Válvula de liberación de tanque R-03                       | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-25</b>       | Válvula proporcional reguladora de vapor para reactor R-01 | 1/2                    | Entrada               | Normalmente Cerrada | 24 DC              |
| <b>V-27</b>       | Válvula de vapor para tanque R-03                          | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-29</b>       | Válvula de vapor para tanque R-04                          | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-31</b>       | Válvula de vapor para marmita E-01                         | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-33</b>       | Válvula de agua para trampa de metanol                     | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |
| <b>V-35</b>       | Válvula de agua para tanque R-03                           | 1/2                    | Salida                | Normalmente Cerrada | 220 AC             |

La mayor parte de las válvulas son de tipo solenoide, las cuales solamente tienen dos estados, ya sea abierto o cerrado. Solamente válvula 25 tiene la capacidad de poder cerrar parcialmente, esta también es la única que es una entrada en el sistema. La válvula anteriormente mencionada tiene la particularidad de no ser solenoide, sino es neumática.

Cuadro 2: Listado de sensores utilizados en el sistema

| <b>Componente</b> | <b>Descripción</b>                                       | <b>Voltaje (V)</b> | <b>Comunicación</b> |
|-------------------|--|--------------------|---------------------|
| <b>C-01</b>       | Sensor de conductividad localizado en reactor R-01       | 24 DC              | 4-20 mA             |
| <b>C-02</b>       | Sensor de conductividad localizado en tanque R-03        | 24 DC              | 4-20 mA             |
| <b>P-01</b>       | Sensor de presión localizado en línea principal de vapor | 24 DC              | 4-20 mA             |
| <b>P-02</b>       | Sensor de presión localizado en reactor R-01             | 24 DC              | 4-20 mA             |
| <b>T-01</b>       | Sensor RTD localizado en reactor R-01                    | 24 DC              | 4-20 mA             |
| <b>L-01</b>       | Sensor de nivel localizado en cubitanque C-01            | 24 DC              | 4-20 mA             |

Los sensores utilizados permitieron la lectura correcta de las variables manipulables en el proceso. Se utilizaron dos módulos de entradas analógicas para poder leer estos mismos. Estos se comunicaron por medio de 4-20 mA.

Cuadro 3: Listado de salidas en el sistema

| <b>E/S</b> | <b>APARATO</b>    | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|------------|-------------------|-------------------|--|----------------------|
| Salida     | Válvula solenoide | VAL00             | Válvula que abre aire comprimido para agitador en reactor R-01       | O:4/0                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL01             | Válvula que permite el paso o bloqueo del aceite del cubitanque C-01 | O:4/1                |

Continuación Cuadro 3

| <b>E/S</b> | <b>APARATO</b>    | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|------------|-------------------|-------------------|--|----------------------|
| Salida     | Válvula solenoide | VAL03             | Válvula que permite el paso o bloqueo del tanque de llenado al cubitanque                | O:4/2                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL05             | Válvula que permite el paso o bloqueo en el tanque de llenado de aceite T-04             | O:4/3                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL07             | Válvula que permite el paso o bloqueo de retroalimentación en el tanque T-04             | O:4/4                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL09             | Válvula de salida que permite el paso o bloqueo en el reactor pequeño R-04               | O:4/5                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL11             | Válvula de salida que permite el paso o bloqueo en el reactor R-01                       | O:4/6                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL13             | Válvula de salida que permite el paso o bloqueo en el tanque de metóxido R-03            | O:4/7                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL15             | Válvula que permite el paso o bloqueo de retroalimentación en el tanque de metóxido R-03 | O:4/8                |
| Salida     | Válvula solenoide | VAL17             | Válvula que permite el paso o bloqueo desde el tanque de metóxido R-03 al reactor R-01   | O:4/9                |

Continuación Cuadro 3

| <b>E/S</b> | <b>APARATO</b>       | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|------------|----------------------|-------------------|--|----------------------|
| Salida     | Válvula solenoide    | VAL19             | Válvula que permite el paso o bloqueo desde el reactor R-01 al tanque de lavado R-04 | O:4/10               |
| Salida     | Válvula solenoide    | VAL21             | Válvula que permite el paso o bloqueo desde el reactor R-01 al reactor pequeño R-02  | O:4/11               |
| Salida     | Válvula solenoide    | VAL23             | Válvula de salida que permite el paso o bloqueo en el tanque de lavado R-02          | O:4/12               |
| Entrada    | Válvula proporcional | VAL25             | Válvula proporcional que permite la regulación de vapor en el reactor R-01           | I:1.0                |
| Salida     | Válvula solenoide    | VAL27             | Válvula que permite el paso o bloqueo de vapor en el tanque de lavado R-02           | O:4/14               |
| Salida     | Válvula solenoide    | VAL29             | Válvula que permite el paso o bloqueo de vapor en el reactor pequeño R-04            | O:4/15               |
| Salida     | Válvula solenoide    | VAL31             | Válvula que permite el paso o bloqueo de vapor en la marmita MT-01                   | O:4/16               |

Continuación Cuadro 3

| <b>E/S</b> | <b>APARATO</b>    | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>   | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|------------|-------------------|-------------------|--|----------------------|
| Salida     | Válvula solenoide | VAL33             | Válvula que permite el paso o bloqueo de agua para el tanque de lavado R-02  | O:4/18               |
| Salida     | Motor             | MOTOR 1           | Motor que permite el paso de aceite del cubitanque a reactor   | O:0/0                |
| Salida     | Motor             | MOTOR 2           | Motor que permite el paso de biodiésel y glicerina desde reactor R-01 a reactor pequeño R-04 y tanque de lavado R-02 | O:0/1                |
| Salida     | Motor             | MOTOR 3           | Motor que permite el paso de metóxido en R-03  | O:0/2                |
| Salida     | Motor             | MOTOR 4           | Motor que permite el paso de aceite desde el tanque T-04 al cubitanque   | O:0/3                |
| Salida     | Motor             | MOTOR 5           | Motor para agitar en el tanque de lavado R-02  | O:0/4                |
| Salida     | Variador          | VEL 1             | Salida digital para habilitar toda la velocidad del variador   | O:0/5                |
| Salida     | Variador          | VEL 2             | Salida digital para habilitar la velocidad parcial del variador  | O:0/6                |

Como lo indica el Cuadro anterior, la mayor parte de salidas en el sistema son válvulas solenoide, por lo que están conectadas como salidas digitales en el sistema.

Cuadro 4: Listado de entradas del sistema

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                          | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|---|----------------------|
| V1            | Entrada    | Botón          | VERDE 1           | Botón que permite la marcha del motor 1     | I:0/2                |
| V2            | Entrada    | Botón          | VERDE 2           | Botón que permite la marcha del motor 2     | I:0/4                |
| V3            | Entrada    | Botón          | VERDE 3           | Botón que permite la marcha del motor 3     | I:0/6                |
| V4            | Entrada    | Botón          | VERDE 4           | Botón que permite la marcha del motor 4     | I:0/8                |
| V5            | Entrada    | Botón          | VERDE 5           | Botón que permite la marcha del motor 5     | I:0/10               |
| R1            | Entrada    | Botón          | ROJO 1            | Botón que permite el paro del motor 1       | I:0/3                |
| R2            | Entrada    | Botón          | ROJO 2            | Botón que permite el paro del motor 2       | I:0/5                |
| R3            | Entrada    | Botón          | ROJO 3            | Botón que permite el paro del motor 3       | I:0/7                |
| R4            | Entrada    | Botón          | ROJO 4            | Botón que permite el paro del motor 4       | I:0/9                |
| R5            | Entrada    | Botón          | ROJO 5            | Botón que permite el paro del motor 5       | I:0/11               |
| MANUAL        | Entrada    | Selector       | MANUAL            | Selector que permite el paso de modo manual | I:0/0                |

Continuación Cuadro 4

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                                 | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|--|----------------------|
| AUTO          | Entrada    | Selector       | AUTO              | Selector que permite el paso de modo automático    | I:0/1                |
| PARO          | Entrada    | Botón          | STOP              | Botón que interrumpe el funcionamiento del sistema | I:0/12               |

El Cuadro 4 expone las entradas utilizadas en el sistema. Estas son en su mayoría botones que se encuentran en la nueva botonera que se instaló. Estos botones son utilizados para activar de forma manual los motores que se encuentran en el sistema. Además, se añadió un selector, el cual permite el cambio de modo manual a modo automático.

Cuadro 5: Escalamiento utilizado para los sensores

| <b>APARATO</b>            | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>  | <b>DIRECCIÓN PLC</b> | <b>ESCALAMIENTO</b> |
|---------------------------|-------------------|---|----------------------|---------------------|
| Sensor de temperatura RTD | T01               | Sensor RTD que se encuentra en reactor R-01                               | I:2.0                | 0 a 100°            |
| Sensor de conductividad   | C02               | Sensor de conductividad que se encuentra debajo del reactor R-01          | I:2.3                | 0 a 300 MicroS/Cm   |
| Sensor de conductividad   | C01               | Sensor de conductividad que se encuentra debajo del tanque de lavado R-02 | I:2.2                | 0 a 500 MicroS/Cm   |
| Sensor de presión         | P01               | Sensor de presión que se encuentra la tubería de vapor                    | I:3.0                | 0 a 30 PSI          |

Continuación Cuadro 5

| APARATO           | SIMBOLOGÍA | DESCRIPCIÓN  | DIRECCIÓN PLC | ESCALAMIENTO  |
|-------------------|------------|--|---------------|---------------|
| Sensor de presión | P02        | Sensor de presión que se encuentra en el reactor R-01  | I:3.3         | 0 a 30 PSI    |
| Sensor de nivel   | L01        | Sensor de nivel que se encuentra en el cubitanque C-01 | I:3.2         | 0 a 3 Batches |

Para poder entender lo que los sensores leen, estos se calibraron. Se tomaron valores con una medición de referencia, para poder obtener y comparar las mediciones realizadas por el sensor. Al obtener los datos, se realizó un escalamiento para delimitar los rangos de medición de cada sensor.

Cuadro 6: Memoria y banderas utilizadas para el sistema

| NOMBRE | E/S     | APARATO | SIMBOLOGÍA | DESCRIPCIÓN                                | DIRECCIÓN PLC |
|--------|---------|---------|------------|--|---------------|
| B-00   | Memoria | Válvula | B00M       | Bandera para accionamiento de válvula V-00 | B3:0/0        |
| B-01   | Memoria | Válvula | B01M       | Bandera para accionamiento de válvula V-01 | B3:0/1        |
| B-02   | Memoria | Válvula | B03M       | Bandera para accionamiento de válvula V-03 | B3:0/2        |
| B-03   | Memoria | Válvula | B05M       | Bandera para accionamiento de válvula V-05 | B3:0/3        |
| B-04   | Memoria | Válvula | B07M       | Bandera para accionamiento de válvula V-07 | B3:0/4        |

Continuación Cuadro 6

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                          | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|---|----------------------|
| B-05          | Memoria    | Válvula        | B09M              | Bandera para accionamiento de válvula V-09  | B3:0/5               |
| B-06          | Memoria    | Válvula        | B11M              | Bandera para accionamiento de válvula V-011 | B3:0/6               |
| B-07          | Memoria    | Válvula        | B13M              | Bandera para accionamiento de válvula V-013 | B3:0/7               |
| B-08          | Memoria    | Válvula        | B15M              | Bandera para accionamiento de válvula V-015 | B3:0/8               |
| B-09          | Memoria    | Válvula        | B17M              | Bandera para accionamiento de válvula V-017 | B3:0/9               |
| B-10          | Memoria    | Válvula        | B19M              | Bandera para accionamiento de válvula V-019 | B3:0/10              |
| B-11          | Memoria    | Válvula        | B21M              | Bandera para accionamiento de válvula V-021 | B3:0/11              |
| B-12          | Memoria    | Válvula        | B23M              | Bandera para accionamiento de válvula V-023 | B3:0/12              |
| B-13          | Memoria    | Válvula        | B25M              | Bandera para accionamiento de válvula V-025 | B3:0/13              |
| B-14          | Memoria    | Válvula        | B27M              | Bandera para accionamiento de válvula V-027 | B3:0/14              |
| B-15          | Memoria    | Válvula        | B29M              | Bandera para accionamiento de válvula V-029 | B3:0/15              |
| B-16          | Memoria    | Válvula        | B31M              | Bandera para accionamiento de válvula V-031 | B3:1/0               |

Continuación Cuadro 6

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>  | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|---|----------------------|
| B-17          | Memoria    | Válvula        | B33M              | Bandera para accionamiento de válvula V-033   | B3:1/1               |
| B-18          | Memoria    | Válvula        | B35M              | Bandera para accionamiento de válvula V-35  | B3:1/2               |
| B-20          | Memoria    | Etapa          | B20               | Bandera para iniciar el proceso automático  | B3:3/0               |
| B-21          | Memoria    | Etapa          | B21               | Bandera para confirmar el ingreso de hidróxido de sodio y metanol en el tanque R-03 | B3:3/1               |
| BPARO         | Memoria    | Paro           | BSTOP             | Bandera para a utilización del PARO DE EMERGENCIA                                   | B3:3/5               |
| B-PARO A      | Memoria    | Paro           | BSTOPA            | Bandera para cumplir con las condiciones de uso                                     | B3:4/0               |
| B-PARO M      | Memoria    | Paro           | BSTOPM            | Bandera para cumplir con las condiciones de uso                                     | B3:4/1               |
| B-NIVEL1      | Memoria    | Nivel          | BNIVEL1           | Bandera para cumplir con el nivel del cubitanque C-01                               | B3:4/2               |
| B-NIVEL2      | Memoria    | Nivel          | BNIVEL2           | Bandera para cumplir con el nivel del cubitanque C-02                               | B3:4/3               |
| BE1           | Memoria    | Etapa          | BE1               | Bandera para habilitar etapa 1  | B3:5/0               |

Continuación Cuadro 6

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b>             | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                            | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------------------|-------------------|---|----------------------|
| BE2           | Memoria    | Etapa                      | BE2               | Bandera para habilitar etapa 2                | B3:5/1               |
| BE3           | Memoria    | Etapa                      | BE3               | Bandera para habilitar etapa 3                | B3:5/2               |
| BE4           | Memoria    | Etapa                      | BE4               | Bandera para habilitar etapa 4                | B3:5/3               |
| BE5           | Memoria    | Etapa                      | BE5               | Bandera para habilitar etapa 5                | B3:5/4               |
| BE6           | Memoria    | Etapa                      | BE6               | Bandera para habilitar etapa 6                | B3:5/5               |
| BE7           | Memoria    | Etapa                      | BE7               | Bandera para habilitar etapa 7                | B3:5/6               |
| BEM           | Memoria    | Etapa                      | BEM               | Bandera para habilitar etapa de motores       | B3:7/0               |
| BEV           | Memoria    | Etapa                      | BEV               |   | B3:                  |
| BLAVA         | Memoria    | Etapa                      | BLAVA             | Bandera para habilitar el proceso de lavado   | B3:6/5               |
| B L LAVA      | Memoria    | Etapa                      | B L LAVA          | Bandera para enclavar el proceso de lavado    | B3:6/6               |
| BD            | Memoria    | Decantación                | BD                | Bandera para habilitar la segunda decantación | B3:5/8               |
| BB            | Memoria    | Transferencia de biodiésel | BB                | Bandera para continuar el proceso             | B3:5/9               |
| BM01          | Memoria    | Etapa                      | BM01M             | Bandera para habilitar Motor 1 Manual         | B3:6/0               |
| BM02          | Memoria    | Etapa                      | BM02M             | Bandera para habilitar Motor 2                | B3:6/1               |
| BM03          | Memoria    | Etapa                      | BM03M             | Bandera para habilitar Motor 3                | B3:6/2               |

Continuación Cuadro 6

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                        | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|---|----------------------|
| BM04          | Memoria    | Etapa          | BM04M             | Bandera para habilitar Motor 4            | B3:6/3               |
| BM05          | Memoria    | Etapa          | BM05M             | Bandera para habilitar Motor 5 manual     | B3:6/4               |
| BM01A         | Memoria    | Etapa          | BM01A             | Bandera para habilitar Motor 1 automático | B3:7/1               |
| BM02A         | Memoria    | Etapa          | BM02A             | Bandera para habilitar Motor 2 automático | B3:7/2               |
| BM03A         | Memoria    | Etapa          | BM03A             | Bandera para habilitar Motor 3 automático | B3:7/3               |
| BM04A         | Memoria    | Etapa          | BM04A             | Bandera para habilitar Motor 4 automático | B3:7/4               |
| BM05A         | Memoria    | Etapa          | BM05A             | Bandera para habilitar Motor 5 automático | B3:7/5               |
| B00M          | Memoria    | Etapa          | V00M              | Bandera para habilitar manual válvula 00  | B3:8/0               |
| B01M          | Memoria    | Etapa          | V01M              | Bandera para habilitar manual válvula 01  | B3:8/1               |
| B03M          | Memoria    | Etapa          | V03M              | Bandera para habilitar manual válvula 03  | B3:8/2               |
| B05M          | Memoria    | Etapa          | V05M              | Bandera para habilitar manual válvula 05  | B3:8/3               |
| B07M          | Memoria    | Etapa          | V07M              | Bandera para habilitar manual válvula 07  | B3:8/4               |
| B09M          | Memoria    | Etapa          | V09M              | Bandera para habilitar manual válvula 09  | B3:8/5               |
| B11M          | Memoria    | Etapa          | V11M              | Bandera para habilitar manual válvula 11  | B3:8/6               |

Continuación Cuadro 6

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                           | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|--|----------------------|
| B13M          | Memoria    | Etapa          | V13M              | Bandera para habilitar manual válvula 13     | B3:8/7               |
| B15M          | Memoria    | Etapa          | V15M              | Bandera para habilitar manual válvula 15     | B3:8/8               |
| B17M          | Memoria    | Etapa          | V17M              | Bandera para habilitar manual válvula 17     | B3:8/9               |
| B19M          | Memoria    | Etapa          | V19M              | Bandera para habilitar manual válvula 19     | B3:8/10              |
| B21M          | Memoria    | Etapa          | V21M              | Bandera para habilitar manual válvula 21     | B3:8/11              |
| B23M          | Memoria    | Etapa          | V23M              | Bandera para habilitar manual válvula 23     | B3:8/12              |
| B25M          | Memoria    | Etapa          | V25M              | Bandera para habilitar manual válvula 25     | B3:8/13              |
| B27M          | Memoria    | Etapa          | V27M              | Bandera para habilitar manual válvula 27     | B3:8/14              |
| B29M          | Memoria    | Etapa          | V29M              | Bandera para habilitar manual válvula 29     | B3:8/15              |
| B31M          | Memoria    | Etapa          | V31M              | Bandera para habilitar manual válvula 31     | B3:9/0               |
| B33M          | Memoria    | Etapa          | V33M              | Bandera para habilitar manual válvula 33     | B3:9/1               |
| B35M          | Memoria    | Etapa          | V35M              | Bandera para habilitar manual válvula 35     | B3:9/2               |
| B00A          | Memoria    | Etapa          | V00A              | Bandera para habilitar automático válvula 00 | B3:9/3               |
| B01A          | Memoria    | Etapa          | V01A              | Bandera para habilitar automático válvula 01 | B3:9/4               |

Continuación Cuadro 6

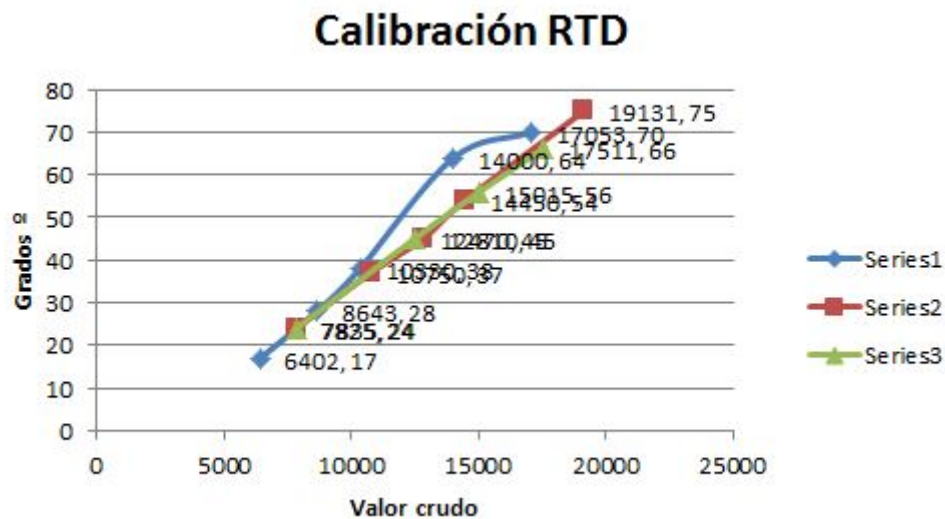
| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                           | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|--|----------------------|
| B03A          | Memoria    | Etapa          | V03A              | Bandera para habilitar automático válvula 03 | B3:9/5               |
| B05A          | Memoria    | Etapa          | V05A              | Bandera para habilitar automático válvula 05 | B3:9/6               |
| B07A          | Memoria    | Etapa          | V07A              | Bandera para habilitar automático válvula 07 | B3:9/7               |
| B09A          | Memoria    | Etapa          | V09A              | Bandera para habilitar automático válvula 09 | B3:9/8               |
| B11A          | Memoria    | Etapa          | V11A              | Bandera para habilitar automático válvula 11 | B3:9/9               |
| B13A          | Memoria    | Etapa          | V13A              | Bandera para habilitar automático válvula 13 | B3:9/10              |
| B15A          | Memoria    | Etapa          | V15A              | Bandera para habilitar automático válvula 15 | B3:9/11              |
| B17A          | Memoria    | Etapa          | V17A              | Bandera para habilitar automático válvula 17 | B3:9/12              |
| B19A          | Memoria    | Etapa          | V19A              | Bandera para habilitar automático válvula 19 | B3:9/13              |
| B21A          | Memoria    | Etapa          | V21A              | Bandera para habilitar automático válvula 21 | B3:9/14              |
| B23A          | Memoria    | Etapa          | V23A              | Bandera para habilitar automático válvula 23 | B3:9/15              |

Continuación Cuadro 6

| <b>NOMBRE</b> | <b>E/S</b> | <b>APARATO</b> | <b>SIMBOLOGÍA</b> | <b>DESCRIPCIÓN</b>                           | <b>DIRECCIÓN PLC</b> |
|---------------|------------|----------------|-------------------|--|----------------------|
| B25A          | Memoria    | Etapa          | V25A              | Bandera para habilitar automático válvula 25 | B3:10/0              |
| B27A          | Memoria    | Etapa          | V27A              | Bandera para habilitar automático válvula 27 | B3:10/1              |
| B29A          | Memoria    | Etapa          | V29A              | Bandera para habilitar automático válvula 29 | B3:10/2              |
| B31A          | Memoria    | Etapa          | V31A              | Bandera para habilitar automático válvula 31 | B3:10/3              |
| B33A          | Memoria    | Etapa          | V33A              | Bandera para habilitar automático válvula 33 | B3:10/4              |
| B35A          | Memoria    | Etapa          | V35A              | Bandera para habilitar automático válvula 35 | B3:10/5              |

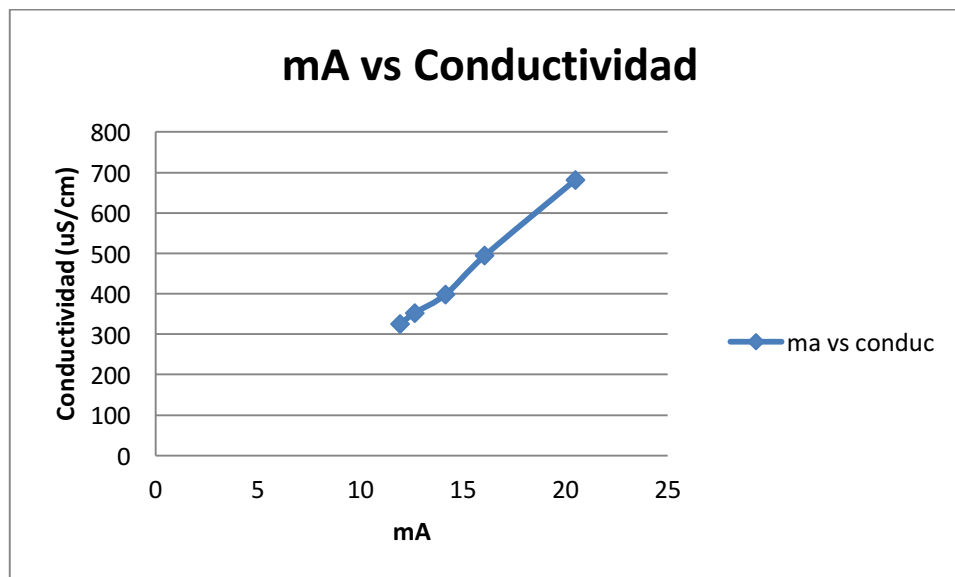
Las banderas y bits que se muestran listados en el cuadro anterior fueron utilizados en todo el programa. Estas banderas ayudaron a poder habilitar actuadores de modo automático o manual, así como también contadores y etapas del proceso.

Figura 10: Calibración de sensor RTD



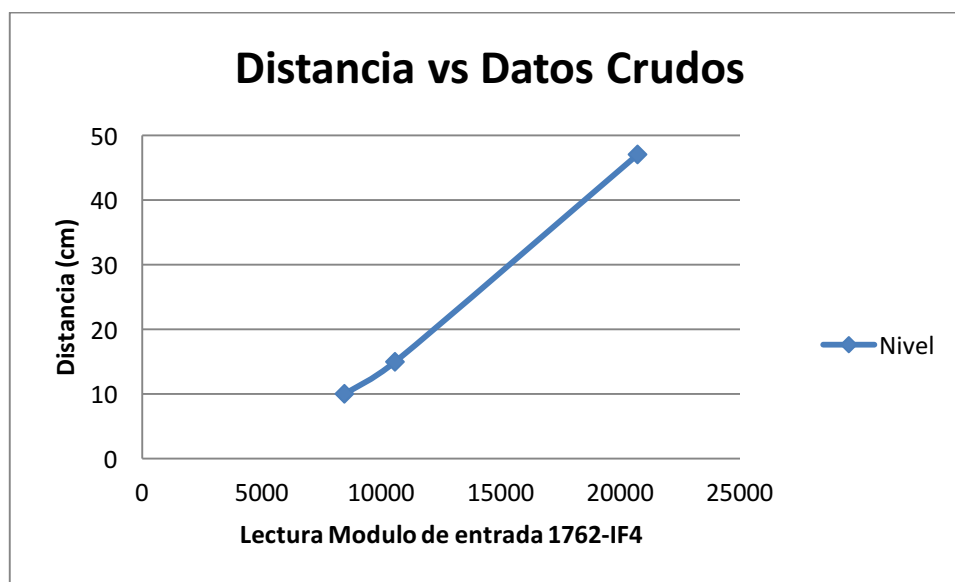
Para la calibración del sensor RTD, se realizaron diversas mediciones de aceite con un termómetro de mercurio, a diferentes temperaturas. Se obtuvo la ecuación por medio de la gráfica obtenida en Excel, para analizar el comportamiento del sensor.

Figura 11: Calibración de sensor de conductividad



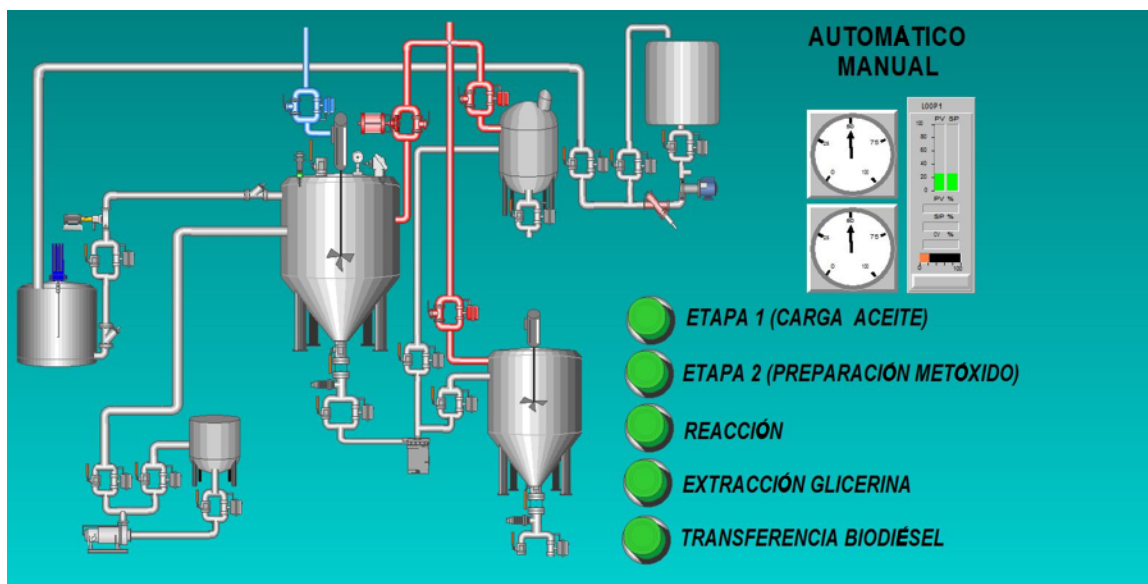
Para el proceso de calibración, se realizó de la misma manera que el sensor RTD. Dado que hay dos sensores de conductividad en el proceso, se realizó la calibración de ambos. Dado que los dos sensores son idénticos, estos presentaron el mismo comportamiento en la calibración. La Figura 11 muestra el comportamiento de calibración de los dos sensores.

Figura 12: Calibración de sensor de nivel



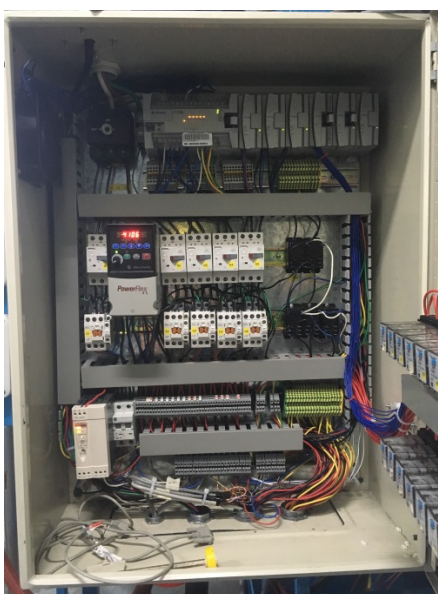
Como los sensores mencionados anteriormente, la calibración de este se realizó también con un medidor de referencia. Dado que el aceite que se encuentra en el cubitanque se mide con distancia, se realizó la medición con una cinta métrica, y luego se corroboró con la lectura que brindó el sensor.

Figura 13: Interfaz gráfica del programa



La interfaz de usuario se diseñó para que una persona que no sea familiarizada con el proceso pueda utilizar la planta con facilidad. Es por eso que solamente se añadió una serie de botones para poder accionar cada etapa del proceso. Se utilizó Factory Talk View Studio, el cual se integra con RsLogix y el programa escrito en Ladder.

Figura 14: Panel de control de planta de biodiésel



Para el diseño del panel, se debió por dejar instalado el PLC Micrologix 1200 en el lugar que estaba cuando estaba previamente automatizado. Por otro lado, se rediseñó la puesta de energía, así como la instalación del variador de frecuencia, módulos utilizados, y el cableado para los botones.

Figura 15: Panel de botones para modo manual



Ya que se diseñó la automatización en torno al PLC, se instaló un nuevo panel para el control manual de los motores que se encuentran en el proceso. Todos los motores accionados de forma manual pasan por el PLC, contrario al sistema de arranque de motores anterior.

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo de graduación fue la automatización de la planta de producción de biodiésel que obtuvo un aumento de capacidad de producción.

Previamente a la automatización, fue necesario familiarizarse con dicho proceso para producir biodiésel, desde los reactivos a utilizar, así como el instante que se añaden en dicho proceso. Además de la familiarización a nivel químico, también se analizó todo el equipo que reside en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y la planta de biodiésel, ya que esta planta se encontraba automatizada.

Para poder realizar la automatización de manera ordenada, se decidió por separar el proceso en seis etapas diferentes, las cuales se dividen en diversas partes del proceso. La primera etapa del proceso involucra el accionamiento de la válvula denominada VAL01 y el MOTOR 1, para poder transportar la cantidad adecuada de aceite al reactor R-01.

Dado que se realizó un aumento de capacidad de producción de 300%, se realizó un nuevo análisis de producción para la automatización. Dicha ampliación provocó el aumento de 150 kg de biodiésel por cada producción. Esto implicó realizar nuevos análisis de tiempos en funcionamiento de bombas y escalamiento en el cubitanque dispensador de aceite. Se usó el sensor de nivel para poder determinar si es posible o no realizar una producción anteriormente mencionada de 150 kg como valor estandarizado. Por otro lado, se determinó que 150 kg de aceite tarda 153 segundos en ser transportado al reactor, esto solicitado por el cliente.

Cabe mencionar que ya que se encuentra un sensor de nivel en el cubitanque, este está programado como una protección, es decir que no permitirá ingresar el aceite desde el tanque de filtrado cuando el cubitanque se encuentre lleno, así como no dejará realizar el proceso si no hay aceite en dicho cubitanque. Fue necesario realizar la calibración del sensor de nivel para poder determinar los límites de cantidad de aceite.

Para la mejor transferencia del fluido hacia el reactor, se utilizó la bomba de desplazamiento positivo que se encontraba ya en el equipo de la planta. La ventaja que presenta esta bomba es que genera la presión necesaria para poder transportar el fluido hacia el reactor.

Incluyendo la recolección de equipo y análisis del proceso, también se contribuyó al nuevo diseño de la planta, el cual estaría ligado directamente con el diseño de automatización para la producción de biodiésel. Una vez diseñado, se procedió por realizar la instalación de tubería necesaria para el diseño esperado del sistema. Al tener el proceso definido físicamente, se instaló la instrumentación faltante para el diseño actual para la planta, el cual incluye válvulas solenoide, motores e instrumentación.

La segunda etapa continúa el proceso esencial de biodiésel, el cual está caracterizado por la mezcla de un agente neutralizante e hidróxido de sodio. En este caso, se utiliza Metanol como neutralizante para la reacción.

Al tener ya el aceite en el reactor R-01, el usuario puede confirmar la adición de metanol e hidróxido de sodio en el tanque R-03. Esto se diseñó específicamente para que el sistema logre mezclar, crear el metóxido, y en seguida depositarlo en el reactor R-01. Se optó por 300 segundos de mezcla que, al terminar, enseguida es transportado con el motor 3, la cual es una bomba centrífuga. El tiempo medido en pruebas anteriores fue confirmado de 150 segundos.

Para los cambios de accionamientos de válvulas como en el caso anteriormente expuesto, se decidió añadir un contador de dos segundos cuando se encuentra un intercambio de válvulas. Es decir, si se va a utilizar la misma válvula para un propósito distinto, como mezclar un fluido y transportarlo a otro sector de la planta, se utiliza el contador de dos segundos para evitar la mezcla no deseada de fluidos.

Luego de la mezcla de metóxido y la adición de este al reactor R-01, ya procede la tercera etapa, es la principal de todo el proceso de producción de biodiésel: la reacción. Lo que se busca en la reacción de biodiésel, es poder mantener agitado el reactivo por cuatro horas, esto incluyendo una temperatura controlada de 45 a 65 grados Celsius. La agitación se ejecuta con un agitador neumático por motivos de seguridad, ya que al momento de calentar el reactor, vapores de metanol son expuestos dentro este mismo, por lo que se ocasionaría una chispa si se utilizara un agitador eléctrico. Para controlar la agitación, se instaló una válvula solenoide la cual permite o bloquea el paso de aire comprimido.

Además de la agitación en el sistema, también es importante controlar la temperatura en el reactor, por lo que se instaló una válvula proporcional neumática. Esta válvula permite el paso total o parcial de vapor en el sistema para controlar su temperatura. Para poder determinar cuánta apertura requiere la válvula, se diseñó un control PID con la ayuda del bloque de diseño de control PID del software RSLogix 500 del PLC Allen Bradley. Dado que la temperatura está aumentando con la transferencia de calor entregada por el vapor, este aumento no es rápido para necesitar un control de reacción rápida. Ya que la naturaleza de este cambio es lenta, se implementó un control PI, el cual es utilizado para determinar la salida de la válvula proporcional. Se implementó un controlador con constante proporcional a 5.1 y una constante integral de 0.6. Debido a que, como se mencionaba con anterioridad, la respuesta del control se acopla directamente con el aumento de la temperatura en el reactor. Dado que el aumento de esta misma es progresivo, el controlador permite ajustar con tiempo suficiente.

El rango de temperatura que brindó el departamento de química se consideró importante, ya que al tener una reacción arriba del rango deseado, es decir de 45 a 65° C, puede ocasionar la evaporación parcial o total del metanol en el reactor, provocando así una disminución en la calidad de biodiésel y presencia de jabón en el producto.

La cuarta etapa del proceso es luego de la reacción, donde es necesario esperar una hora para obtener la separación entre la glicerina que se crea como producto de la reacción, y el biodiésel obtenido que es el resultado esperado. Para poder determinar la diferencia entre dichos fluidos, se implementó un algoritmo que pudiera diferenciar la decantación obtenida. Se utilizó un sensor de conductividad para que el PLC pudiera entender la diferencia entre dichos fluidos, siempre y cuando se programe para que realice dicha tarea.

La conductividad de un fluido indica simplemente qué tan conductor de electricidad es. Esta característica del fluido permite poder discernir la glicerina del biodiésel. La glicerina varía de 120 a 160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a comparación del biodiésel que posee una conductividad que varía de 5 a 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Como se puede observar, la diferencia de conductividad entre los fluidos es considerable, por lo que facilita la tarea de diferenciación de la misma. Utilizando el conductímetro para las lecturas en los fluidos, se realizó una comparación en los valores de lectura de dicho sensor, para cuando este lea el rango alto, traslade la glicerina al reactor R-04, el cual tiene como propósito el almacenamiento de glicerina. Una vez el programa identifique la medición de conductividad relacionada del biodiésel, se transportará al tanque de lavado.

Para poder utilizar los valores obtenidos por los sensores de conductividad, se realizó una curva de calibración, la cual se muestra en la Figura 9.

La quinta etapa, el transporte de los fluidos es ocasionado por el MOTOR 2 el cual es el único en el proceso que funciona de diferente manera. Dado que se busca encontrar la fase de los dos fluidos, es decir, la separación de estos a causa de sus diferentes densidades, este motor debe funcionar en dos velocidades distintas. La primera velocidad utilizada es para el transporte lento de un variador de frecuencia, el cual, con ayuda de programación, permite el arranque del motor a diferentes velocidades.

Dado que todos los motores que se encuentran en el proceso son trifásicos, se utilizaron dos salidas digitales las cuales preseleccionan las frecuencias deseadas de operación de uno de ellos. Para la extracción de glicerina, se optó por 15 Hz de frecuencia, para que el sensor de conductividad pudiera leer el cambio de fase de mejor manera. Por lo tanto, una vez detectado el biodiésel por el sensor de conductividad, se acciona la salida digital, la cual acciona una entrada digital en el variador de frecuencia para arrancar el motor a 60 Hz. Nuevamente al utilizar las mismas válvulas para la etapa pero con diferente propósito, se insertó un pequeño contador de dos segundos para evitar mezcla no deseada de fluidos para las últimas etapas del proceso.

La última etapa del proceso, involucra el refinado del biodiésel producido en el reactor. El biodiésel que sale de dicho reactor se encuentra en un estado “sucio” por lo que tiene que pasar a una etapa de lavado y secado. La etapa involucra la mano de obra del operador, el cual tiene que introducir agua durante 20 minutos, y esperar la decantación por otros 20 minutos. Nuevamente al esperar la decantación, se vuelve a encontrar una fase de los dos fluidos que se encuentran en el tanque de lavado R-02. Como lo que se diseñó en el reactor, se utilizó la misma idea para poder determinar la diferencia entre el agua añadida y el biodiésel producido. Cabe mencionar que el agua posee mayor conductividad que el biodiésel. Como se mencionó con anterioridad, el biodiésel posee entre 5 y 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , al contrario del agua que rebasa los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La etapa final del proceso es el secado de biodiésel, el cual se realiza por ocho horas. Esta etapa posee la lógica más simple de todo el proceso, ya que se acciona una válvula solenoide que permite el paso de vapor junto con el accionamiento del agitador.

Se puede constatar que el proceso entero para obtener el biodiésel es largo. Normalmente, puede llegar a durar dos a tres días en horario de 8 a 5. Sabiendo esta duración y a la naturaleza

de ciertas fs del proceso, se optó por diseñar el programa para que pueda habilitarse en diversas fases como se muestra en la Figura 11. De esta manera, el proceso es automático, pero el usuario tiene la opción de poder proseguir con el proceso cada vez el programa llegue a un punto específico en la producción.

## IX. CONCLUSIONES

- Se diseñó la automatización de acuerdo con el equipo que anteriormente existió, obteniendo así un gasto mínimo para dicho proyecto.
- Se logró exitosamente la automatización del proceso de biodiésel de acuerdo a lo solicitado por el departamento de ingeniería química de la universidad.
- La reacción de biodiésel tuvo un resultado exitoso, configurando un sistema de control PI para la regulación de temperatura en el reactor R-01.
- La calibración de sensores permitió el control total de estos, teniendo sensores como alerta cuando esta sube.
- Los sensores de conductividad fueron indispensables para que el PLC determinara la diferencia entre biodiésel, agua y glicerina.
- La interfaz gráfica diseñada permite a cualquier usuario entender el proceso y controlar de manera intuitiva las etapas de este mismo.
- Se obtuvo una independencia de la planta por parte del personal operador.
- El sistema implementado permite controlar el proceso de forma manual o automática.

## X. RECOMENDACIONES

- Una implementación a base de maquinaria para la elaboración del metóxido sería adecuada para optimizar el proceso de automatización del proceso.
- El tablero que brinda la energía eléctrica al panel de control no posee tierra física, por lo que el panel se encuentra alimentado por tres fases de 120 V y neutro. El neutro está aterrizado en la acometida que se encuentra fuera de las instalaciones de la universidad. Es por eso que es recomendable implementar un cableado de tierra física para no depender de la línea de neutro.
- El mantenimiento del equipo es indispensable para alargar su tiempo de vida. Dado que el proceso involucra carburantes y aceites, es necesario limpiar las válvulas y sensores periódicamente para su correcto funcionamiento.
- Se podría implementar un sistema para llenado automático de metóxido, para poder tener la mayoría del proceso de forma automática.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

Bolton, W. (2006). *Programmable Logic Controllers*.

Dickson, A. (2011). *Biodiésel: Generalidades y producción a pequeña escala*. Obtenido de Facultad de Ingeniería - Universidad de la república de Uruguay:  
[https://www.fing.edu.uy/catedras/arqtec/extension\\_ibirapita/charla\\_biodiésel\\_2011.pdf](https://www.fing.edu.uy/catedras/arqtec/extension_ibirapita/charla_biodiésel_2011.pdf)

González, C. (2015). *Machine Design*. Obtenido de <http://machinedesign.com/engineering-essentials/engineering-essentials-what-programmable-logic-controller>

Miliarium. (2007). *Miliarium*. Obtenido de  
<http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/Biodiésel.asp>

Ponsa, P. (2007). *Universitat Politècnica DE Catalunya*. Obtenido de  
<http://www.epsevg.upc.edu/hcd/material/lecturas/interfaz.pdf>

Prieto, P. (2007). *Gobierno de España*. Obtenido de  
<http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/gl/component/content/article/502-monografico-lenguajes-de-programacion?start=2>

UTN. (2012). *Universidad Tecnológica Nacional*. Obtenido de <http://www.fra.utn.edu.ar>

## XII. ANEXOS

### A. Sistema de diseño de automatización

| <b>SUBDIVISIÓN DE ETAPAS DE PROCESO</b> |   |
|---|---|
| <b>1</b>                                | Pasa aceite de cubitanque a reactor R-01            |
| <b>2</b>                                | Regulación de temperatura en reactor R-01           |
| <b>3</b>                                | Transferencia de metóxido en R-03 para reactor R-01 |
| <b>4</b>                                | Reacción por 4 horas temperatura regulada           |
| <b>5</b>                                | Reposo para decantación                             |
| <b>6</b>                                | transferencia de glicerina a reactor R-02           |
| <b>7</b>                                | Sacar biodiésel, lavar y secar biodiésel            |

| <b>DESCRIPCIÓN</b>   |
|--|
| <b>ETAPA 1: Motores para bombas de alimentación</b>  |
| La bomba M-01 se energiza con 220 V De desplazamiento positivo   |
| Las bombas pueden ser controladas de dos maneras. La primera manera se puede controlar desde un panel de mando (Marcha/paro) siempre y cuando el selector se encuentre en la posición <b>manual</b> . La otra manera es a partir de la iniciación en modo automático la cual depende de la altura del cubitanque                                     |
| Rigen las siguientes condiciones de habilitación: <ul style="list-style-type: none"> <li>● EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo</li> <li>● El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción</li> <li>● El selector se encuentre en modo automático</li> <li>● La válvula V-01 debe estar abierta (normalmente abierta)</li> </ul> |
| Rigen las siguientes condiciones de desconexión: <ul style="list-style-type: none"> <li>● No hay nivel suficiente para producir 1 batch</li> <li>● Se presiona el PERO DE EMERGENCIA</li> </ul>  |

|  |
|--|
| <b>ETAPA 1: Válvulas de salida</b>   |
| <p>La válvula V-01 permite el paso o el bloqueo del aceite a transportar al reactor R-01. Esta es una válvula solenoide la cual tiene como características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuando el solenoide está activo, la válvula se cierra</li> <li>• Cuando la válvula está inactiva, se encuentra abierta</li> </ul>   |
| Las válvulas son controladas por medio del programa  |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de habilitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo</li> <li>• El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción</li> <li>• El selector se encuentre en modo automático</li> </ul>  |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de desconexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay nivel suficiente para producir 1 batch</li> <li>• Se presiona el PERO DE EMERGENCIA</li> </ul>   |
| <b>ETAPA 2: Motores para bombas de alimentación</b>  |
| La bomba M-03 se energiza con 220 V  |
| <p>Las bombas pueden ser controladas de dos maneras. La primera manera se puede controlar desde un panel de mando (Marcha/paro) siempre y cuando el selector se encuentre en la posición <b>manual</b>. La otra manera es a partir de la iniciación en modo automático la cual depende de la altura del cubitanque</p>   |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de habilitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo</li> <li>• El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción</li> <li>• El selector se encuentre en modo automático</li> <li>• El tiempo de transferencia del aceite al reactor R-01 ha terminado</li> <li>• El usuario ha ingresado que ya ha ingresado la materia prima</li> <li>• La temperatura en R-01 ha llegado a 45°</li> </ul> |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de desconexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay nivel suficiente para producir 1 batch</li> <li>• Se presiona el PERO DE EMERGENCIA</li> </ul>   |
| <b>ETAPA 2: Válvulas de retroalimentación y transporte</b>   |

|  |
|--|
| <p>La válvula V-13 permite el paso o el bloqueo del metóxido. La válvula 15 permite el paso o bloqueo para la retroalimentación al tanque R-03. La válvula 17 permite el paso o bloqueo para transportar el metóxido al reactor R-01</p> <p>La V-13 es una válvula solenoide la cual se acciona con 120 VAC. Las V-15 y V-17 son válvulas solenoide las cuales se accionan con 220 VAC.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuando el solenoide está activo, la válvula se abre</li> <li>• Cuando la válvula está inactiva, se encuentra cerrada</li> </ul> |
| <p>Las válvulas son controladas por medio del programa</p>   |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de habilitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo</li> <li>• El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción</li> <li>• El selector se encuentre en modo automático</li> <li>• El usuario ha confirmado que ha ingresado la materia prima</li> </ul> <p>Para la válvula 17 se agrega la siguiente condición:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se ha completado el tiempo de funcionamiento de la bomba para mezclar la solución</li> </ul>      |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de desconexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay nivel suficiente para producir 1 batch</li> <li>• Se presiona el PERO DE EMERGENCIA</li> </ul>   |
| <p><b>ETAPA 3/4: Válvulas de aire y regulación de vapor</b></p>  |
| <p>La válvula V-00 permite el paso o bloqueo del aire para accionar el agitador neumático.</p> <p>La V-00 posee las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se energiza con 220 VAC</li> <li>• Cuando el solenoide está activo, la válvula se abre</li> <li>• Cuando la válvula está inactiva, se encuentra cerrada</li> </ul> <p>La válvula proporcional V-25 permite la regulación del flujo de vapor que pasa por la tubería.</p> <p>La V-25 se activa con 24VDC.</p>  |
| <p>Las válvulas son controladas por medio del programa</p>   |

|   |
|---|
| <p>Rigen las siguientes condiciones de habilitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo</li> <li>● El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción</li> <li>● El selector se encuentre en modo automático</li> <li>● Ha terminado el tiempo de transferencia de metóxido al reactor R-01</li> <li>● El sensor RTD indica que la temperatura es baja</li> </ul> |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de desconexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● No hay nivel suficiente para producir 1 batch</li> <li>● Se presiona el PERO DE EMERGENCIA</li> <li>● La presión P-01 medida en el reactor sobrepasa el limite</li> </ul>  |
| <p><b>ETAPA 5/6/7: Motores para bombas de alimentación</b></p>  |
| <p>La bomba M-02 se energiza con 220 V. Esta lleva un variador de frecuencia</p>  |
| <p>Las bombas pueden ser controladas de dos maneras. La primera manera se puede controlar desde un panel de mando (Marcha/paro) siempre y cuando el selector se encuentre en la posición <b>manual</b>. La otra manera es a partir de la iniciación en modo automático la cual depende de la altura del cubitanque</p>  |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de habilitación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo</li> <li>● El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción</li> <li>● El selector se encuentre en modo automático</li> <li>● Ha terminado el tiempo de reacción y decantación</li> <li>● Se ha seleccionado la velocidad correspondiente para el variador</li> </ul>   |
| <p>Rigen las siguientes condiciones de desconexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● No hay nivel suficiente para producir 1 batch</li> <li>● Se presiona el PERO DE EMERGENCIA</li> </ul>  |
| <p><b>ETAPA 5/6/7: Válvula de salida</b></p>  |
| <p>La válvula V-11 permite el paso o el bloqueo desde la glicerina y biodiésel producido en el reactor R-01.</p>  |
| <p>V-11 posee las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Se energiza con 120 VAC</li> <li>● Cuando el solenoide está activo, la válvula se cierra</li> <li>● Cuando la válvula está inactiva, se encuentra abierta</li> </ul>   |
| <p>Las válvulas son controladas por medio del programa</p>  |

Rigen las siguientes condiciones de habilitación:

- EL PARO DE EMERGENCIA se encuentre activo
- El nivel del cubitanque tenga por lo menos para una producción
- El selector se encuentre en modo automático
- El usuario ha confirmado que ha abierto la válvula principal del reactor
- El tiempo de reacción ha finalizado

B. Planos eléctricos unifilares

