

# Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



Automatización de planta de producción de biodiésel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Trabajo de Graduación presentado por Byron Daniel Salvador Salguero para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Electrónica.

Guatemala  
2011



Automatización de planta de producción de biodiésel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

# Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería




Automatización de planta de producción de biodiésel en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

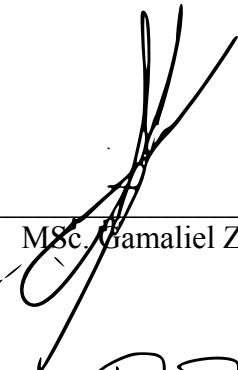
Trabajo de Graduación presentado por Byron Daniel Salvador Salguero para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Electrónica.


Guatemala  
2011


Vo. Bo.:

(f)   
MSc. Carlos Esquit

Tribunal:

(f)   
MSc. Gamaliel Zambrano

(f)   
MSc. Roberto Delgado

(f)   
MSc. Carlos Esquit

Fecha de aprobación: Guatemala 28 de enero del 2011

## Prefacio

La automatización de procesos es de gran interés para mi persona y es la razón por la que elegí este proyecto como trabajo de graduación. Además comprende un objetivo ambiental que es el de tratamiento de aceite frito para convertirlo a biodiésel, un carburante más amigable con el medio ambiente, y no ser desechado evitando así contaminar grandes proporciones de agua.

El desarrollo de este proyecto implicó mucha investigación en áreas como el principio de funcionamiento de los sensores, programación de PLC e incluso instalaciones eléctricas, pero también se investigaron las diferentes opciones de instrumentación que existen en el mercado tomando en cuenta parámetros como sensibilidad, precisión y costos.

Como Ingeniero Electrónico tuve que conocer el proceso, y dependiendo de las variables que eran necesarias medir para garantizar una buena calidad del biodiésel, determinar la mejor opción de instrumentación. Esta decisión conlleva mucho trabajo puesto que es necesario saber la temperatura del proceso, presión, viscosidad, saber si el fluido es corrosivo, el material de fabricación de los tanques, etc. Todas estas variables pueden afectar el funcionamiento del sensor por lo que es necesario concentrar toda esta información y hacerla del conocimiento del proveedor. Una vez elegido el sensor también es indispensable saber la forma de conexión al proceso, por lo que hay que tener claro la terminología NPT, conexión “flange”, etc. También tuve que aprender sobre PLC, su funcionamiento y conexión con los sensores. Por último hay que dimensionar la potencia máxima requerida por el sistema y adquirir el cable dimensionado acordeamente. En fin, el desarrollar este proyecto ha sido toda una experiencia gratificante y de mucho aprendizaje. Al final de este proyecto comprendo cual es el campo de trabajo que abarca un ingeniero electrónico y sin duda alguna el conocimiento adquirido comprende la base para mi desenvolvimiento en la industria.

Con el desarrollo de este proyecto aprendí lo complicado que puede ser trabajar con varias personas. También lo importante que es buscar apoyo de personas que ya conocen sobre el tema e incluso estar en contacto constante con los proveedores de equipo para vigilar las fechas de entrega de equipo e incluso asesoramiento del equipo adquirido.

Por último, quisiera agradecer a mi familia por su incondicional apoyo, al Msc. Carlos Esquit por su asesoramiento y al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle por haberme dado la oportunidad de desarrollar un proyecto completo de automatización.

# Contenido

Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas .....	ix
Resumen.....	x
I. Introducción.....	1
II. Objetivos .....	2
A.    Objetivos generales.....	2
B.    Objetivos específicos .....	2
III. Marco teórico .....	3
A.    Definición de PLC (Controladores lógicos programables).....	3
1.    Estructura de PLC.....	4
2.    Entradas y salidas. ....	5
3.    Lenguaje de programación .....	5
4.    Estructura de memoria .....	8
5.    Lazos de control.....	9
6.    Control PID con un PLC .....	10
7.    Comunicación del PLC con HMI .....	10
B.    Definición de HMI (Human Machine Interface) .....	11
1.    Diseño de HMI para el proceso producción de biodiésel .....	11
2.    Estructura de memoria .....	11
3.    Comunicación del HMI con el PLC .....	11
C.    Definición de actuadores.....	11
1.    Operación de motores.....	14
2.    Operación de válvulas solenoides .....	14
D.    Definición de sensores .....	15
1.    Sensores utilizados para el sistema de producción de biodiésel.....	15
2.    Transmisión 4-20 mA.....	18
E.    Módulo de potencia.....	18
1.    Alimentación de motores .....	20
2.    Alimentación de válvulas .....	21
3.    Alimentación de sensores.....	21

4.	Estructura de panel .....	22
5.	Cableado.....	22
IV.	Antecedentes .....	23
V.	Delimitación e impacto del tema .....	24
VI.	Diseño .....	25
VII.	Resultados obtenidos.....	30
VIII.	Discusión.....	52
IX.	Conclusiones y recomendaciones .....	56
X.	Bibliografía .....	57
XI.	Anexos .....	58
XII.	Glosario.....	68

## Lista de figuras

Figura 1: Estructura de PLC.....	4
Figura 2: Lazo de control cerrado .....	9
Figura 3: Configuración de lazo cerrado utilizando un PLC .....	10
Figura 4: IEC 1131-3 símbolo estándar.....	10
Figura 5: Representación de válvula de control .....	12
Figura 6: Diferentes tipos de válvulas .....	13
Figura 7: Válvula en Y .....	13
Figura 8: Válvula Saunders .....	14
Figura 9: Medidores de capacidades en fluidos conductores. A) Fluido no conductor. B) Fluido conductor. C) Puente de capacidades .....	16
Figura 10: Termopar.....	17
Figura 11: Posicionamiento de los elementos dentro el gabinete .....	27
Figura 12: Instalación de manómetro y transmisor de presión.....	28
Figura 13: Ejemplo de calibración de transmisores electrónicos.....	28
Figura 14: Sistema de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala.....	30
Figura 15: Dibujo del controlador MicroLogix 1200 .....	41
Figura 16: Dibujo de los módulos de expansión para el MicroLogix 1200.....	41
Figura 17: Ubicación de los componentes dentro el gabinete .....	43
Figura 18 Calibración de sensor de nivel para tanque de aceite .....	47
Figura 19: Calibración de sensor de nivel para tanque de metanol .....	48
Figura 20: Calibración de transmisor de temperatura para reactor .....	49
Figura 21: Transmisor de presión vrs presión medida por manómetro .....	49
Figura 22: Transmisor de presión de reactor vrs presión medida por manómetro.....	50
Figura 23: Transmisor de presión vrs presión medida por manómetro .....	50
Figura 24: Diagrama de flujo para realización de catálisis.....	59
Figura 25: Diagrama de flujo para realización de catálisis.....	60
Figura 26: Diagrama de flujo para lavado de biodiésel .....	61
Figura 27: Diagrama de flujo para tratamiento de biodiésel .....	62
Figura 28: Diagrama de flujo de tratamiento de materia prima.....	63
Figura 29: Diagrama de flujo para traslado de aceite filtrado hacia reactor .....	64
Figura 30: Pantalla de presentación de proyecto .....	65
Figura 31: Pantalla de configuración de proceso.....	65
Figura 32: Pantalla de tratamiento de materia prima.....	66
Figura 33: Pantalla de producción de biodiésel.....	66
Figura 34: Pantalla de tratamiento de productos .....	67
Figura 35: Pantalla en la que se especifican los integrantes del equipo de trabajo.....	67

## Lista de tablas

Tabla 1: Información sobre el ambiente .....	25
Tabla 2: Comparación de ofertas de un mismo sensor de distintos proveedores.....	26
Tabla 3: Descripción del sensor de temperatura.....	31
Tabla 4: Características de los transmisores de presión .....	31
Tabla 5: Características del medidor de humedad VAISALA .....	32
Tabla 6: Descripción general del analizador y transmisor de conductividad y pH.....	33
Tabla 7: Descripción general de la celda de conductividad.....	33
Tabla 8: Descripción general de la celda de conductividad.....	34
Tabla 9: Descripción del transmisor de nivel capacitivo.....	35
Tabla 10: Descripción del medidor de nivel puntual.....	35
Tabla 11: Características de la válvula proporcional adquirida.....	36
Tabla 12: Características generales de las válvulas solenoides .....	37
Tabla 13: Inventario de señales digitales de salida.....	37
Tabla 14: Inventario de señales digitales de entrada. ....	38
Tabla 15: Inventario de señales analógicas de entrada.....	38
Tabla 16: Inventario de señales analógicas de salida .....	38
Tabla 17: Carga de fuente de alimentación de MicroLogix 1200 - Cálculo de corriente del sistema .....	38
Tabla 18: Corriente de carga máxima del MicroLogix 1200.....	39
Tabla 19: Alimentación de carga máxima del MicroLogix 1200.....	39
Tabla 20: Señales incorporadas al módulo de PLC.....	40
Tabla 21: Inventario de consumo de potencia de todos los elementos del sistema .....	42
Tabla 22: Muestra los calibres de cables a utilizar para cada equipo .....	44
Tabla 23: Subrutinas desarrolladas.....	45
Tabla 24: Capacidad de conducción de amperios por calibre de cable .....	58

## Resumen

El proyecto consistió en la automatización de la planta de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala. Este proceso es llevado a cabo por los estudiantes de ingeniería electrónica trabajando en conjunto con los estudiantes de ingeniería química.

La automatización de la planta piloto para la producción de biodiésel se inició una vez se tuvo el proceso detallado en planos. En conjunto con los ingenieros químicos se determinaron las variables a medir para garantizar una buena calidad del producto. Para automatizar la planta se decidió utilizar equipo electrónico industrial debido a su robustez, confiabilidad y la facilidad de agregar nuevos elementos sin mayor complicación. El equipo electrónico industrial está comprendido por sensores de nivel puntual, sensores de nivel continuo, analizadores de pH y conductividad, sensores de temperatura, sensores de humedad, sensores de presión, un PLC 1200 de la marca Allen-Bradley, electroválvulas y válvulas proporcionales.

Los sensores antes mencionados fueron elegidos entre las diferentes opciones que ofrece la industria para medir las variables de interés y que se ajustan al proceso. Estos sensores transmiten la información utilizando la escala 4-20 mA que es recibida por los módulos analógicos del PLC para ser procesado por el programa.

La capacidad del PLC se dimensionó en función de las variables a medir. Para esto se tomó en cuenta la capacidad propia del PLC y de módulos de expansión para manejar señales especiales.

Por último, se dimensionó la potencia requerida por el sistema y así realizar la instalación eléctrica que supiera la demanda. El dimensionamiento del sistema se presenta en el trabajo. Una vez ponderada la potencia, se adquirió el cable capaz de transmitir la energía requerida por cada equipo.

Cuando todo el equipo estaba cableado y conectado al controlador, se desarrolló la programación del PLC para el control del sistema. La programación del PLC se realizó en lenguaje escalera y se utilizó un lenguaje de programación del mismo proveedor para realizar el HMI (Human Machine Interface).

Una vez automatizado el sistema, basta con que un operador supervise la secuencia de producción. En el HMI el operador observara los valores de las mediciones realizadas por los sensores, también podrá visualizar y modificar el estado de operación de motores y válvulas según sea conveniente para el proceso. La seguridad es un factor importante y por lo mismo el software desarrollado permite detectar problemas potenciales y los informa al operador instantáneamente. La automatización del proceso tuvo como consecuencia la reducción de errores en el proceso, reducción en la cantidad de subproductos y reprocesos, un mejor aprovechamiento de la materia prima, reducción de costos de operación y una mejor calidad en los productos obtenidos. En general se concluye que la eficiencia del proceso incrementa.

# I. Introducción

La automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG es un proceso largo y de mucha inversión puesto que son varios equipos los que se pueden automatizar. Los equipos de trabajo estuvieron conformados por ingenieros electrónicos e ingenieros químicos al igual que en el presente proyecto. El equipo encargado de la automatización de la planta de producción de biodiésel está conformado por un ingeniero electrónico y por dos ingenieros químicos. Los ingenieros químicos fueron los encargados del rediseño de la planta de producción de biodiésel, ensamble de la planta y fungieron como asesores del ingeniero electrónico. El Ingeniero Electrónico se encargó de la automatización del sistema.

La automatización del sistema se puede dividir en cinco etapas, adquisición de los sensores y actuadores necesarios, dimensionar el controlador, la conexión eléctrica de todo el sistema, alimentación de la potencia necesaria y por último la programación del PLC y el HMI.

El proceso de automatización inicia una vez se tiene definido el tratamiento que debe recibir la materia prima para obtener el producto final deseado, en este caso biodiésel. Para la adquisición de los sensores y actuadores, es necesario reunir las características del ambiente de operación de cada elemento. Con estos datos se selecciona la mejor opción del mercado.

La capacidad del controlador se dimensiona en función de la cantidad y tipo de las señales que debe recibir, también se debe tomar en cuenta la cantidad de lazos de control y memoria. El controlador escogido fue el MicroLogix 1200, específicamente el 1762-L40BXB de la marca Allen-Bradley

A continuación, se realiza la instalación eléctrica. Para dimensionar adecuadamente el cableado, se debe dimensionar la corriente requerida por el sistema. La instalación eléctrica también comprende la protección del sistema. Esta protección se logra por elementos que interrumpen la alimentación en caso de una falla de cortocircuito o sobrevoltaje. En este trabajo se detallan los elementos considerados.

Una vez todo el sistema está energizado y protegido debidamente, es momento de desarrollar el código que controlara el proceso. Se utilizó el paquete RSLogix 500 y código en escalera para programar el PLC. El HMI desarrollado representa todo el sistema. En esta aplicación el operador puede visualizar el estado de los actuadores así como la lectura obtenida de sensores. El operador tiene la facilidad de cambiar el estado de los operadores siempre y cuando no altere el proceso o sea una acción peligrosa.

El último paso en esta secuencia de automatización es la calibración de los instrumentos para garantizar que las mediciones proporcionadas estén en un rango permitido. La calibración de cada sensor se detalla en el documento.

## **II. Objetivos**

### **A. Objetivos generales**

- Automatizar la planta de producción de biodiésel en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

### **B. Objetivos específicos**

- Diseñar el proceso indicando los sensores y actuadores necesarios para la automatización del sistema.
- Adquirir la mejor opción de cada actuador y sensor según lo ofertado por los proveedores.
- Diseñar el módulo de potencia de manera que todos los actuadores y sensores en el sistema estén debidamente alimentados.
- Diseñar y programar el HMI (Human Machine Interface), tal que el operador entienda claramente en qué estado se encuentre cada actuador en el sistema.
- Programar el PLC (Programmable Logic Controller) .
- Calibrar sensores para tomar las mediciones de humedad, pH, temperatura, conductividad y presión.
- Hacer la puesta en marcha del proceso automatizado para la planta de biodiésel.

### **III. Marco teórico**

#### **A. Definición de PLC (Controladores lógicos programables)**

Los PLC (Programmable Logic Controller por sus siglas en inglés) son dispositivos electrónicos que se desarrollaron para sustituir los sistemas de control basados en circuitos eléctricos con relés, interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de la maquinaria en las plantas industriales.

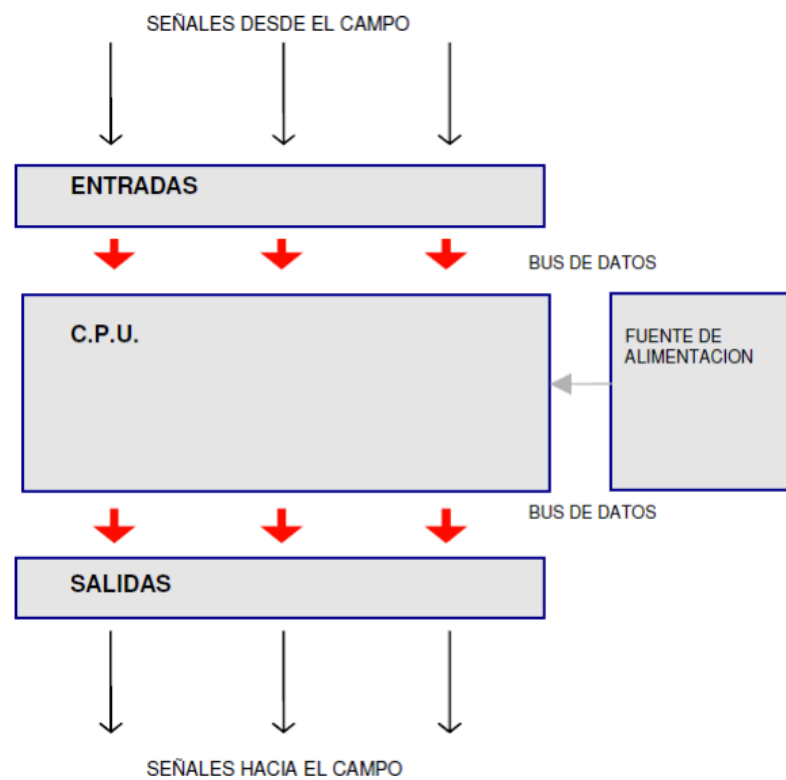
Estos dispositivos utilizan una memoria programable para almacenar instrucciones e implementar funciones tales como: lógicas, secuenciales, cronometraje, conteo y aritmética para el control de procesos o maquinaria. Se dice que los PLC son de lógica programable puesto que la programación está relacionada con la implementación de lógica y la conmutación de estados, por ejemplo, si A o B es verdadero, active D.

En una planta, las entradas del PLC están conectadas a sensores, ej. Switch de nivel, y las salidas a los actuadores, ej. Motores. De esta forma, los PLC's tienen la función de controladores centrales en un proceso de producción automatizado, en el cual, todos los dispositivos de acción son controlados por el PLC, según la información ofrecida por los sensores y de acuerdo a las ordenes establecidas por el programa de usuario, que es cargado en la memoria del PLC.

Los PLC tienen la gran ventaja de que el mismo controlador puede ser utilizado en una amplia gama de sistemas de control. Para modificar un sistema de control solo se necesita que el operador ingrese un nuevo juego de instrucciones. No hay necesidad de recablear. El resultado es un sistema flexible y más económico.

1. Estructura de PLC. Para poder interpretar la estructura de un controlador lógico programable (PLC) podemos construir un sencillo diagrama de bloque como el de la Figura 1.

Figura 1: Estructura de PLC



De la Figura 1 se pueden separar tres partes fundamentales: las entradas, la unidad central de proceso o CPU y las salidas.

La unidad central de proceso o CPU (Central Processing Unit) es la encargada de ejecutar el programa escrito por el usuario y almacenado en su interior. La CPU, el “cerebro” del controlador programable, está formada por dos partes elementales: procesador y memoria.

Las entradas (interfases o adaptadores de entrada) se encargan de adaptar las señales provenientes del campo a niveles que la CPU pueda interpretar como información. Cada entrada es reconocida por el CPU mediante una identificación.

A las entradas se conectan elementos captadores, estos pueden ser entre otros:

- Botoneras
- Llaves
- Termostatos
- Presóstatos

- Límites de carrera
- Sensores de proximidad
- Sensores fotoeléctricos

Con respecto a las salidas, es necesario un elemento que pueda manejar una potencia mayor a la que pueden manejar los circuitos que componen la CPU. Este eslabón es la interfase de salida. Cuando la CPU ordena la activación de una salida, esta adapta la señal originada por la CPU y acciona un componente (relé, triac o transistor) que pueda conducir la corriente requerida.

En muchos controladores programables las interfases de entradas y de salidas pueden no solo tomar valores 1 y 0, sino también valores intermedios dentro de un rango. Éstas se denominan entradas/salidas analógicas.

2. Entradas y salidas. Las entradas y salidas (Input/Output) son las partes del controlador programable que lo vinculan con el campo. Adaptan las señales de captadores para que la CPU los reconozca en el caso de las entradas y ante una orden de la CPU activan un elemento de potencia en el caso de las salidas.

No todas las señales de campo son iguales ni mucho menos de la misma naturaleza, por ello existen distintas interfases de entrada y de salida adecuadas a los tipos de señales más comunes. Por supuesto, para un controlador programable todas estas señales deben ser eléctricas. Cuando se trata de tomar mediciones no eléctricas como presiones, caudales, etc., siempre debe existir un conversor o transmisor entre la variable de proceso y la entrada del controlador programable.

Una primera clasificación para entradas y salidas podría ser la que sigue:

- Discretas: también llamadas lógicas u “on/off”- pueden tomar solo dos estados.
- Analógicas: también llamadas numéricas – pueden tomar una cantidad de estados dentro de un cierto rango (ej: 4-20 mA/ 1 a 5 V/ 0 a 10 V).
- Especiales: son variantes de las anteriores como por ejemplo las de conteo de alta velocidad, de termocupla, etc.
- Inteligentes: poseen su propia CPU y se comportan como si fueran computadoras autónomas pero que intercambian datos con la CPU del controlador programable.

3. Lenguaje de programación. Los controladores programables pueden ser adaptados a gran cantidad de aplicaciones muy dispares entre sí gracias a su programabilidad, lo cual constituye probablemente la mayor virtud de estos equipos, gracias a esta virtud, también es posible efectuar modificaciones en el programa de un controlador ya instalado hace tiempo para agregar nuevos elementos en la máquina o proceso automatizado.

Los pasos elementales a seguir son los siguientes:

- Comprensión del proceso o máquina a controlar: es fundamental en este paso el trabajo conjunto del programador con un conocedor del proceso o máquina. De acuerdo al tipo de aplicación es conveniente elaborar en esta etapa un diagrama de flujo o descripción del funcionamiento.
- Selección del controlador programable adecuado: como primera medida deben determinarse la cantidad y tipo de entradas y salidas necesarias en función de los elementos de campo disponibles. Las entradas deberán ser adecuadas al tipo de sensores, velocidad, resolución, etc. Las salidas se seleccionarán en función de la corriente y tensión a manejar y frecuencia de actuación. La determinación de la cantidad de memoria que necesitara el programa es bastante difícil de determinar a pesar de algunas ecuaciones que aparecen en los libros, aquí es importante una consulta con el proveedor del equipo o un programador experto.
- Asignación de entradas y salidas: Una vez seleccionado el equipo pueden desarrollarse dos tareas paralelas: la instalación eléctrica y la programación, mientras el electricista lo instala, el programador va elaborando el programa en su escritorio o en su PC. Pero a esta altura es imprescindible que el cableado de entradas y salidas coincida con el programa. La asignación de entradas y salidas consiste exactamente en definir en qué borne de cada módulo irá conectado cada elemento de campo.
- Elaboración del programa: en esta etapa se elaboran tanto la parte secuencial como los algoritmos de control. Es muy difícil poder en esta etapa poder simular el funcionamiento del programa para que, al ponerlo en marcha, sufra la menor cantidad de ajustes. Los paquetes de software permiten chequeos de sintaxis, verificación de elementos repetidos no deseados, etc. Pero para una simulación de funcionamiento deberían tener capacidad de emular el proceso a controlar.
- Documentación provisoria: Esta documentación consiste en la impresión de listados o diagramas desde la PC o simplemente contar con los diagramas obtenidos en la PC. Durante la programación es muy importante llevar un registro actualizado de los elementos internos que se van utilizando en el programa. Cuando el programa está listo como para ser almacenado en el controlador, es conveniente efectuar una documentación provisoria que ayudara en la puesta en marcha.
- Puesta en marcha: el programa se carga en la memoria del equipo para efectuar un “ensayo general”, la forma de cargar el programa en la memoria dependerá de los medios disponibles. Se pueden realizar pruebas de campo o simulando las entradas para luego realizar la puesta en marcha real con la máquina funcionando a pleno.
- Documentación final: una vez que el programa ha sido puesto en marcha se debe realizar la documentación final del programa que incluye las modificaciones realizadas durante la puesta en marcha. [2]

Los lenguajes de programación tienden a ser cada día más potentes y más sencillos para el usuario. Los tipos de lenguaje más difundidos son:

- Diagramas de contactos (Relay Ladder Logic)
- Programación secuencial (Stage Programming)
- Programas en álgebra de Boole (Boolean Mnemonics)

- Instrucciones de alto nivel

Los controladores modernos no utilizan ninguna modalidad totalmente pura, es común encontrar equipos programables en diagrama de contactos que incluyen manejo de rutinas que se programan en algo parecido a “C” o Pascal. Los micro PLC se programan en lenguaje de contactos, pero también ingresando las instrucciones en lenguaje booleano.

Los lenguajes más difundidos y más aceptados por los usuarios de PLC son los basados en diagramas de contactos también llamados “diagrama escalera”, “ladder”, “RLL” (Relay Ladder Logic) [2].

Para poder programar un controlador se deben asignar previamente las conexiones de los elementos de campo a las entradas y salidas, conocer la numeración correspondiente a cada entrada y salida y el resto del mapa de memorias del controlador, es decir numeración de relés internos, temporizadores, controladores, etc., que serán utilizados durante la programación.

Según el equipo, la numeración de las entradas y salidas es asignada en forma automática tomando la ubicación de los módulos, en cambio en otros es posible (o se debe) asignar en forma manual la numeración.

- Diagrama de contactos – Relay Ladder Logic

Este lenguaje de programación es de tipo gráfico y consiste en la representación de un circuito electromecánico equivalente al que se hubiere utilizado con elementos convencionales.

Las instrucciones discretas básicas son contactos normalmente abiertos o normalmente cerrados y bobinas. Existen además tipos especiales de bobinas que forman temporizadores, contadores, instrucciones de manejo de datos, etc.

El diagrama se plantea tomando dos líneas o barras verticales que se suponen conectadas a una fuente de alimentación imaginaria, entre dichas barras se disponen los contactos en forma circuitos en serie, paralelo o combinaciones y como terminación de la línea una bobina conectada a la barra vertical derecha que se energizara cuando los contactos lo permitan.

- Medios para programación

En la actualidad, los equipos pequeños y medianos se programan en campo con sencillos programadores de bajo costo y gran comodidad de uso y manipulación. Las antiguas unidades de programación pesadas, caras y de uso exclusivo para determinadas marcas y modelos ya han desaparecido.

Cada fabricante ofrece paquetes de software que convierten a cualquier PC en unidades de programación muy potentes ya que se pueden almacenar los programas en disco y

además documentar todo por impresora. Las notebooks son ideales para programación en campo.

4. Estructura de memoria. Como cualquier sistema informático el PLC dispone de una memoria de programa, donde se almacenan los códigos encargados de ejecutar las funciones programadas para controlar el proceso. Las instrucciones serán almacenadas en bytes y la cantidad que pueden ser almacenadas, depende de la cantidad de memoria que la CPU puede direccionar [2].

Los diferentes tipos de módulos serán los encargados de conectarse con el campo para obtener y proveer la información necesaria para el control. Existen distintas prestaciones en los módulos de entrada/salida, de acuerdo a la tarea que deberá realizar el PC.

Existen distintas tecnologías aplicadas a los controladores; las más utilizadas son del tipo:

- ROM (Read Only Memory) o memorias de solo lectura. La escritura de la información se lleva a cabo durante la construcción por lo cual el contenido no es modificable ni borrable.
- PROM (Programmable Read Only Memory) son de solo lectura, pero programables por el usuario antes de ser utilizadas. Una vez programadas son inalterables.
- EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) son de solo lectura, pero reprogramables por el usuario previa cancelación de la información anterior por medio de aplicaciones ultravioleta, que inciden al chip por medio de una ventana. Es aconsejable proteger la misma por medio de una cinta oscura a fin de que no se produzca un borrado accidental por exposiciones ambientales.
- EAROM (Electrically Alterable Read Only Memory) son de características similares a las precedentes, pero se reprograman por medios eléctricos sin necesidad de ser extraídas de su puesto de trabajo, también denominadas E<sup>2</sup> PROM (Electrically Erasable PROM).
- NVRAM denominada también shadow se compone esencialmente de una RAM y una EEPROM. [2]

Algunas características importantes y generales a todas las memorias, se detallan a continuación.

- Capacidad: representada por el número total de bits que pueden ser almacenados, la misma se determina de acuerdo a la magnitud del programa que debe ser cargado para el desarrollo de la aplicación.
- Tiempo de acceso: es el tiempo requerido para ser leída en cualquier posición de la misma, está determinado de acuerdo a la tecnología de la CPU. [2]

El PLC dispone diferentes zonas de memoria de acuerdo a la función que debe desempeñar en el sistema global.

La memoria del sistema es la que contiene el sistema operativo, donde se encuentra el intérprete de instrucciones y todas las rutinas indispensables para el funcionamiento del PLC. El sistema operativo desarrolla tareas de primera importancia, como es el control de los periféricos, transferencia de datos, comunicaciones, se encuentra almacenado en ROM y es modificable únicamente por el constructor (propiedad intelectual).

La memoria del usuario es la que utiliza quien proyecta la aplicación a fin de satisfacer las necesidades de la misma, es indispensable que el contenido sea modificable para producir modificaciones en la aplicación por lo que se encuentra en RAM.

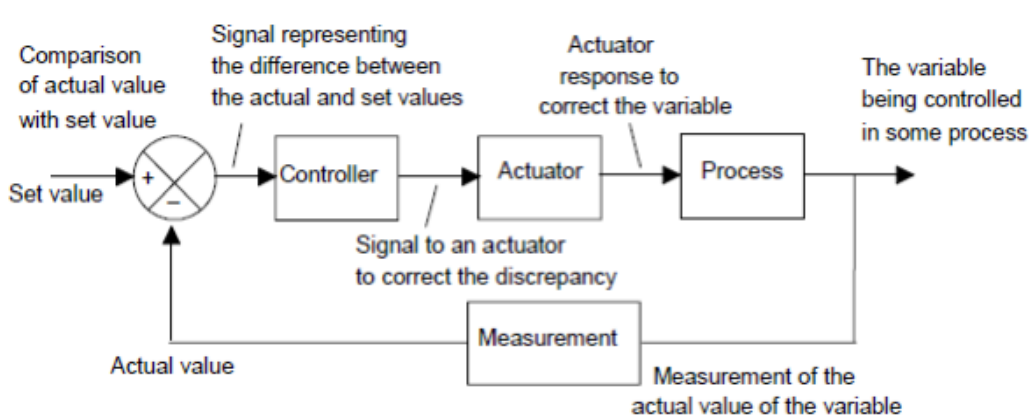
- Módulos de input / output

Las señales una vez interpretadas y/o procesadas, se registran habitualmente en un área de la memoria del sistema denominada registro – imagen de entrada/salida.

5. Lazos de control. Es posible regular la temperatura en una habitación manipulando el encendido y apagado del calentador eléctrico. La habitación se calentará hasta una temperatura adecuada sin tomar en cuenta la tasa transferencia o pérdida de calor. Este es un ejemplo de un lazo de control abierto en el que no hay retroalimentación hacia el calentador para que se modifique la tasa la cual se debería calentar la habitación.

En un lazo de control cerrado de una variable, ej. El control de la temperatura en una habitación, se logra comparando el valor actual de la variable con el valor deseado de la variable y así determinar si es necesario encender o pagar el calentador eléctrico. En la Figura 2 se representa este sistema por medio de bloques.

Figura 2: Lazo de control cerrado

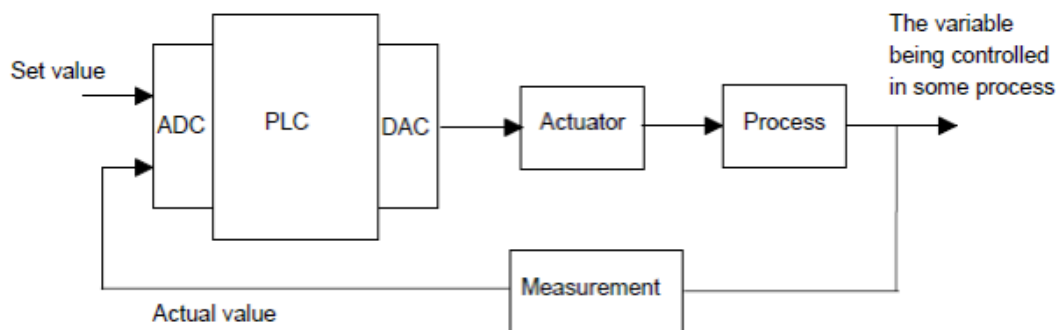


El valor actual de la variable de interés es comparado con un valor preestablecido obteniendo así una señal que representa la diferencia o el error obtenido. El controlador

recibe esta señal y entrega una orden a un actuador para responder correctamente a la discrepancia. Este sistema se denomina lazo de control cerrado.

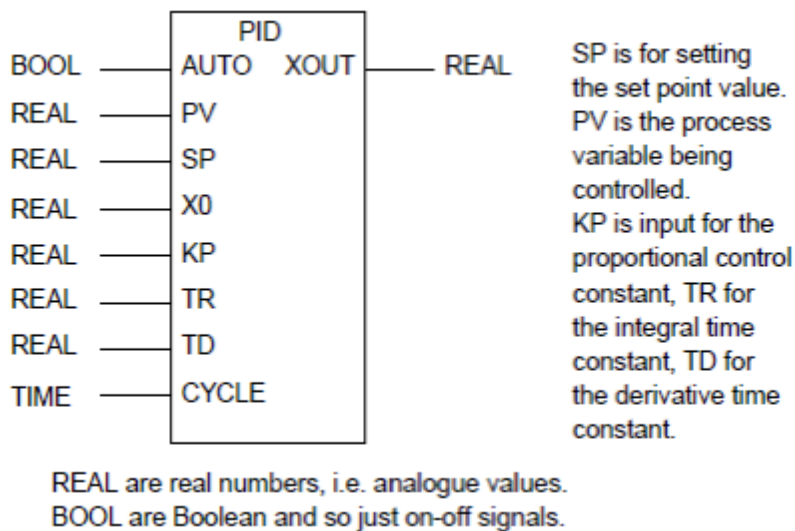
La Figura 3 muestra un arreglo que podría ser utilizado con un PLC para la aplicación de un lazo de control cerrado. Se asume que tanto el actuador como los valores medidos son análogos y por lo tanto se requiere una conversión analógica a digital.

Figura 3: Configuración de lazo cerrado utilizando un PLC



6. Control PID con un PLC. Varios PLC proveen los cálculos del PID para determinar la salida del controlador como una rutina estándar. Lo único que debe definir el usuario por medio del programa son los valores de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  y la ubicación de las señales de entrada y salida. En la Figura 4 se muestra el símbolo estándar IEC 1131-3 para el bloque de función de un PID. Cuando se trabaja en “AUTO”, el bloque de función calcula la salida, “XOUT”, necesaria para corregir el error obtenido.

Figura 4: IEC 1131-3 símbolo estándar



7. Comunicación del PLC con HMI. La comunicación del PLC con la PC que contiene el HMI se realiza por medio serial. Esta comunicación puede ser directa, lo que implica que

no se necesitaría de un modem. Dependiendo el modelo del PLC, estas pueden ser RS232, Profibus, Ethernet, etc.

## **B. Definición de HMI (Human Machine Interface)**

Son lenguajes de programación que permiten el desarrollo de interfaces gráficas que representen el sistema automatizado. Por medio de esta interfaz un operador visualiza el estado de actuadores, lectura de sensores, fase en la que se encuentra el proceso, mensajes de errores, etc. También se tiene la opción de llevar un registro de fallas, valores de variables o cualquier información que sea de interés al operador. Las actualizaciones de todas las variables visibles al operador se realizan por medio de la conexión directa que existe entre el PLC y el computador que contiene el HMI.

1. Diseño de HMI para el proceso producción de biodiesel. Para diseñar un HMI de un proceso, se utilizan las imágenes que ya contiene el programa a utilizar. Las imágenes que se escogen deben ser representativas de los sensores y actuadores que se tienen en el sistema real. Al finalizar el HMI, se debe contar con una representación digital del sistema completo.

2. Estructura de memoria. Debido a que el programa está almacenado en una PC, toda la información de interés será almacenada en el disco duro. El usuario puede comandar hacer histogramas de alguna variable que le sea de interés y así tener el registro de su comportamiento a través del tiempo.

3. Comunicación del HMI con el PLC. Como se mencionó anteriormente, la comunicación entre el PLC y la PC es serial. Esta comunicación es full dúplex, esto quiere decir que el HMI está enviando constantemente el estado de variables que el operador puede manipular para alterar el proceso, y el PLC está constantemente enviando el estado de los actuadores, sensores, fallas, etc.

## **C. Definición de actuadores**

Se denominan actuadores a aquellos elementos que pueden provocar un efecto sobre un proceso automatizado. Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseoso. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas.

- Válvulas de control

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la Figura 5 puede verse una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

Figura 5: Representación de válvula de control

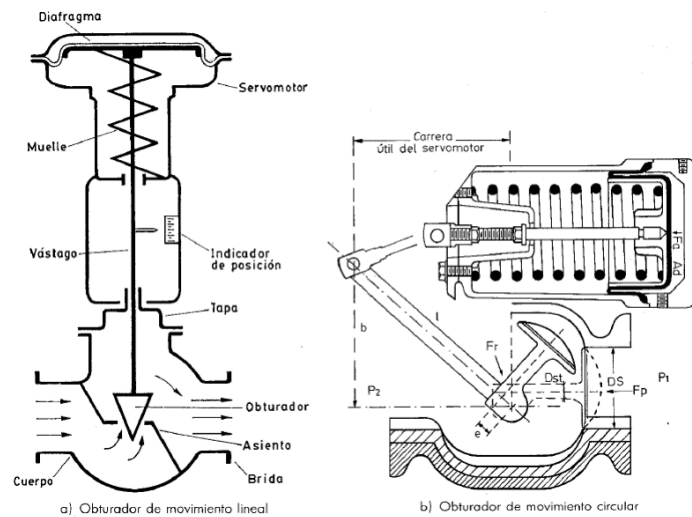


Fig. 8.1 Válvula de control representativa.

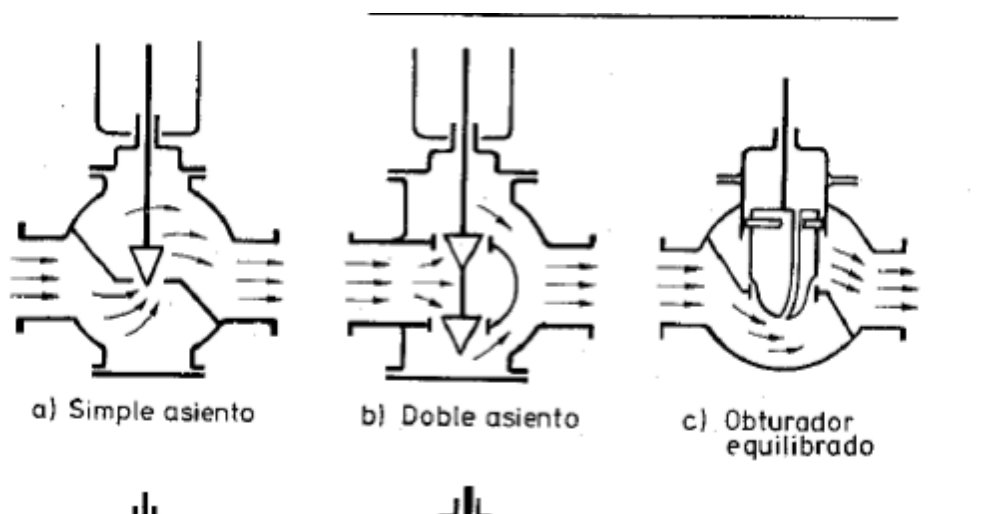
El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador.

- Válvula de globo

Puede verse en la Figura 6 siendo de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente. La válvula de simple asiento precisa de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplean válvulas de gran tamaño o bien cuando debe trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.

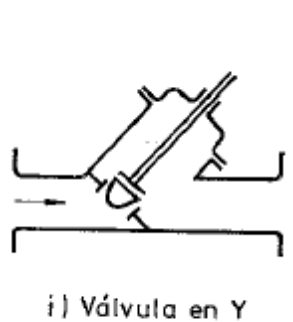
Figura 6: Diferentes tipos de válvulas



- Válvula en Y

En la Figura 7 puede verse su forma. Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de autodrenaje cuando está instalada inclinada con un cierto ángulo.

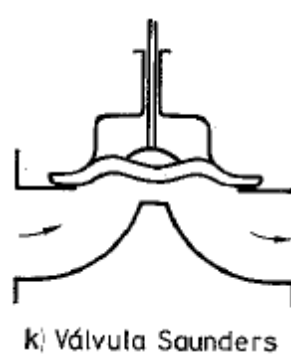
Figura 7: Válvula en Y



- Válvula Saunders

En la válvula Saunders, el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo cerrando así el paso del fluido. La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos. Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente. Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o agresivos o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión. Esta se visualiza en Figura 8.

Figura 8: Válvula Saunders



- Bombas dosificadoras

Son accionadas por actuadores neumáticos o electrónicos y son utilizadas principalmente en el envío de cantidades precisas de líquidos para mezclas, en casos tales como el control de pH, tratamiento de aguas, adición de productos en la industria alimenticia, etc., aplicaciones que se caracterizan por bajos caudales, altas presiones, altas viscosidades, etc. [3]

1. Operación de motores. Para operar los motores desde el PLC se necesita equipo electrónico industrial que abra o cierre el circuito de potencia del motor en función de una señal de mando emitida por un controlador. El equipo que se utiliza para este propósito se denomina Contactor.

Los motores se encuentran al final de las ramas de una instalación y su función es transformar la energía eléctrica en energía mecánica. Cada motor debe tener su arrancador propio.

Los motores tipo jaula de ardilla o de inducción (que son los que se encuentran más comúnmente en las instalaciones) son motores eléctricos asíncronos, es decir, su velocidad varía con la aplicación de carga y es siempre menor a la de sincronismo. La característica que les da este nombre es el tipo de devanado del rotor formado por barras conductoras interconectadas con anillos (en cortocircuito) cuyo diseño es muy parecido a una jaula de ardilla. Estos motores son económicos, pero tienen la desventaja de requerir una corriente muy alta en el momento del arranque (6 o 7 veces la de plena carga o nominal). [1]

Todos los motores son accionados por medio del PLC. Es importante mencionar que el PLC se encarga únicamente enviar la señal de operación al dispositivo que se encarga de la activación del motor. El mecanismo que recibe la señal del PLC y se encarga de cerrar o abrir el circuito de alimentación se denomina contactor. El funcionamiento del contactor se detalla en la sección de potencia.

2. Operación de válvulas solenoides. Todas las válvulas son accionadas por medio del PLC. Es importante mencionar que el PLC se encarga únicamente enviar la señal de operación al dispositivo que se encarga de la activación de la válvula. El mecanismo que

recibe la señal del PLC y se encarga de cerrar o abrir el circuito de alimentación se denomina relé. El funcionamiento del relé se detalla en la sección de potencia.

#### **D. Definición de sensores**

Según la Real Academia Española (RAE), un sensor o transductor es un dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.

##### 1. Sensores utilizados para el sistema de producción de biodiesel.

- Medidores de nivel continuo y puntual

Instrumentos basados en características eléctricas del fluido. El medidor de nivel conductivo o resistivo consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre, por ejemplo, en el nivel de agua de una caldera de vapor. La impedancia mínima es del orden de los 20 M  $\Omega$ /cm, y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas por causa del fenómeno del electrólisis. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2 mA; el relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavado eléctricamente en el circuito.

El medidor de capacidad mide la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido. En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores. En fluidos conductores con una conductividad mínima de 100 microhmios/c.c. el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas. El circuito electrónico alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, lo cual disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y permite aliviar en parte el inconveniente del posible recubrimiento del electrodo por el producto.

Figura 9: Medidores de capacidades en fluidos conductores. A) Fluido no conductor. B) Fluido conductor. C) Puente de capacidades

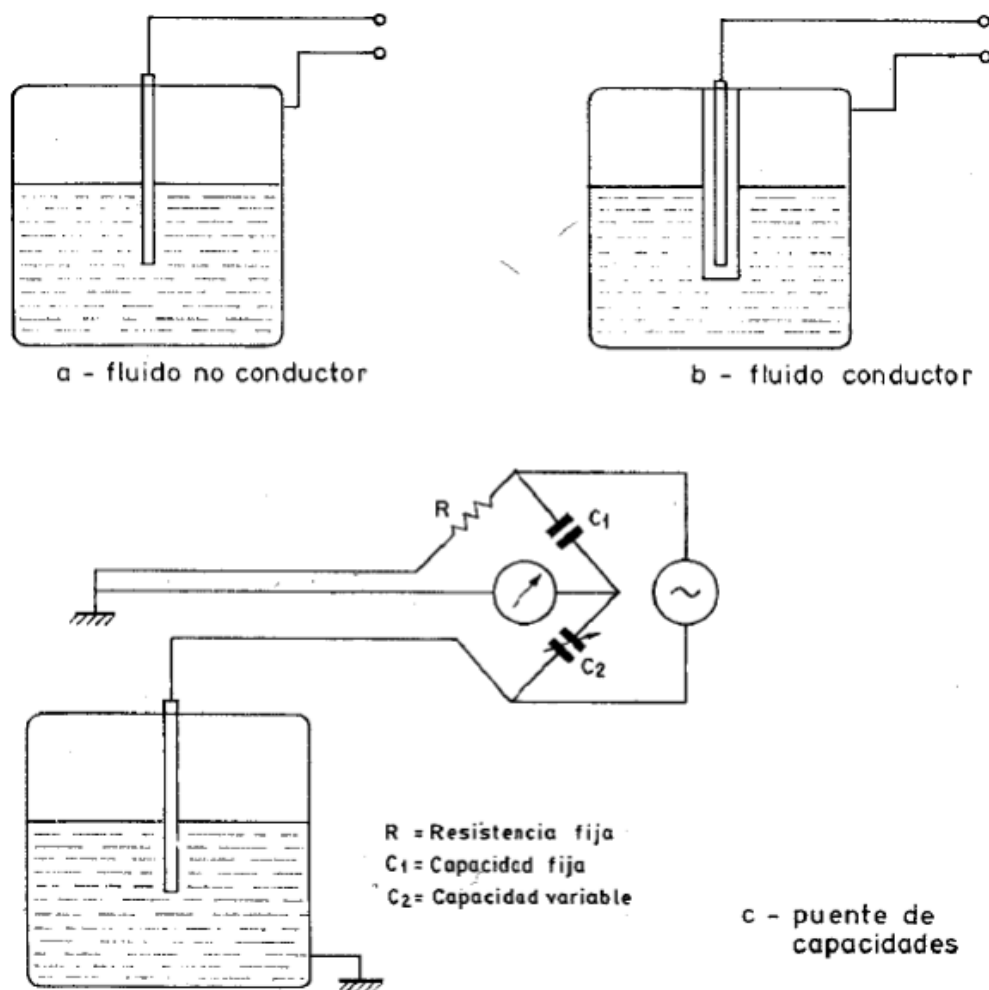


Fig. 5.13 Medidor de capacidad.

Se caracterizan por no tener partes móviles, son ligeros, presentan una buena resistencia a la corrosión y son de fácil limpieza. Su campo de medida es prácticamente ilimitado y pueden emplearse en la medida de nivel de interfases. Tienen el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas ( $0.1\%$  de aumento de la constante dieléctrica/ $^{\circ}\text{C}$ ) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido pueden adherirse al electrodo variando su capacidad y falseando la lectura, en particular en el caso de líquidos conductores. El funcionamiento del sistema a una frecuencia elevada, o bien la incorporación de un circuito detector de fase, compensa en parte este inconveniente.

- Medidores de temperatura

El termopar se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura. Esta circulación

de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

Figura 10: Termopar

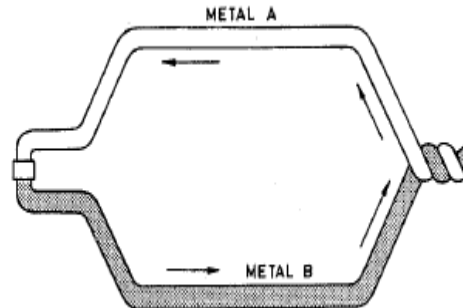


Fig. 6.17 Termopar.

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

1. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
2. Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
3. Ley de las temperaturas sucesivas. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_1$  y  $T_3$  es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a  $T_1$  y  $T_2$  y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas  $T_2$  y  $T_3$ .

Por estas leyes se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperatura con la unión de referencia.

- Medidas de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas 13 y 14 que tuvieron lugar en París en octubre de 1967 y 1971, y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III

Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología Lega. El pascal es 1 newton por metro cuadrado ( $1 \text{ N/m}^2$ ), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo de más a 1 Kg, le comunica una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ .

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: mecánicos, neumáticos, electromecánicos y electrónicos.

Entre los mecánicos esta la categoría de los elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen. Los elementos primarios elásticos más empleados son: el tubo Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.

El diafragma consiste en una o varias capsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que, al aplicar presión, cada capsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El sistema se proyecta de tal modo que, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento. [3]

El material del diafragma es normalmente aleación de níquel o inconel x. Se utiliza para pequeñas presiones.

2. Transmisión 4-20 mA. La transmisión 4 – 20 mA es una forma comúnmente utilizada para transmitir la información obtenida de sensores. La intensidad de la señal es proporcional al valor medido por el sensor. Se utiliza como valor mínimo de 4 mA puesto que este valor indica que la comunicación entre el sensor y el analizador no ha sido interrumpida, mientras que si se utilizaran 0 mA habría lugar a la duda.

## **E. Módulo de potencia**

Es indispensable suministrar la potencia requerida del sistema. Para determinar la potencia requerida por el sistema, se debe realizar un la sumatoria de la potencia que requiere cada elemento que compone el sistema.

- **Tableros**

Se entiende por Tablero un gabinete metálico donde se colocan instrumentos, interruptores, arrancadores y/o dispositivos de control. El Tablero es un elemento auxiliar para lograr una instalación segura, confiable y ordenada.

- **Tierra física**

Desde el punto de vista eléctrico, se considera que el globo terráqueo tiene un potencial de cero; se utiliza como referencia y como sumidero de corrientes indeseables. Sin embargo, puede suceder que por causas naturales o artificiales una zona terrestre tenga en forma temporal una carga eléctrica negativa o positiva con respecto a otra zona. Por esta razón

pueden aparecer corrientes en conductores cuyos extremos estén en contacto con zonas de potenciales distintos.

- Neutro del generador

Se le llama así al punto que sirve de referencia para los voltajes generados en cada fase. En sistemas equilibrados y bajo circunstancias de operación normales, la diferencia de potencial entre el neutro del generador y la tierra física del lugar donde está instalado es cero.

- Corrientes en motores trifásicos

El cálculo de la corriente en un alimentador de un motor trifásico (o cualquier otra carga equilibrada entre las tres fases) se realiza con la expresión siguiente:

$$I = \frac{P_w}{\sqrt{3} * V * \eta * \cos\phi}$$

Donde:

I = Corriente que circula por cada una de las fases que alimentan al motor, en amperes (A).

P = Potencia del motor en la flecha, en watts o HP.

$\eta$  = Eficiencia del motor, en por unidad (menor que la unidad).

$\cos\phi$  = Factor de potencia

Los valores de eficiencia y factor de potencia dependen del tamaño del motor de inducción; deben ser proporcionados por el fabricante y normalmente aparecen en la placa de especificaciones.

- Corrientes de motores monofásicos

Para el cálculo de la corriente de un alimentador para un motor monofásico se utiliza la siguiente expresión:

$$I = \frac{P_w}{V * \eta * \cos\phi}$$

Donde:

P = Potencia del motor en la flecha, en watts o HP.

I = Corriente en el alimentador, en amperes (A).

V = Voltaje aplicado al motor entre los conductores de alimentación, en volts (V). Puede ser entre fase y neutro, entre dos fases o cualquier derivación de un transformador que forma un circuito cerrado.

$\eta$  = Eficiencia del motor, en por unidad.

$\cos\phi$   
= Factor de potencia.

- Dispositivos de protección eléctrica

Un dispositivo de protección en su sentido más amplio es aquel que al presentarse una falla abre el circuito eléctrico. Para lograr esto se requiere desempeñar dos funciones: detectar o sensar la falla y ejecutar la interrupción.

El interruptor termomagnético se utiliza con mucha frecuencia debido a que es un dispositivo de construcción compacta que puede realizar funciones de conexión o desconexión, protección contra cortocircuito y contra sobrecarga en instalaciones de baja tensión (hasta 600 V).

La protección contra sobrecarga está constituida por una barra bimetálica que, dependiendo del valor que tenga la corriente, así como del tiempo que se mantenga, provoca el disparo que abre los contactos. Esta misma barra está colocada a cierta distancia de una pieza ferromagnética. Cuando la corriente se eleva a valores muy altos (cortocircuito) se crean fuerzas electromagnéticas de atracción capaces de provocar que los contactos se abran un tiempo muy corto. De esta manera se logra la protección contra cortocircuito. Estos interruptores tienen una calibración que en algunos casos solo el fabricante puede modificar.

El interruptor termomagnético no se utiliza como protección de sobrecarga en motores de inducción jaula de ardilla debido a que la constante termina de su elemento es relativamente pequeña y puede dispararse con la corriente de arranque de un motor; además la calibración de los interruptores termomagnéticos no cubre toda la escala de corrientes de los diferentes tamaños de motores.

## 1. Alimentación de motores

- Guardamotores

Un guardamotor es un disyuntor magneto-térmico, especialmente diseñado para la protección de motores eléctricos. Este diseño especial proporciona al dispositivo una curva de disparo que lo hace más robusto frente a las sobreintensidades transitorias típicas de los arranques de los motores. El disparo magnético es equivalente al de otros interruptores automáticos pero el disparo térmico se produce con una intensidad y tiempo mayores. Su curva característica se denomina D o K.

Las características principales de los guardamotores, al igual que de otros interruptores automáticos magneto-térmicos, son la capacidad de ruptura, la intensidad nominal o calibre y la curva de disparo. Proporciona protección frente a sobrecargas del motor y cortocircuitos, así como, en algunos casos, frente a falta de fase.

- Contactores

Un contactor consiste básicamente de una bobina con un núcleo de hierro que cierra o abre un juego de contactos al energizar o desenergizar la bobina.

## 2. Alimentación de válvulas

- Relevadores térmicos o bimetales

El relevador térmico es aquel que tiene un elemento sensor de temperatura de tipo bimetálico, constituido por dos láminas de distinto coeficiente de dilatación térmica unidas mecánicamente mediante un proceso de laminación. La circulación de una corriente eléctrica a través del elemento bimetálico o la corriente que fluye en una resistencia enrollada sobre el bimetalo aislado provoca variaciones de temperatura que deforman al bimetalo y accionan un microinterruptor. Estos elementos son poco sensibles a las variaciones de la temperatura ambiente.

La aplicación más importante de los bimetales es como sensores de sobrecarga en motores – sobre todo de inducción tipo jaula de ardilla-, ya que están sujetos al mismo régimen térmico que los conductores del devanado del motor. Entonces operan cuando una corriente superior a la de calibración permanece por varios minutos, pero permiten que fluya la corriente de arranque sin enviar la señal de disparo y al mismo tiempo arranques y paros frecuentes en intervalos muy cortos si provocan el disparo.

- Relé

El relé o relevador, es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835.

Un relé es un interruptor accionado por un electroimán. Un electroimán está formado por una barra de hierro, llamada núcleo, rodeada por una bobina de hilo de cobre.

Al pasar una corriente eléctrica por la bobina el núcleo de hierro se magnetiza por efecto del campo magnético producido por la bobina, convirtiéndose en un imán tanto más potente cuanto mayor sea la intensidad de la corriente y el número de vueltas de la bobina. Al abrir de nuevo el interruptor y dejar de pasar corriente por la bobina, desaparece el campo magnético y el núcleo deja de ser un imán.

## 3. Alimentación de sensores

- Fusibles

Se puede decir que los fusibles son el elemento de protección más utilizado en las instalaciones eléctricas. En términos sencillos se trata de un conductor con una calibración precisa para fundirse cuando la corriente que circula por el pasa de cierto límite. Entonces los fusibles cubren las funciones del sensor y del interruptor.

El elemento fusible está colocado dentro de una estructura con terminales y bases para su fijación con el aislamiento necesario, los que limitan el nivel de voltaje. El elemento fusible puede estar rodeado de aire, arena de cuarzo o algún otro material para enfriar los gases del arco y restablecer el medio dieléctrico.

El fusible se utiliza más comúnmente como medio de protección contra cortocircuito que contra sobrecarga. Sin embargo, existen los llamados “fusibles limitadores de corriente” que también protegen contra sobrecarga. [1]

4. Estructura de panel. La posición dentro del panel de cada elemento depende de sus requerimientos de ventilación y generación de calor. Por ejemplo, el PLC necesita un espacio mínimo entre los elementos que lo rodean con la finalidad de que el aire circule y se pueda ventilar. El PLC es un elemento que genera calor por lo que este debería estar ubicado arriba de los elementos que generan poco calor. Esto se debe a que el calor sube y si el elemento que genera calor esta hasta abajo, el calor calienta los otros elementos a medida que sube por el panel. También se recomienda que el panel tenga ventilación. Para esto se puede instalar un ventilador o bien dejar rejillas para ventilación. La fuente de 24 V es otro elemento generador de calor, por lo que se recomienda ubicarlo arriba.

El orden dentro el panel es necesario para facilitar la ubicación de errores. Esto se logra fácilmente colocando canaletas. Las canaletas mantienen el conjunto de cables ordenados. También es importante mantener separados el conjunto de cables de señales de control y el grupo de grupo de cables para la potencia. Esto se debe a que los cables de potencia tienen la capacidad de generar ruido, afectando las señales de control, por lo que se recomienda separar estos conjuntos para garantizar el buen funcionamiento del sistema.

5. Cableado. El cableado se debe dimensionar de acuerdo a la corriente máxima que demanda una carga. Para esto se debe determinar el consumo máximo de la carga en el manual de usuario o en la placa de información eléctrica y utilizar la Tabla 23 en la sección de anexos para determinar el calibre del cable.

## **IV. Antecedentes**

La automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG inició en el 2007 y continúa hoy en día. En el 2007 se inició con la automatización de la Torre de Absorción Líquido-Líquido finalizando en el 2008. El siguiente proyecto de automatización fue la Columna de Destilación, iniciado en el 2008 y finalizado en el 2009. Es importante mencionar que en estos proyectos no se utilizaron PLC como controladores del proceso, sino que se utilizaron dispositivos de electrónica integrada denominado PIC (Programmable Interface Controller). Los PIC cumplen las mismas funciones que un PLC, siendo las más importantes tener memoria programable, interfaces con periféricos y procesamiento de datos. La diferencia radical entre un PLC y un PIC es que los PLC están estrictamente diseñados para operar en ambientes industriales, por lo tanto, están diseñados para que los sistemas se puedan expandir con facilidad y sean operativos aun en condiciones no normales. Debido a la especialización de los PLC, su costo es mayor que el de un PIC pero el beneficio es un sistema confiable y robusto.

Los grupos encargados del desarrollo de los proyectos estaban conformados por estudiantes de ingeniería química e ingeniería electrónica. Cada integrante cumple una función distinta dentro el grupo. La función de los Ing. Químicos es conocer el proceso, definir las variables a medir y asesorar a los ingenieros electrónicos durante el proceso de adquisición de sensores y actuadores. La función del ingeniero electrónico es la automatización del sistema. La automatización del sistema comprende varias etapas, entre las cuales podemos mencionar adquisición del equipo de medición y actuadores, dimensionamiento del PLC, conexión eléctrica del sistema, suministrar la potencia que requiere el sistema, programación de PLC y HMI.

## V. Delimitación e impacto del tema

Este trabajo de graduación comprende la automatización de la planta de producción de biodiésel ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la UVG rediseñada por dos estudiantes de Ingeniería Química. Se utilizó equipo electrónico industrial para la automatización de este sistema debido a su robustez, fiabilidad y facilidad de interconexión y expansión.

Este trabajo de graduación contempla la selección de sensores de pH, conductividad, temperatura, presión, humedad, de nivel continuo y nivel puntual. También requiere actuadores como bombas, válvulas y motores. Todo este equipo debe ser controlado por un PLC y el código será desarrollado basándose en la secuencia de pasos definidos por los Ing. Químicos y así producir biodiésel y glicerina. Se debe realizar la alimentación eléctrica para proveer al sistema de la energía eléctrica que demanda. El sistema será representado digitalmente utilizando un HMI. Por medio del HMI desarrollado el operador podrá monitorear el proceso en ejecución, así también podrá manipular los actuadores según se crea conveniente y responder a emergencias notificadas por el sistema. Por último, el proceso de automatización contempla la calibración de todos los sensores en cuestión para garantizar las mediciones correctas.

Como consecuencia de la automatización se obtendrá una reducción de errores en el proceso, reducción en la cantidad de subproductos y reprocesos, un mejor aprovechamiento de la materia prima, reducción de costos de operación y una mejor calidad en los productos obtenidos. En general se concluye que la eficiencia del proceso incrementa. Adicionalmente se pretende conseguir un objetivo ambiental importante: no sólo controlar y reducir el volumen de aceite vegetal usado que se desecha, sino generar mediante su tratamiento dos productos de alto valor añadido, el biodiésel como generador de energía y la glicerina para usos cosméticos.

## VI. Diseño

### Paso No. 1: Selección de los sensores

Actualmente existe una gran cantidad de opciones de sensores en el mercado de automatización. Todas estas opciones difieren en el material utilizado para su fabricación, tamaño, costo, exactitud, precisión, robustez, etc. Para encontrar los sensores que se adaptan al sistema en cuestión se consultó a los Ingenieros Químicos datos del ambiente en el que deben operar los dispositivos.

Este análisis se debe realizar para cada sensor a adquirir y concentrar toda la información en Tablas para presentarla al proveedor del equipo de instrumentación. En la Tabla 1 se muestra la información recaudada para cada válvula. En esta Tabla se detalla información como el material utilizado para fabricar el cuerpo de la válvula, materia del asiento, conexión al proceso, la temperatura máxima, la presión a la que debería funcionar, la contrapresión que debería soportar y la concentración de los químicos con los que estarán en contacto. La resistencia de cada material al químico con el que estaría en contacto fue corroborada.

Tabla 1: Información sobre el ambiente

	aceite vegetal o mineral	Metanol	Hidróxido de potasio KOH
Cuerpo	Inoxidable	Inoxidable o Bronce	Inoxidable
Asiento	Teflón	Teflón o Buna	Teflón
Conexión NPT	1/2"	1/2"	1/2"
Cantidad	3	1	1
Temperatura	100	20	40
Presión	---	<20	<20
Contrapresión	50	50	50
% Concentración	---	96%	1 molar

Este método de comunicación con el proveedor resultó ser el más eficiente y seguro para obtener las mejores opciones de instrumentación industrial.

Para determinar la mejor opción al mejor precio, se envió la información recabada de cada sensor a distintos proveedores. Las propuestas de los proveedores se compararon para determinar el costo más bajo. En la Tabla 2 se observa claramente la comparación en costo de los distintos proveedores de analizadores de conductividad.

Tabla 2: Comparación de ofertas de un mismo sensor de distintos proveedores

		Marca	Precio	Cantidad	Total
Reset S.A.	Analizador	ABB	\$ 1,442.00	2	\$ 3,434.00
	Celda conductiva	ABB	\$ 275.00	2	
Intek	Analizador	Endress + Hauser	\$ 2,660.00	2	\$ 11,494.00
	Celda inductiva	Endress + Hauser	\$ 3,087.00	2	
DiLab	Analizador	Hach	\$ 2,462.50	1	\$ 5,036.50
	Celda	Hach	\$ 1,287.00	2	
Proyect - Aire, S.A	Analizador	Prominent	\$ 1,901.64	2	\$ 7,920.96
	Celda Inductiva	Prominent	\$ 2,058.84	2	

### Paso No. 2: Dimensionamiento de la capacidad del PLC

Para realizar el dimensionamiento adecuado del PLC se realizó un inventario que incluye todos los componentes que integran el sistema. Se decidió trabajar con la marca Allen-Bradley por las razones que se presentan en la sección de discusión. Se utilizó el manual de datos técnicos y manual de usuario de cada modelo de PLC para determinar cuál era la opción que se ajustaba al proceso.

La marca Allen-Bradley tiene varios modelos de PLC. Los de interés son los controladores de lógica programable MicroLogix 1000, 1100, 1200, 1400 y 1500. Para determinar la opción más adecuada para la aplicación, se investigaron las características de cada modelo. La característica determinante es la capacidad de manejo del total de señales necesarias para controlar la planta y que estas sean controladas por módulos de expansión del PLC. Los módulos de expansión necesarios se listan en la Tabla 8. Se inició por el MicroLogix 1000 y finalizando con el primero que satisfacía los requisitos siendo este la serie MicroLogix 1200. Los modelos MicroLogix 1000 y 1100 fueron descartados porque no manejan la cantidad de señales necesarias para el control del proceso.

### Paso No. 3: Suministrar al sistema la corriente demandada

Una vez definido el PLC y los sensores, hay que suministrar la corriente que el sistema requiere. Para esto se realiza un inventario detallando cuanta corriente consume cada componente del sistema. A partir de este dato, se debe dimensionar todos los elementos que componen la instalación eléctrica. Es importante mencionar que el sistema necesita una conexión trifásica 220 V AC entre cada fase.

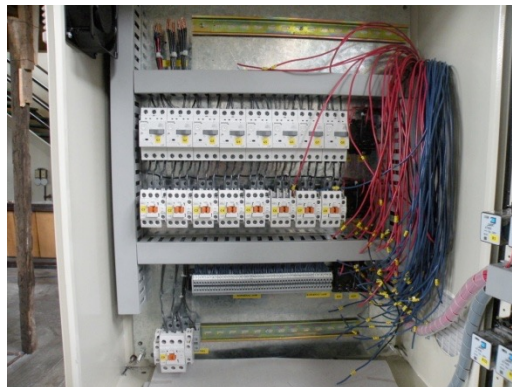
La potencia requerida se tomó de un tablero cercano a la planta de producción de biodiésel. Para realizar la conexión eléctrica se necesitó:

- Flipon trifásico 100 A
- Un agarrador
- Tubo plástico para alambrado de 1”
- Codos para tubo plástico de 1”
- Abrazaderas para tubo plástico de 1”
- Tornillos busca rosca
- Tarugos
- Juego de espiga y tomacorriente
- Cable AWG 6
- Cable TSJ AWG 6
- Broca 3/4”
- Martillo
- Desarmador

El dimensionamiento del cable se realizó con la Tabla 23 en la sección de anexos. Utilizando esta Tabla se obtiene el calibre del cable dada la corriente total que debe conducir. El tubo se dimensionó para que pueda contener 4 cables AWG 6. El juego de espiga y tomacorriente se dimensiono para soportar 75 Amperios, que es la capacidad de conducción del cable AWG.

Para realizar la instalación eléctrica adecuada, es necesario adquirir un gabinete. Este gabinete contendrá el PLC y sus módulos de expansión, guardamotores, contactores, relés, seccionador, fuente de 24 V, bornera, un flipón y un botón tipo hongo para emergencia. Todos los elementos mencionados anteriormente estarán montados sobre riel DIN, en la Figura 23 se puede observar el posicionamiento sugerido de los componentes dentro el gabinete.

Figura 11: Posicionamiento de los elementos dentro el gabinete



#### **Paso No. 4: Calibración de instrumentos de medición**

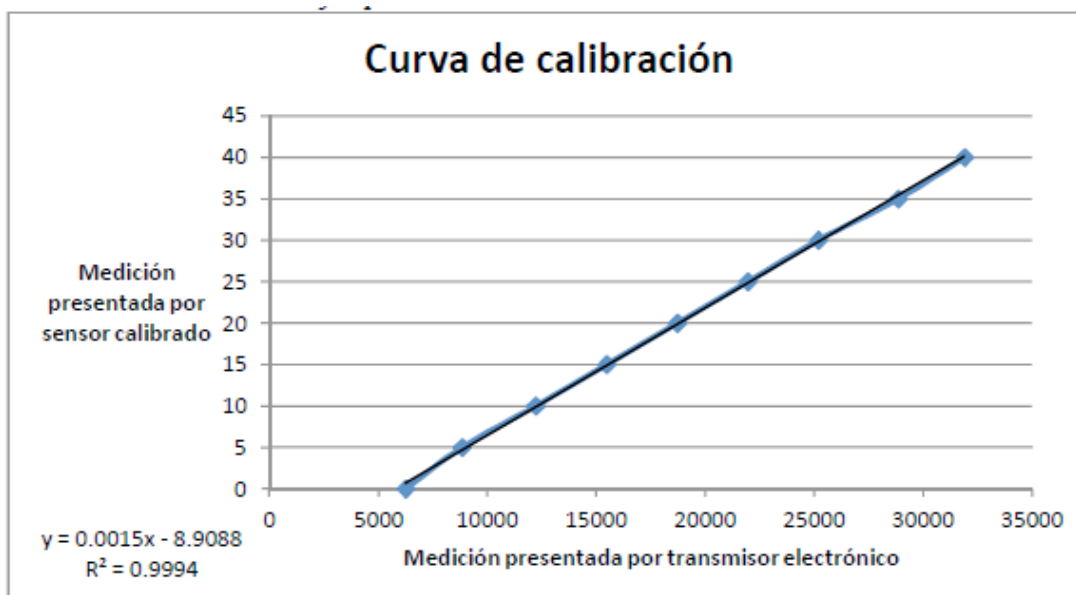
La idea básica para calibrar la instrumentación electrónica es medir la variable de interés con el transmisor electrónico y con un instrumento de medición calibrado. Para

calibrar correctamente el transmisor eléctrico se debe calcular una función tal que mapee los datos transmitidos por el transmisor electrónico hacia los datos que indica el sensor calibrado.

Figura 12: Instalación de manómetro y transmisor de presión



Figura 13: Ejemplo de calibración de transmisores electrónicos



En este proyecto se calibraron RTD, transmisores de presión, analizadores de conductividad, analizador de pH, analizadores de humedad, transmisor de nivel continuo y puntual. Para la calibración de los RTD, se utilizó un termómetro como instrumento de

referencia. Para los transmisores de presión se utilizaron manómetros y para los analizadores se utilizaron soluciones estándar o “buffers”. La calibración de los transmisores de nivel se realizó utilizando una probeta y así tener un volumen de líquido preciso.

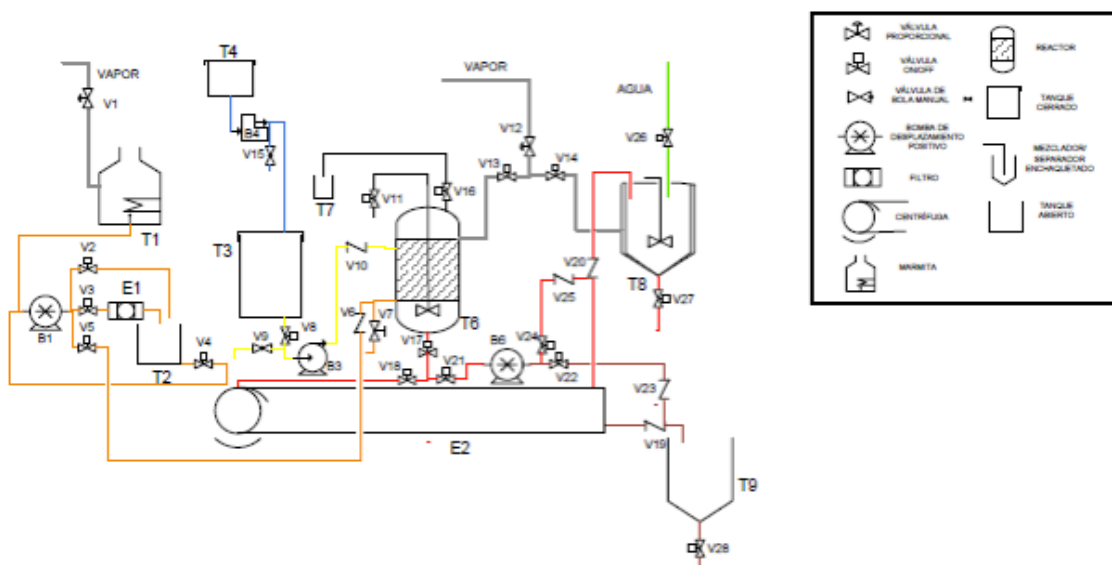
### **Paso No. 5: Programación PLC y HMI**

El desarrollo del código para el PLC se realizó por medio del paquete RSLogix 500 y con la sección de ayuda. Adicionalmente se utilizó el manual de usuario y el “MicroLogix™ 1200 and MicroLogix 1500 Programmable Controllers; Bulletin 1762 and 1764; Instruction Set Reference Manual” en el cual se detallan todas las instrucciones de programación para el MicroLogix 1200. El material de apoyo utilizado para el desarrollo del HMI fue únicamente la sección de “Help” contenida en el programa.

## VII. Resultados obtenidos

El sistema que se observa en la Figura 12 es la planta rediseñada para la producción de biodiésel en la UVG.

Figura 14: Sistema de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala




En función del diagrama del proceso, Figura 12, y con el asesoramiento de los ingenieros químicos se adquirieron los siguientes sensores:

### A. Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura adquiridos son tipo RTD con su transmisor 4 – 20 mA incorporado. El largo del vástago es de 18” debido a que el sensor debe estar completamente sumergido en el líquido al que se le desea medir la temperatura. El material es resistente a los químicos con los que estará en contacto. En conjunto con el Ingeniero Químico se acoplaron los sensores al sistema. En la Tabla 3 se presentan las características del sensor de temperatura adquirido.


Tabla 3: Descripción del sensor de temperatura

Marca	Eurotherm-Barber Coleman	Imagen
Alimentación	14-53 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<input type="checkbox"/> Vástago de 18" de largo total. <input type="checkbox"/> Precisión de 0.10%. <input type="checkbox"/> Temperatura máxima 260° C. <input type="checkbox"/> Diámetro de vástago de 0.250", material de 316SS. <input type="checkbox"/> Conexión al proceso de ½". <input type="checkbox"/> Cabeza protectora de conexiones de aluminio a prueba de explosiones. <input type="checkbox"/> Incluye transmisor de temperatura dentro de la cabeza de protección.	

## B. Transmisor de presión

Los transmisores de presión adquiridos son de la marca TEL-TRU. Estos, al igual que toda la instrumentación adquirida, se alimentará con 24 V DC. El housing es de acero inoxidable con conexión al proceso de ½ NPT. La instalación de este sensor es simple puesto que solo es necesario enroscarlo a la tubería de vapor. La Tabla 4 contiene las características del transmisor de presión.

Tabla 4: Características de los transmisores de presión

Marca	TEL-TRU	Imagen
Alimentación	10 – 30 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<input type="checkbox"/> Rangos de presión 0-33 PSI <input type="checkbox"/> Precisión de 0.15% <input type="checkbox"/> Housing de acero inoxidable <input type="checkbox"/> Span ajustable <input type="checkbox"/> Conexión al proceso de ½" NPT macho, material de 316SS	

### C. Analizador de humedad

Actualmente la industria no ofrece varias opciones para este tipo de analizadores. Esto es porque es un analizador realmente especializado. Este tipo de medición se utiliza con frecuencia en la industria de fabricación de transformadores eléctricos. El sensor VAISALA MMT162 resultó ser la mejor opción cotizada entre las pocas que se encontraron. Es un sensor con muy buena precisión, resistente a los químicos con lo que estará en contacto, pero se debe tener cuidado con la temperatura máxima que puede soportar. La Tabla 5 resume las características del analizador vaisala.


Tabla 5: Características del medidor de humedad VAISALA

Marca	VAISALA MMT162	Imagen
Alimentación	10 – 30 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<input type="checkbox"/> Medición de humedad en unidades AW. <input type="checkbox"/> Rangos de temperatura: -20 a 80 °C. <input type="checkbox"/> Housing de transmisor: plastic PPS <input type="checkbox"/> Conexión al proceso de ½" roscada	

### D. Analizador y transmisor de conductividad y pH

Es importante notar que este sensor es de tipo modular. Es decir, para obtener la medición de la conductividad o pH de una sustancia, es necesario comprar la celda y el analizador. La celda está en contacto con el medio y es la encargada de transmitir una señal eléctrica en función del valor del pH o conductividad medida en la sustancia. El analizador recibe esta señal y la procesa. El resultado de la conversión es transmitido al PLC en el rango 4-20 mA. La marca ABB tiene muy buen prestigio en lo que concierne a equipo de medición. Entre las opciones de interés que presenta este analizador, es la calibración directa del sensor, contraseña de protección en el analizador y lo más sobresaliente es la capacidad de indicar si la celda está sucia y necesita que los electrodos sean limpiados para proporcionar la medición correcta. En la tabla 6 se presentan las características del analizador adquirido.

Tabla 6: Descripción general del analizador y transmisor de conductividad y pH

Marca	ABB	Imagen
Alimentación	14-53 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Transmisor para sensores de conductividad de 4 electrodos.</li> <li><input type="checkbox"/> Auto diagnóstico de celda y transmisor</li> <li><input type="checkbox"/> Atenuación de señal ajustable</li> <li><input type="checkbox"/> Amplio display con indicación de conductividad y una segunda señal programable en temperatura, señal de salida o señal de entrada</li> <li><input type="checkbox"/> Housing de Aluminio</li> <li><input type="checkbox"/> Protección Nema 4X E IP65</li> </ul>	


### E. Celda de conductividad

La celda de conductividad es la encargada de medir la variable de interés en el fluido, en este caso la conductividad en el aceite. Es importante mencionar que el material de fabricación de la celda es de Ryton, un material resistente y no reactivo con el aceite vegetal o mineral. Además, los contactos sumergidos en el fluido son de acero inoxidable por lo que no habrá problema alguno con el sensor siempre y cuando el fluido no supere los 82° C. La Tabla 7 contiene la descripción completa de la celda de conductividad.

Tabla 7: Descripción general de la celda de conductividad

Marca	ABB Modelo TB454	Imagen
Alimentación	Alimentado desde el analizador	
Salida	4-20 mA	


## Continuación tabla 7

<p>Características</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Sensor de 4 electrodos para rangos de conductividad baja/alta.</li> <li><input type="checkbox"/> Compensación de temperatura integrada</li> <li><input type="checkbox"/> Rangos de conductividad: 0 – 2,000,000 <math>\mu</math> S/cm</li> <li><input type="checkbox"/> Sensor sumergible con conexión al proceso de 1" NPT</li> </ul> <p>Material del sensor de Ryton.</p>	
------------------------	---	--

### F. Celda de pH

La celda de pH es muy similar a la celda de conductividad. Los materiales de fabricación del cuerpo son los mismos solo que la variable de medición es el pH del líquido. En la Tabla 8 se pueden ver las características de la celda.


Tabla 8: Descripción general de la celda de conductividad

Marca	ABB Modelo TX551	Imagen
Alimentación	Alimentado desde el analizador	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Compensación de temperatura integrada.</li> <li><input type="checkbox"/> Sensor sumergible con conexión al proceso de 1" NPT.</li> <li><input type="checkbox"/> Material del sensor de Ryton.</li> </ul>	

## G. Medidor de nivel capacitivo

Este sensor realiza la medición del nivel del tanque utilizando la capacitancia que se forma entre el vástago del sensor y las paredes de tanque. Es por este motivo que el tanque debe ser de acero inoxidable o algún metal. El largo del vástago se determinó con la asesoría del Ingeniero Químico. La resistencia a los químicos con lo que se estará en contacto también fue revisada. En la Tabla 9 se resumen las características del transmisor de nivel capacitivo.

Tabla 9: Descripción del transmisor de nivel capacitivo

Marca	Dwyer Instruments	Imagen
Alimentación	12 – 35 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<input type="checkbox"/> Largo de vástago 24” para aceite filtrado y 29” para tanque de etanol.	
	<input type="checkbox"/> Precisión de $\pm 0.25\%$	
	<input type="checkbox"/> Span ajustable	
	<input type="checkbox"/> Conexión al proceso de $\frac{3}{4}$ ” NPT macho, material de 316SS	
	<input type="checkbox"/> Tango de temperatura -40 a 121° C	
	<input type="checkbox"/> Presión máxima 100 PSI	


## H. Medidor de nivel puntual

Este sensor utiliza nuevamente el concepto de capacitancia para medir el nivel en un tanque. La idea es que existe un valor de conductividad entre la punta del sensor y las paredes del tanque. Este valor se ve afectado por la presencia del líquido que es a su vez perceptible para el sensor. Así es como este sensor determina el nivel del tanque. En la Tabla 10 se muestran las características del sensor.

Tabla 10: Descripción del medidor de nivel puntual

Marca	Dwyer Instruments	Imagen
Alimentación	12 – 240 VAC/DC	
Salida	4-20 mA	


Continuación tabla 10

Características	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Largo de vástago 18".</li> <li><input type="checkbox"/> Rangos de temperatura - 40 - 121°C.</li> <li><input type="checkbox"/> Presión máxima 365 PSI.</li> <li><input type="checkbox"/> Tipo de Switch: DPDT</li> <li><input type="checkbox"/> Material del vástago: 316SS, cubierto de PVDF.</li> </ul> <p>Tiempo de respuesta: 0.2 Segundos, ajustable en un rango de 0-60 segundos.</p>	
-----------------	--	---

## I. Válvulas proporcionales

Generalmente, las válvulas proporcionales son el actuador que regula el comportamiento de la temperatura en tanques alimentados con vapor. Las válvulas adquiridas son electroneumáticas. Esto quiere decir que necesitan de aire comprimido para su funcionamiento. Es un factor elemental a considerar en la instalación del equipo. La Tabla 11 contiene la información de las válvulas proporcionales adquiridas para realizar esta tarea.


Tabla 11: Características de la válvula proporcional adquirida

Marca	ASCO	Imagen
Alimentación	24 VDC	
Salida	4-20 mA	
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Control de flujo proporcional a la señal de mando.</li> <li><input type="checkbox"/> Normalmente cerrada, esta se cierra cuando hay pérdida de energía.</li> <li><input type="checkbox"/> Ensamblada en la fábrica.</li> <li><input type="checkbox"/> Linealidad 5%.</li> <li><input type="checkbox"/> Histéresis &lt; 1%</li> <li><input type="checkbox"/> Presión máxima permitida 240 psi.</li> </ul>	

## J. Válvulas solenoides

Estas se encargarán de definir la dirección por la cual deben fluir los líquidos. Las válvulas adquiridas son solenoides. La adquisición de estas válvulas es una tarea laboriosa, puesto que se debe corroborar que el material del cuerpo de la válvula y los empaques sean resistentes a los químicos con lo que estarán en contacto. También debe corroborarse que soportaran las presiones que se generaran durante el proceso. La Tabla 12 contiene las características de las válvulas adquiridas.

Tabla 12: Características generales de las válvulas solenoides

Marca	ASCO	Imagen
Alimentación	120 VAC	
Salida	N/A	
Características	<input type="checkbox"/> Cuerpo de bronce <input type="checkbox"/> Asiento de buna <input type="checkbox"/> Conexión 1/2" NPT <input type="checkbox"/> Temp. Max. 82° C <input type="checkbox"/> Presión 0-125 psi	

\*Las características de las válvulas cambian dependiendo el fluido con el que estarán en contacto.

## K. Dimensionamiento del PLC

En la Tabla 13 se detalla que actuadores son catalogados como señales de salida y la cantidad de señales que se necesitan. La Tabla 14 muestra las señales digitales de entrada siendo estas 2 en total. La Tabla 15 muestra las señales analógicas de entrada. Estas señales están en un rango de 4 - 20 mA e indican la medición del sensor. La Tabla 16 muestra que únicamente se necesita una señal analógica de salida y es precisamente para posicionar la válvula proporcional.

Tabla 13: Inventario de señales digitales de salida

Señales digitales (Salida)	Cantidad
Bomba dosificadora	1
Bomba de desplazamiento positivo	2
Motor mezclador tanque biodiésel	1
Válvulas	21
Alarma de emergencia visual	1
Señal visual operación del sistema	1
Señal visual de advertencia	1
Total	31

Tabla 14: Inventario de señales digitales de entrada.

Señales digitales (Entrada)	Cantidad
Sensor nivel bajo	1
Stop emergencia	1

Tabla 15: Inventario de señales analógicas de entrada

Señales analógicas (Entrada)	Cantidad
Sensor de conductividad	3
Sensor de temperatura	3
Sensor de humedad	2
Presión	3
Analizadores pH	2
Nivel Continuo	2
Total	15

Tabla 16: Inventario de señales analógicas de salida

Señales analógicas (Salida)	Cantidad
Válvula proporcional	1
Total	1

En la Tabla A se observan los módulos necesarios para el manejo de las señales digitales y analógicas. Para el manejo de las señales digitales de salida se necesita el módulo 1762-OB32T, el módulo 1762-IF4 se utilizará para el manejo de las señales analógicas de entrada y por último se necesita el módulo 1762-OF4 para las señales digitales de salida. En la Tabla 17 se toma en cuenta el consumo de cada módulo para determinar la corriente total que debe entregar el PLC.

Tabla 17: Carga de fuente de alimentación de MicroLogix 1200 - Cálculo de corriente del sistema

Número de catálogo		Especificaciones de consumo de corriente de bus		Corriente calculada para el sistema	
		a 5 VCC (mA)	a 24 VCC (mA)	a 5 VCC (mA)	a 24 VCC (mA)
1761-NET-AIC <sup>(1)</sup>		0	120 <sup>(1)</sup>	0	0
1761-NET-ENI <sup>(1)</sup>		0	100 <sup>(1)</sup>	0	0
2707-MVH232 o 2737-MVP232 <sup>(1)</sup>		0	80 <sup>(1)</sup>	0	0
Número de catálogo	N = Número de módulos (6 máximo)	A	B	n x A	n x B
1762 - IF4	4	40	50	160	200
1762 - OB32T	1	175	0	175	0

Continuación tabla 17

1762 – OF4	1	40	165	40	165
<b>Total de módulos</b>	6	<b>Corriente total calculada:</b>			365

(1) La corriente para el AIC + puede suministrarla el puerto de comunicaciones del controlador, o una fuente de 24 VCC externa. No se consume corriente desde el controlador cuando se usa una fuente externa. La corriente para una interfase de operador 2707-MVH232 o 2707-MVP232 MicroViews suministra mediante el puerto de comunicación del controlador, si está conectada directamente.

En la Tabla 18 se observa que tanto el PLC 1762-L40BXB y el PLC 1762-L40AWA es capaz de suministrar la energía requerida por los módulos.

Tabla 18: Corriente de carga máxima del MicroLogix 1200

Numero de catalogo	Corriente de carga	de 5 VCC	24 VCC	Corriente de detector de 24 VCC de usuario
1762-L24AWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
1762-L24BXB	<b>Límite máximo</b>	<b>400 mA</b>	<b>350 mA</b>	
1762-L24BWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
	<b>Límite máximo</b>	<b>400 mA</b>	<b>350 mA</b>	<b>250 mA</b>
1762-L40AWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
1762-L40BXB	<b>Límite máximo</b>	<b>600 mA</b>	<b>500 mA</b>	
1762-L40BWA	Valor calculado	375 mA	365 mA	n/a
	<b>Límite máximo</b>	<b>600 mA</b>	<b>500 mA</b>	<b>400 mA</b>

En la Tabla 19 se comprueba por medio de cálculo de potencia que la potencia requerida por los módulos no excede la potencia máxima de alimentación del PLC.

Tabla 19: Alimentación de carga máxima del MicroLogix 1200

Número de catálogo	Consumo de alimentación de 5V cálculo en Watts			Consumo de alimentación de 24V cálculo de Watts			Calculo de Watts (suma 5V y 24 V)	Límite Max. de alimentación
1762-L40BXB	375 mA	x 5 V	1.875 = W	365 mA	x 24V	8.76 = W	10.64 W	15 W

Además, el PLC MicroLogix 1200 tiene:

- Memoria de 6 K.
- Sistema operativo flash actualizable en el campo.
- Opciones de E/S de expansión de alto rendimiento (hasta 6 módulos, dependiendo de la capacidad de alimentación eléctrica)
- Opciones de comunicaciones avanzadas, incluyendo mensajes entre dispositivos similares y redes SCADA/RTU, DH-485, DeviceNet y Ethernet.
- Reloj en tiempo real opcional
- Módulo de memoria opcional
- Contador de alta velocidad de 20 kHz con 8 modos de operación
- Una salida de alta velocidad que puede configurarse para salida PTO (salida de tren de pulsos) de 20 kHz o para salida PWM (ancho de pulso modulado)
- Matemática de enteros con signo de 32 bits
- Archivo de datos de punto flotante (coma flotante)
- Capacidades PID incorporadas
- Temporizadores de alta resolución de 1 ms
- Certificaciones reglamentarias para uso en todo el mundo (CE, C-Tick, UL, c-UL, incluyendo lugares peligrosos Clase I División 2)

El controlador MicroLogix 1200 utiliza el software de programación RSLogix 500 de Rockwell Software y comparte un conjunto de instrucciones comunes con las familias de controladores MicroLogix 1000, MicroLogix 1500 y SLC.

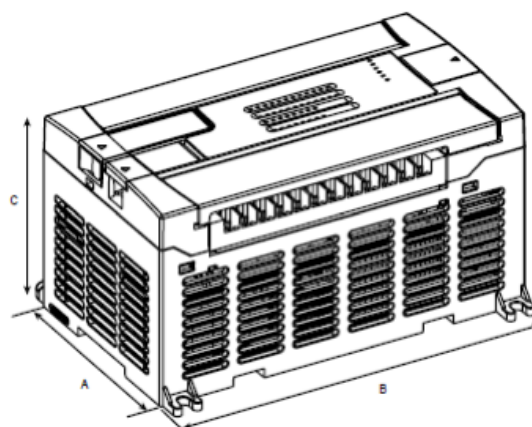
Adicionalmente a las señales que manejarán los módulos, el PLC puede manejar directamente las señales que se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Señales incorporadas al módulo de PLC

Alimentación de línea	Entradas	Salidas	E/S de alta velocidad	Número de catálogo
24 VCC	(20) estándar 24 VCC (4) rápidas de 24 VCC	(8) relé (7) estándar 24 VCC FET (1) rápida de 24 VCC FET	(4) entradas de 20 kHz (1) salida de 20 kHz	1762-L40BXB

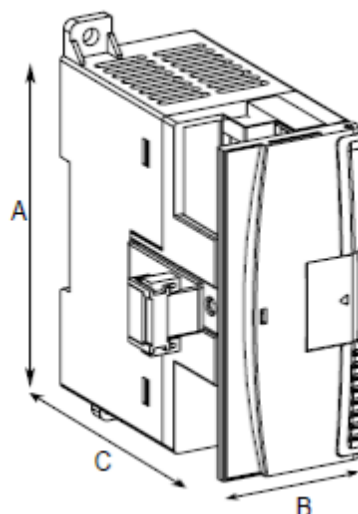
Para ver más datos técnicos consultar el “Manual de datos técnicos del ML1200” en anexos.

Figura 15: Dibujo del controlador MicroLogix 1200



1762-L40AWA, 1762-L40BWA, 1762-L40BXB

Figura 16: Dibujo de los módulos de expansión para el MicroLogix 1200



## L. Inventario de consumo

Los datos para el inventario de consumo de potencia de cada elemento, mostrado en la Tabla 21, se pueden obtener consultando el manual de usuario de cada elemento o bien verificando si el sensor contiene una placa con información eléctrica. En caso de los motores esta placa está siempre presente y visible al operador.

Tabla 21: Inventario de consumo de potencia de todos los elementos del sistema

Señales digitales (Salida)	Cantidad	Voltaje (Ac)	Potencia (Hp)	Corriente (A)	Conexión
Centrífuga	1	220	1.5	5.30	Trifásico
Bomba dosificadora	1	115	0.1	6	Monofásico
Bomba 1 de aceite caliente	1	220	1.5	5.30	Trifásico
Bomba 2 de salida de reactor	1	220	1.5	6.00	Trifásico
Bomba 3 de metanol	1	220	1.5	5.30	Trifásico
Agitador biodiésel	1	220	0.25	5.60	Monofásico
Válvulas Solenoides	16	120	1536	12.8	
Alarma visual	1	120	0	0.5	
Señal visual operación del sistema	1	120	0	0.5	
Fuente 120 VAC con salida 24 VDC	1	120		6	
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>NA</b>	<b>1542.35</b>	<b>53.30</b>	

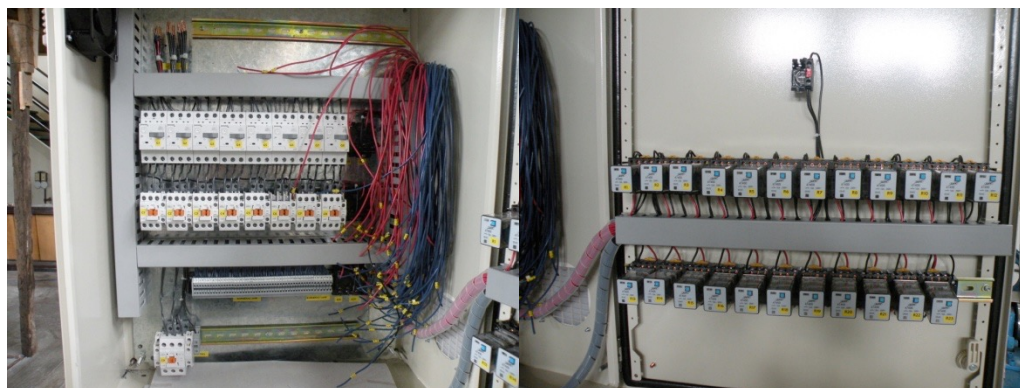
Una vez se tiene el consumo total del sistema, corresponde determinar el equipo de protección en caso de cortocircuito o sobrevoltaje y dimensionar el cable acorde a la corriente que debe conducir.

### **M. Equipo protección y cableado eléctrico**

Los motores se protegerán con los guardamotores. Estos se compraron acorde a la potencia de cada motor. La función de estos es la de proteger el sistema en caso de cortocircuito o un sobrevoltaje producido por la falla de un motor. Adicionalmente se adquirió un contactor que es el responsable de cerrar o abrir el circuito de alimentación del motor dependiendo de la señal que reciba del PLC.

Para realizar la instalación eléctrica adecuada, se decidió adquirir un gabinete 100x60x30. Este gabinete contendrá el PLC y sus módulos de expansión, guardamotores, contactores, relés, seccionador, fuente de 24 V, borneras, un flipon de 50 Amperios para una línea de 120 V y un botón tipo hongo para emergencia. Todos los elementos mencionados anteriormente estarán montados sobre riel DIN a excepción del botón de emergencia que estará incrustado en el panel.

Figura 17: Ubicación de los componentes dentro el gabinete



La potencia requerida se tomará de un tablero cercano a la planta de producción de biodiésel. Para realizar la conexión eléctrica se necesita:

- Flipon trifásico 100 A
- Un agarrador
- Tubo plástico para alambrado de 1"
- Codos para tubo plástico de 1"
- Abrazaderas para tubo plástico de 1"
- Tornillos busca rosca
- Tarugos
- Juego de espiga y tomacorriente para 63 amperios
- Cable AWG 6
- Cable TSJ AWG 6
- Broca 3/4"
- Martillo
- Desarmador

Como se mencionó anteriormente, el sistema demanda una corriente máxima de 53.3 Amperios. Estos 53.3 amperios pasarán a través del flipon con capacidad de 100 A, Cable AWG 6 con capacidad para conducir 75 Amperios, un juego de espiga y tomacorriente de 63 Amperios, cable TSJ AWG 6 para finalizar en el seccionador adentro del gabinete. Las capacidades de amperaje para los cables se pueden ver en la Tabla 310.16 en anexos y en la Tabla 22 se observa el calibre del cable utilizado para cablear los diferentes componentes.

Tabla 22: Muestra los calibres de cables a utilizar para cada equipo

Componente	Calibre de cable utilizado	Capacidad de amperios	Razón
Guardamotor + contactor + motor	AWG 12	30	Debe soportar los picos de corriente producidos al arranque de motores
Relés a Válvulas	AWG 22	0.92	La demanda máxima es aproximadamente 0.6 Amperios
Cableado para PLC, activación de relés y contactores y sensores.	AWG 22	0.92	Este equipo no requiere grandes cantidades de corriente.

Una vez se tiene la potencia requerida, es cuestión de cablear como se indica en los diagramas eléctricos en la sección de anexos.

Una vez el equipo eléctrico este cableado, es momento de desarrollar el programa que controlara el proceso.

## N. Programación de PLC

El paquete de programación de lógica de escalera RSLogix 500 se utilizó para desarrollar el código. Para realizar el código, se cuenta con un diagrama de flujo del proceso completo. Este diagrama se puede observar en la sección de anexos. Con base en este diagrama se programó la lógica condicional del PLC. Con la ayuda de este diagrama se puede determinar qué lazos de control son necesarios. En total se identifican dos lazos de control que son:

- Temperatura en el reactor: La temperatura en el reactor debe mantenerse constante por un tiempo estimado para así garantizar la reacción de todos los químicos.
- Temperatura en el tanque de tratamiento de biodiésel: La temperatura debe mantenerse constante para garantizar la buena calidad del biodiésel.

La idea principal para el desarrollo del programa del PLC fue utilizar variables de estado para cada componente. Las variables de estado utilizadas fueron señal de retorno, activación manual, activación automática y permiso de operación. Para obtener un programa robusto y ordenado, se realizaron subrutinas dedicadas exclusivamente al control

de una variable de estado en particular, las rutinas desarrolladas se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23: Subrutinas desarrolladas

Rutinas desarrolladas	Función
MAIN	Rutina principal y llamado de subrutinas
TM_AUTO	Tratamiento de materia prima automáticamente
PB_AUTO	Producción de biodiésel automáticamente
DEC_AUTO	Proceso de decantación automático
LAV_AUTO	Lavado de biodiésel automático
GLICE_AUTO	Tratamiento de glicerina automático
TM_ENABLE	Permiso de activación para los componentes en tratamiento de materia prima
PB_ENABLE	Permiso de activación para los componentes en producción de biodiésel
DEC_ENABLE	Permiso de activación para los componentes en decantación
LAV_ENABLE	Permiso de activación para los componentes en lavado de biodiésel
GLICE_ENAB	Permiso de activación para los componentes en tratamiento de glicerina
POP_UPS	Activación de mensajes hacia el operador
CALCULOS	Ejecución de operaciones matemáticas para cálculo de cantidades de dosificación en función de la acidez del aceite.
SET_POINT	Determina el nivel mínimo que deben tener los tanque en función de la cantidad que se deben dosificar
VAR_TIEMPO	Determinación de tiempo variable para activación de bomba dosificadora
LECTURA_MO	Lectura y traslado de información leída hacia posiciones de memoria en el PLC.
SALIDAS	Activación de salidas de módulos
RETURN	Simulación de señal de retorno
STOP	Activación de señal de activación

En la sección de anexos se puede observar el código que contiene cada clase.

### **O. Desarrollo HMI**

El siguiente paso, una vez finalizado el código para el PLC corresponde programar el HMI. El HMI desarrollado representa todos los elementos que componen el sistema para la producción de biodiésel. En el HMI el operador puede visualizar el estado de motores y válvulas, así mismo puede cambiar su estado según convenga al proceso. Adicionalmente el operador podrá visualizar los valores adoptados por distintas variables del proceso, también puede vigilar el proceso de producción de biodiésel puesto que este se puede desarrollar automáticamente y en dado caso ocurra una falla, el operador lo podrá ver en la pantalla o bien se activara una señal visual de alerta. Se desarrollaron 6 pantallas para representar el sistema y estas son Pantalla de inicio y presentación de proyecto, configuración de proceso, tratamiento de materia prima, producción de Biodiésel, tratamiento de productos, integrantes del equipo de trabajo. El HMI desarrollado se puede observar en anexos.

El último paso, es asegurarse que los instrumentos de medición estén debidamente calibrados. Esto se logra utilizando químicos con características estándar, o bien comparando la medición con otros instrumentos calibrados adecuadamente. La calibración para cada sensor es distinta y la información de cómo hacerlo se obtiene en el manual del equipo.

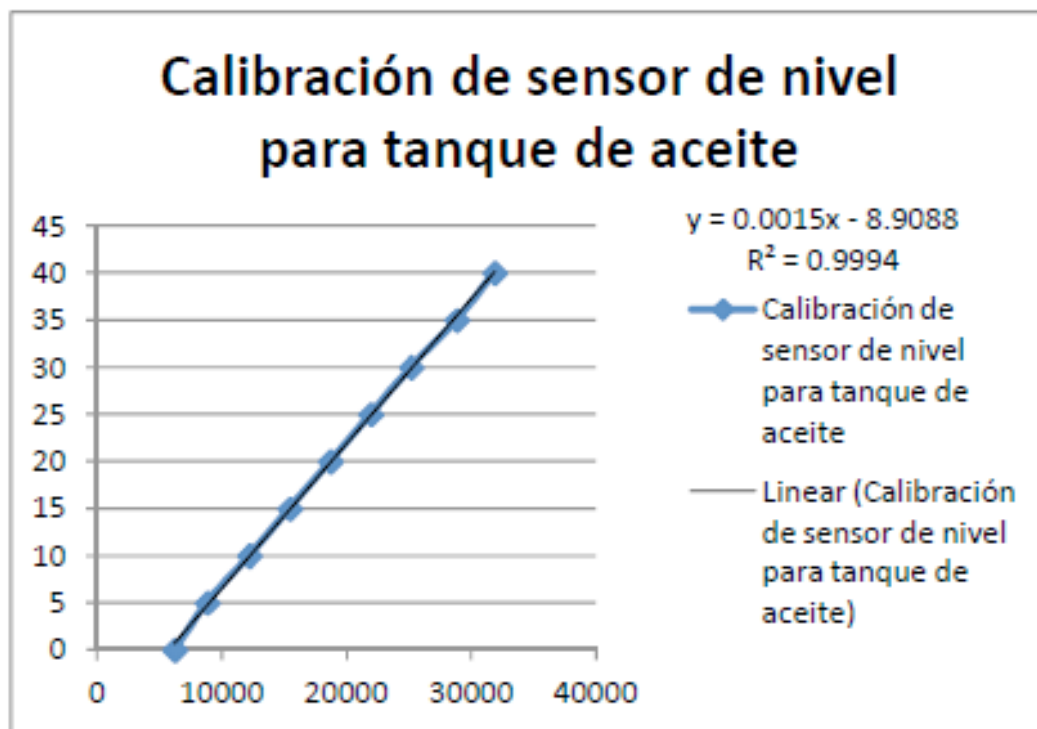
### **P. Calibración todo el equipo de medición**

- Calibración de sensor de nivel para tanque de aceite:

Ecuación de corrección ideal:  $0.00156 * x - 9.72897$

Ecuación de regresión lineal:  $0.0015 * x - 8.9088$

Figura 18 Calibración de sensor de nivel para tanque de aceite

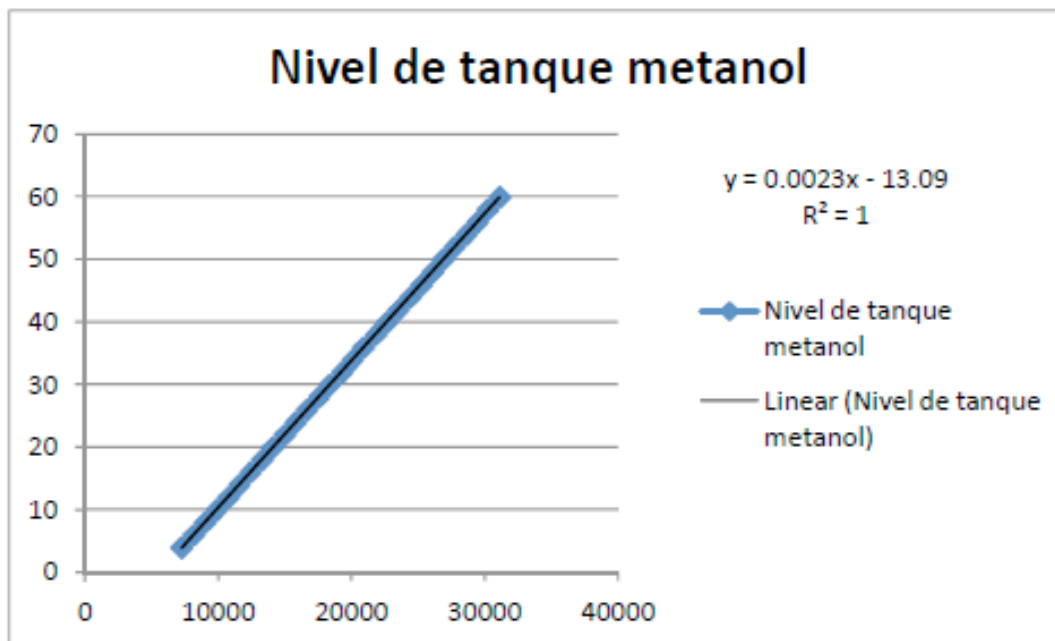


- Calibración sensor de nivel de tanque para metanol

Ecuación de corrección ideal:  $0.002347 * x - 12.9711$

Ecuación de regresión lineal:  $0.0023 * x - 13.09$

Figura 19: Calibración de sensor de nivel para tanque de metanol.

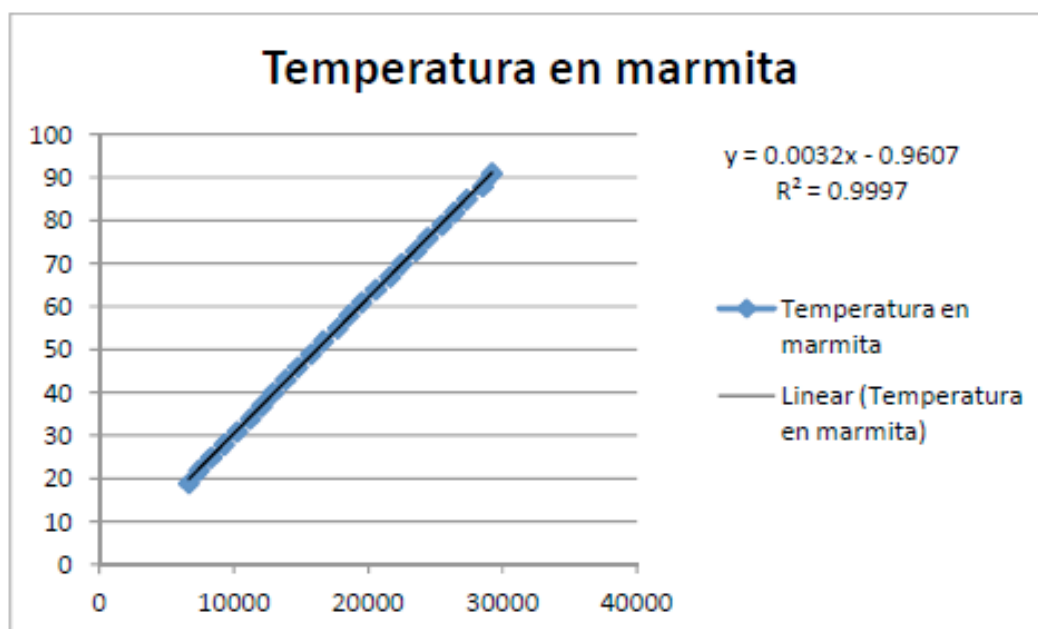


- Calibración de sensor de temperatura de marmita

Ecuación de corrección ideal:  $0.00319 \cdot x - 2.1183$

Ecuación de regresión lineal:  $0.0032 \cdot x - 0.9607$

Figura 18: Calibración de transmisor de temperatura para marmita

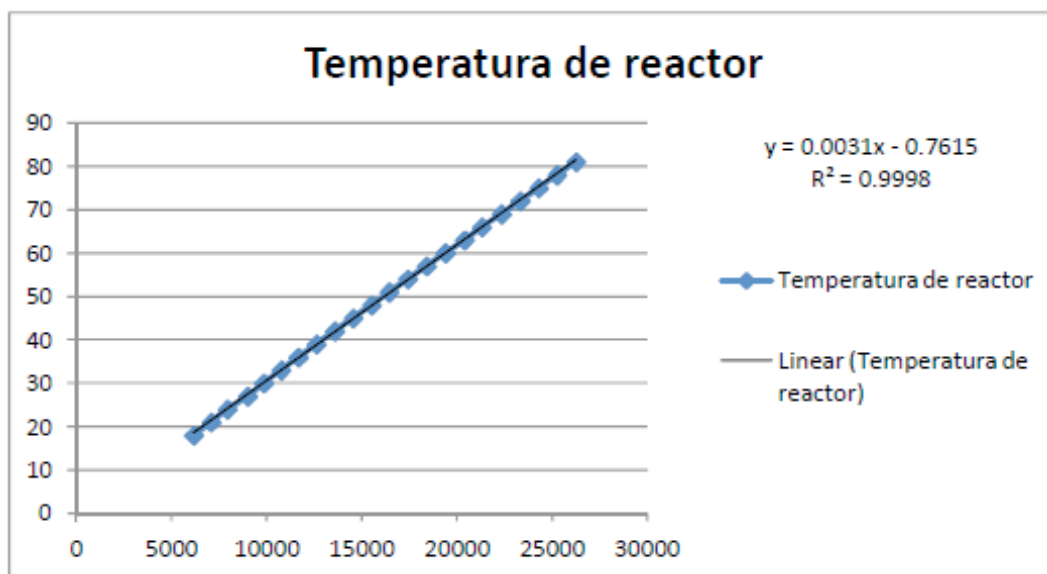


- Calibración de sensor de temperatura de reactor

Ecuación de corrección ideal:  $0.003139*x-1.33632$

Ecuación de regresión lineal:  $0.0031*x-0.7615$

Figura 20: Calibración de transmisor de temperatura para reactor

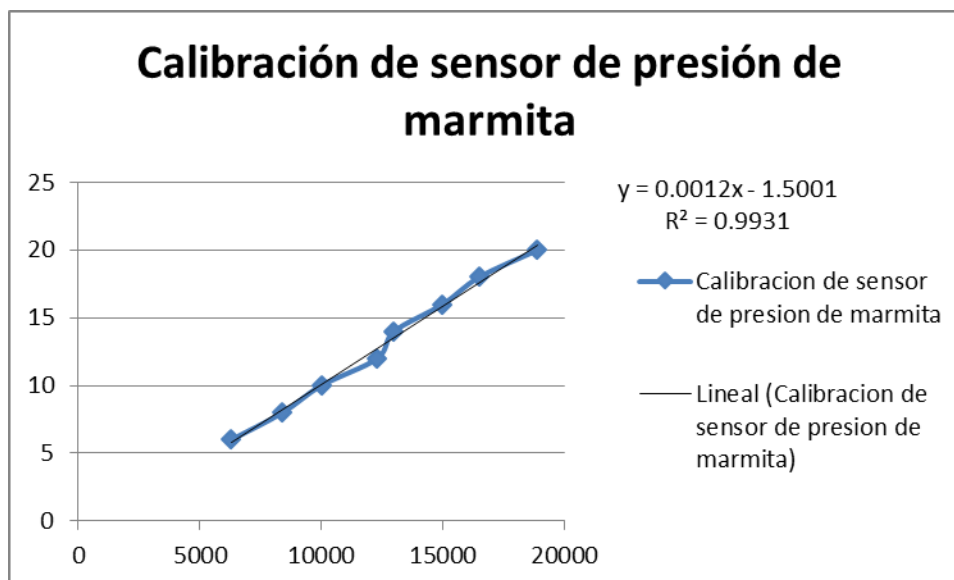


- Calibración de transmisor de presión de marmita

Ecuación de corrección ideal:  $0.003392*x-9.2547$

Ecuación de regresión lineal:  $0.003*x-6.0422$

Figura 21: Transmisor de presión vrs presión medida por manómetro

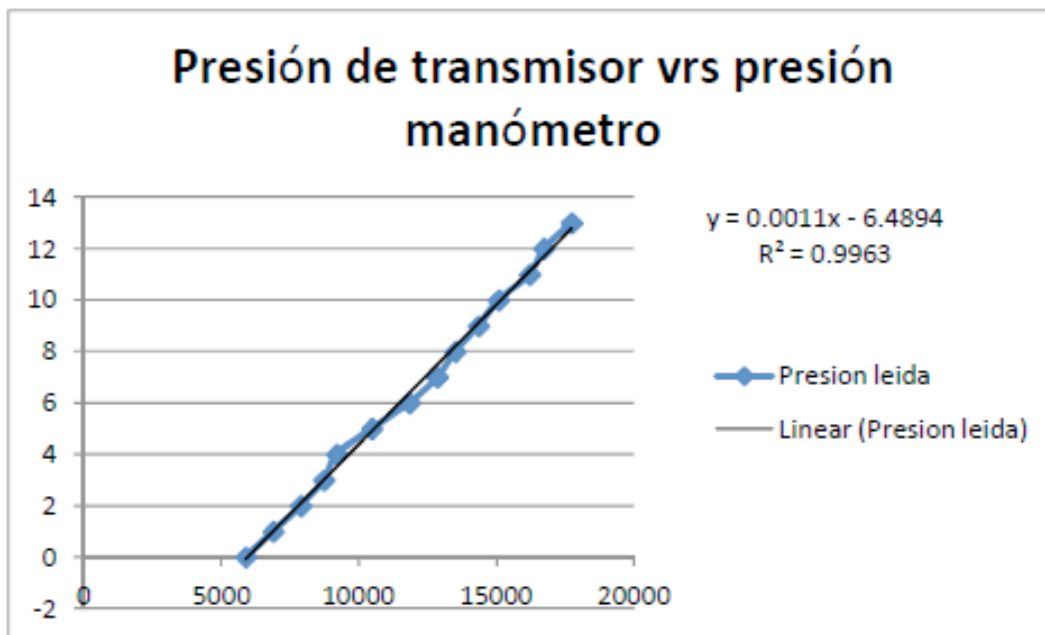


- Calibración de transmisor para liberar presión de reactor

Ecuación de corrección ideal:  $0.0011*x-1$

Ecuación de regresión lineal:  $0.0012*x-1.5001$

Figura 22: Transmisor de presión de reactor vrs presión medida por manómetro

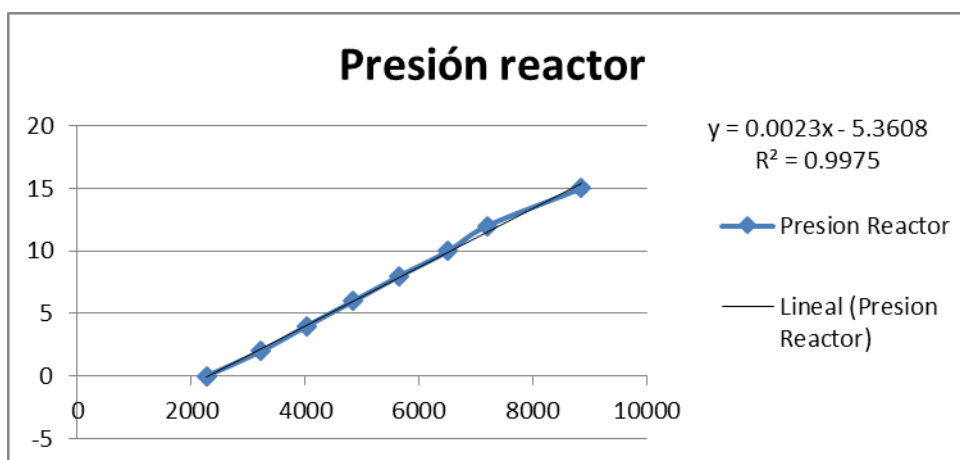


- Calibración de transmisor de presión de vapor en entrada de reactor

Ecuación de corrección ideal:  $0.002278*x-5.1564$

Ecuación de regresión lineal:  $0.0023*x-5.3608$

Figura 23: Transmisor de presión vrs presión medida por manómetro



La calibración del equipo de analítica que son los analizadores de conductividad y pH se utilizaron soluciones con características estándar. Por ejemplo, para la calibración del sensor de pH se utilizaron los buffers 4, 7 y 11. Para la calibración de los analizadores de conductividad se utilizó una muestra con una conductividad de 1,416 m S/cm. Este equipo utiliza rutinas programadas en la fábrica en las cuales se necesita únicamente un punto de medición para calibrar el equipo.

## VIII. Discusión

La automatización de este sistema es un procedimiento complejo y que implica mucha investigación. La automatización inició una vez los ingenieros químicos concluyeron el rediseño de la planta piloto para la producción de biodiésel. El nuevo diseño de la planta se puede ver en la Figura 12. A partir de este diseño, se determinó el tipo y la cantidad de actuadores y sensores necesarios.

El proceso será controlado por un PLC, se decidió por la marca Allen-Bradley (AB) puesto que este fabricante tiene un convenio con la UVG en el cual se pacta que el equipo de automatización tiene un descuento considerable por ser una institución educativa. Adicionalmente a esta facilidad de adquisición, se determinó que es más fácil encontrar información en la web acerca del equipo AB que de otras marcas. Estas dos características fueron determinantes para utilizar un PLC de la marca Allen-Bradley.

En el manual de datos técnicos de los controladores programables MicroLogix 1200 se consultó la sección “Cálculos de expansión del sistema” en la que se indica los requisitos de corriente y alimentación eléctrica que debe satisfacer el PLC. Los resultados de corrientes se observan en las Tablas 7 y 8, siendo el modelo MicroLogix 1200 1762 L40-BXB el que mejor se acopla a las necesidades del sistema.

Para la automatización de este proyecto se adquirieron tres sensores de temperatura. Estos se utilizarán en la marmita, el reactor y en el tanque de tratamiento de biodiésel. Es importante mantener una temperatura en estos tanques para optimizar la reacción deseada de las sustancias y el tratamiento adecuado de la materia prima. En la Tabla 11 se muestran las características del sensor de temperatura.

El reactor, tanque de tratamiento de biodiésel y marmita se calentará con vapor y por lo tanto es indispensable medir la presión del vapor en la entrada de los tanques puesto que existe una relación directa entre la presión de vapor y la temperatura del vapor. Además, estos sensores son necesarios para vigilar que la presión del vapor no exceda el límite de presión que puede soportar los tanques. Los asesores sugirieron el rango de presión para los sensores adquiridos. En la Tabla 12 se muestran las características de los sensores de presión.

Tanto el aceite frito como el biodiésel deben tener un nivel de humedad deseado para garantizar su buena calidad. Por medio de los analizadores de humedad se determinará la humedad contenida en el líquido de interés y si el nivel no es el deseado, se procederá a seguir calentando por más tiempo hasta que la humedad contenida este en el rango permitido. En la Tabla 13 se muestran las características de los analizadores de humedad.

El analizador de conductividad es un sistema modular. Este sistema se compone del analizador y la celda de medición. La celda está en contacto directo con el líquido por medio de sus electrodos. Los electrodos transmitirán una señal eléctrica dependiendo las características del líquido. El analizador recibe esta señal, la interpreta, realiza correcciones

por temperatura y retransmite el resultado en una señal analógica 4-20 mA hacia el PLC. Este sistema se adquirió para cumplir dos propósitos en el sistema. Los asesores de química determinaron que por medio del valor de conductividad del aceite se puede determinar la acidez del aceite y así determinar qué tipo de catálisis se debe realizar. Los analizadores también se utilizaron para diferenciar las fases de dos fluidos y así poder separarlos. En la Tabla 14 se observan las características del analizador adquirido.

Los analizadores de pH funcionan igual que los analizadores de conductividad sólo que la variable de medición del fluido es el pH.

También se adquirieron dos sensores de nivel capacitivo. Un sensor se utilizó en el tanque de aceite filtrado y el otro en el tanque de etanol. La medida que entreguen los sensores se utilizará para determinar la cantidad de etanol y aceite que se agregaron al reactor, también se utilizara para determinar si los recipientes están vacíos. En la Tabla 17 se muestran las características de los sensores utilizados.

Se adquirió un sensor de nivel puntual con la finalidad de utilizarlo en la marmita. Una vez calentada la grasa y con el nivel de humedad deseado, esta se bombeará al filtro para eliminar sólidos. Una vez la marmita está vacía, el medidor de nivel puntual enviara la señal al PLC que a su vez apagará la bomba y así evitar su fundición. En la Tabla 18 se muestran las características del medidor de nivel adquirido.

Como se mencionó anteriormente, es importante mantener una temperatura constante en el reactor, tanque de tratamiento de biodiésel y marmita. Estos se calentarán por medio de vapor y la temperatura se medirá con un sensor especial. Para evitar que la temperatura aumente o disminuya fuera del valor deseado, el vapor se controlará por medio de válvulas proporcionales. Cada tanque tendrá su válvula proporcional y esta se encargará de aumentar o reducir la presión de vapor entrando al tanque, lo que afectará directamente la temperatura. La Tabla 19 contiene la información de las válvulas proporcionales adquiridas para realizar esta tarea.

Como es de observarse en el diagrama del proceso, Figura 12, se necesita alimentación eléctrica para motores trifásicos 220 AC entre cada fase y alimentación 120 AC para las válvulas solenoides. Los 120 V AC se pueden obtener tomando una línea viva del sistema trifásico y tomando como referencia el neutro del sistema trifásico. Esta es precisamente la forma como se obtendrán los 120 V AC para la alimentación del equipo que la requiera.

Es importante notar que el PLC y el equipo de instrumentación fue adquirido para 24 V DC. Esto se realizó con la finalidad de proteger el equipo de cualquier variación abrupta en el voltaje de alimentación 120 V AC 60 Hz.

Para proteger todo el equipo que necesita 120 V AC 60 Hz para su funcionamiento, ej. Válvulas y fuente de 24 V, se decidió adquirir un flipón de 50 Amperios que protegerá esa línea en caso de cortocircuito. La única falla probable en esa línea es precisamente un cortocircuito, por lo que no se necesita otra protección.

Para un futuro se recomienda cambiar la tubería de hierro negro por acero inoxidable. Los sensores de presión se adquirieron estrictamente para el rango de operación requerido para tratar el aceite o el biodiésel, pero la presión que pueden soportar los equipos como el reactor, la marmita o el tanque de tratamiento de biodiésel es mucho mayor, por lo que se recomienda adquirir sensores que midan hasta la capacidad máxima de los tanques anteriormente mencionados. Esto con la finalidad de operar el equipo a mayores niveles de temperatura y para diferentes procesos.

La calibración de los sensores es indispensable para el correcto funcionamiento del sistema puesto que en función de estos valores se deben activar o desactivar los componentes en determinado subproceso. Para la calibración de los sensores se utilizó equipo de laboratorio de operaciones unitarias. Es importante mencionar que la calibración es un proceso lento y los datos se deben tomar una vez la variable de interés este estable. Equipo de medición como transmisores de presión ya vienen precalibrados de fábrica. Es decir que estos transmisores transmiten 4 mA en el punto mínimo del rango a medir, y 20 mA en el punto máximo del rango a medir. A pesar de estar precalibrados, es indispensable corroborar experimentalmente el funcionamiento del sensor una vez instalado en el sistema. La señal transmitida puede verse afectada por diversos factores, como por ejemplo ruido eléctrico o bien el medio de transmisión puede tener un valor de resistencia mayor al esperado. Es por este motivo que se debe realizar corroborar experimentalmente las mediciones y realizar ajustes si fuese necesario. El equipo como sensores de nivel tiene un rango de operación ajustable. El procedimiento para el ajuste de este rango lo especifica el fabricante en el manual de operación del equipo.

Para la calibración de los sensores de temperatura, RTD, se tomó como referencia la medición aportada por un termómetro de mercurio. Básicamente se armó un sistema compuesto de soporte universal, beaker, termómetro, pinza, estufa y el sensor de temperatura a calibrar. Tanto el RTD como el termómetro se sumergieron en agua y la temperatura se incrementó gradualmente. Como se puede observar en la Gráfica 4 y 5, las curvas de calibración obtenidas muestran un comportamiento lineal del sensor, así como lo especifica el fabricante. La importancia de la correcta calibración de los RTD es que estos miden la temperatura, y es la variable que se controlara utilizando lazos PID.

La curva de calibración de los sensores de presión se puede observar en las Gráficas 6, 7 y 8. El comportamiento es lineal tal y como lo especifica el fabricante. El comportamiento experimental del transmisor de presión de la marmita, gráfica 6, no es estrictamente lineal lo que sugiere una mala calibración y por lo tanto es necesario realizar una recalibración. Como se mencionó anteriormente, es necesario realizar la calibración lentamente. Esto se hace con la finalidad de que la variable de interés se estabilice y el dato transmitido por el sensor sea el correcto.

En las Gráficas 2 y 3 se observa la curva de calibración de los transmisores de nivel. Las curvas muestran un comportamiento lineal, tal y como lo especifica el fabricante. Es importante mencionar que las lecturas del sensor se ven afectadas por la agitación del agua. Por lo tanto, en la programación se incluyó un temporizador con la finalidad de tener un periodo de tiempo para que el fluido deje de agitarse.

El objetivo de la interfaz gráfica es presentar al operador de una forma amigable toda la información necesaria para monitorear la ejecución del proceso. Para este proyecto se diseñaron las pantallas introducción, configuración de proceso, tratamiento de materia prima, producción de biodiésel, tratamiento de productos e integrantes del proyecto. Las distintas pantallas en este proyecto contienen todos los componentes y el valor de las variables que se ven involucrados en un subproceso. El motivo del diseño de varias pantallas es no saturar de información al operador y así tener un mejor control del sistema.

En la pantalla “Configuración de proceso”, el operador puede modificar el valor de las variables que están involucradas en la fabricación de Biodiésel. El objetivo principal de esta pantalla es que el operador modifique el valor de las variables y así la calidad del biodiésel producido, obteniendo así un proceso abierto a experimentación. La pantalla “Tratamiento de materia prima” se utiliza para visualizar todos los componentes que están involucrados en el subproceso de tratamiento de aceite y traslado de aceite hacia el reactor. Las componentes son marmita, filtro prensa, tanque de aceite, bomba 1, válvula 1, 2, 3, 4 y 5 y las variables de interés como humedad en aceite, temperatura de marmita y nivel continuo de tanque de aceite. En “Producción de biodiésel” se visualiza el reactor, tanque de metanol, bomba dosificadora, condensador, temperatura de reactor, presión en reactor, nivel continuo de tanque de metanol, bomba 2, tiempos de ejecución, válvulas 6, 7, 11, 12, 9 y la válvula proporcional. El único subproceso en esta pantalla es la de producción de biodiésel. En la pantalla “Tratamiento de productos” se pueden visualizar los subprocesos separación de biodiésel y glicerina, tratamiento de biodiésel y tratamiento de glicerina. Los componentes involucrados en estos subprocesos son el tanque de tratamiento de biodiésel, tanque de glicerina, agitador, bomba 4, válvulas 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 10 y la válvula proporcional. Las variables de interés son temperatura y humedad en biodiésel, pH de glicerina, cantidad de lavados ejecutados y tiempos de ejecución. Por último, las pantallas “Introducción” e “Integrantes” muestran información acerca del proyecto.

En la interfaz gráfica el operador también recibe mensajes que le indican al operador que hacer en determinado momento. Por ejemplo, en el subproceso de Producción de biodiésel en la catálisis acida, el operador recibe la notificación de agregar cierta cantidad de ácido. Por medio de la interfaz gráfica el operador puede controlar manualmente la activación de todos los componentes del sistema o bien activar los subprocesos que se deben ejecutar. En caso de emergencia el operador puede detener la ejecución del proceso presionando el botón “ALTO”.

## **IX. Conclusiones y recomendaciones**

- Se automatizó la planta de producción de biodiésel en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Se diseñó el proceso indicando los sensores y actuadores necesarios para la automatización del sistema.
- Se adquirió la mejor opción de cada actuador y sensor según lo ofertado por los proveedores.
- Se diseñó el módulo de potencia de manera que todos los actuadores y sensores en el sistema estén debidamente alimentados.
- Se diseñó y programó el HMI (Human Machine Interface), de tal forma que el operador entienda claramente en qué estado se encuentre cada actuador en el sistema.
- Se programó el PLC (Programmable Logic Controller).
- Se calibraron los sensores para tomar las mediciones de humedad, pH, temperatura, conductividad y presión.
- Se realizó la puesta en marcha del proceso automatizado para la planta de biodiésel.

## **X. Bibliografía**

- [1] Campero, E. Bratu, N., *Instalaciones Eléctricas*, 2da ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 1995.
- [2] Bozzuto, Angel Mario, *Introducción a los Controladores Lógicos Programables (PLC)*
- [3] Creus Sole, Antonio, *Instrumentación Industrial*; 6ta ed. Barcelona, España: Alfaomega Marcombo, 1997.

# XI. Anexos

## A. Tabla de capacidad de conducción

Tabla 24: Capacidad de conducción de amperios por calibre de cable

Size AWG or kcmil	Temperature Rating of Conductor (See Table 310.13.)						Size AWG or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM			
18	—	—	14	—	—	—	—
16	—	—	18	—	—	—	—
14*	20	20	25	—	—	—	—
12*	25	25	30	20	20	25	12*
10*	30	35	40	25	30	35	10*
8	40	50	55	30	40	45	8
6	55	65	75	40	50	60	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	110	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	150	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	190	230	255	300
350	260	310	350	210	250	280	350
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	355	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	310	375	420	700
750	400	475	535	320	385	435	750
800	410	490	555	330	395	450	800
900	435	520	585	355	425	480	900
1000	455	545	615	375	445	500	1000
1250	495	590	665	405	485	545	1250
1500	520	625	705	435	520	585	1500
1750	545	650	735	455	545	615	1750
2000	560	665	750	470	560	630	2000
CORRECTION FACTORS							
Ambient Temp. (°C)	For ambient temperatures other than 30°C (86°F), multiply the allowable ampacities shown above by the appropriate factor shown below.						Ambient Temp. (°F)
21–25	1.08	1.05	1.04	1.08	1.05	1.04	70–77
26–30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	78–86
31–35	0.91	0.94	0.96	0.91	0.94	0.96	87–95
36–40	0.82	0.88	0.91	0.82	0.88	0.91	96–104
41–45	0.71	0.82	0.87	0.71	0.82	0.87	105–113
46–50	0.58	0.75	0.82	0.58	0.75	0.82	114–122
51–55	0.41	0.67	0.76	0.41	0.67	0.76	123–131
56–60	—	0.58	0.71	—	0.58	0.71	132–140
61–70	—	0.33	0.58	—	0.33	0.58	141–158
71–80	—	—	0.41	—	—	0.41	159–176

## B. Diagramas de flujo del proceso

Figura 24: Diagrama de flujo para realización de catálisis

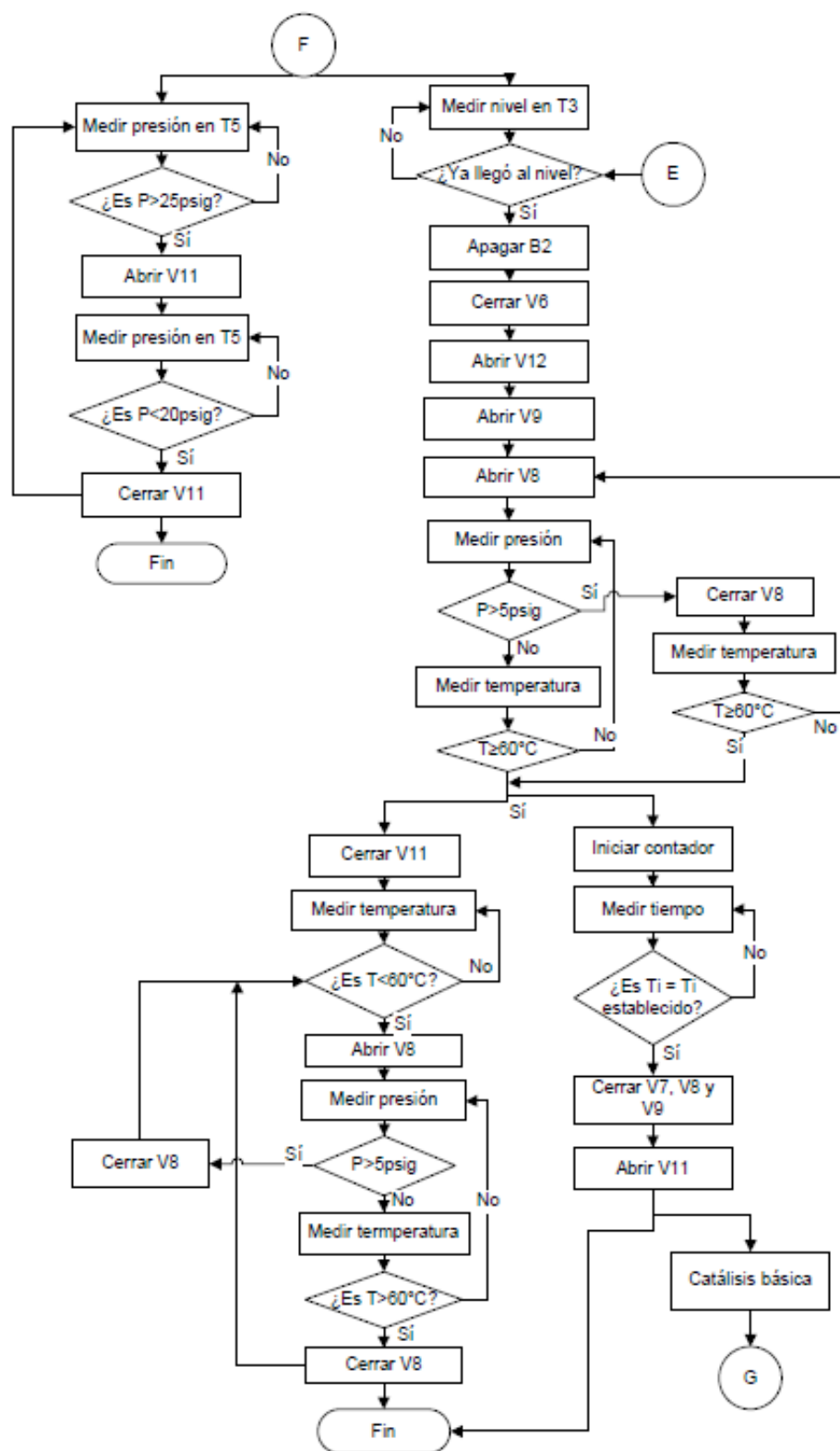


Figura 25: Diagrama de flujo para realización de catálisis

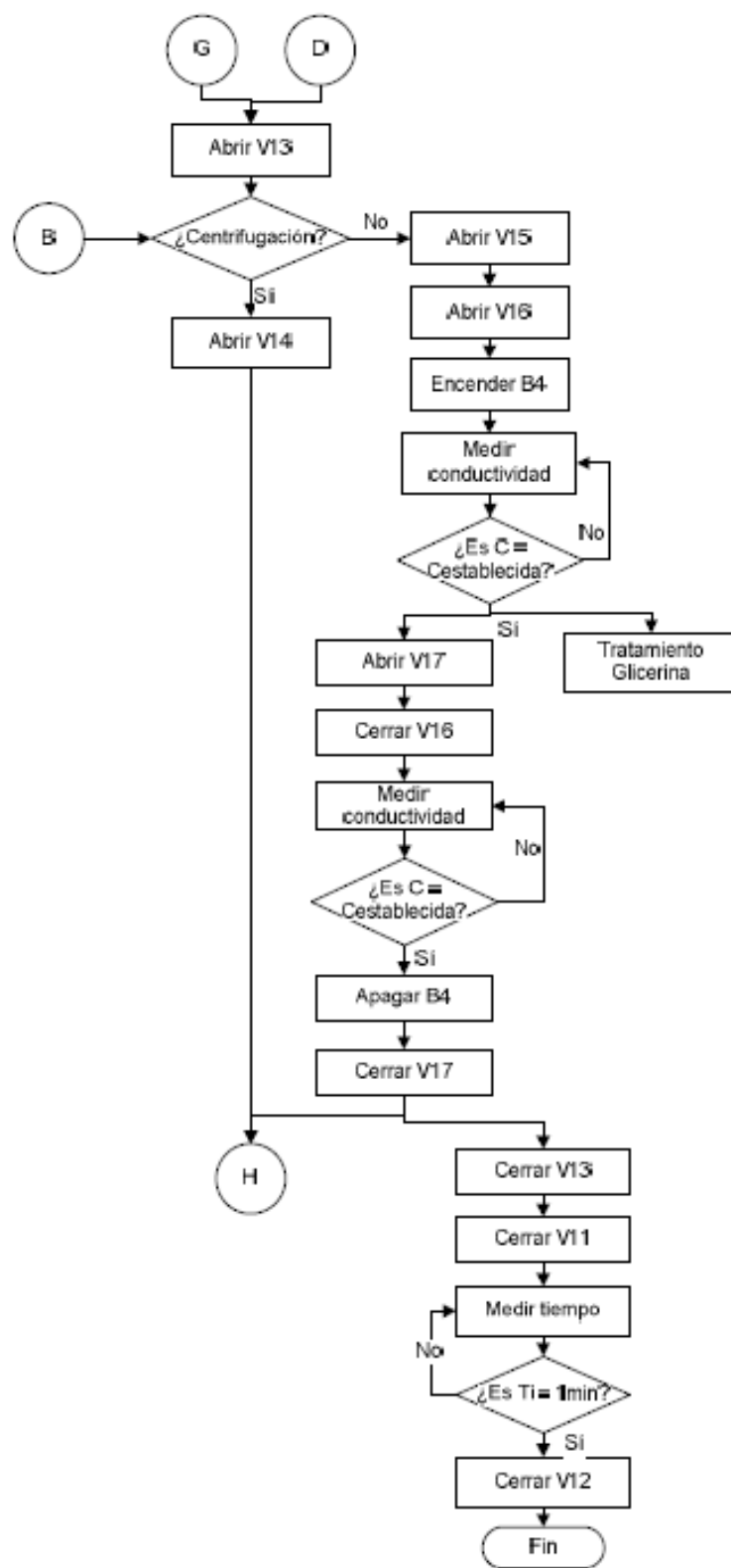


Figura 26: Diagrama de flujo para lavado de biodiésel



Figura 27: Diagrama de flujo para tratamiento de biodiésel

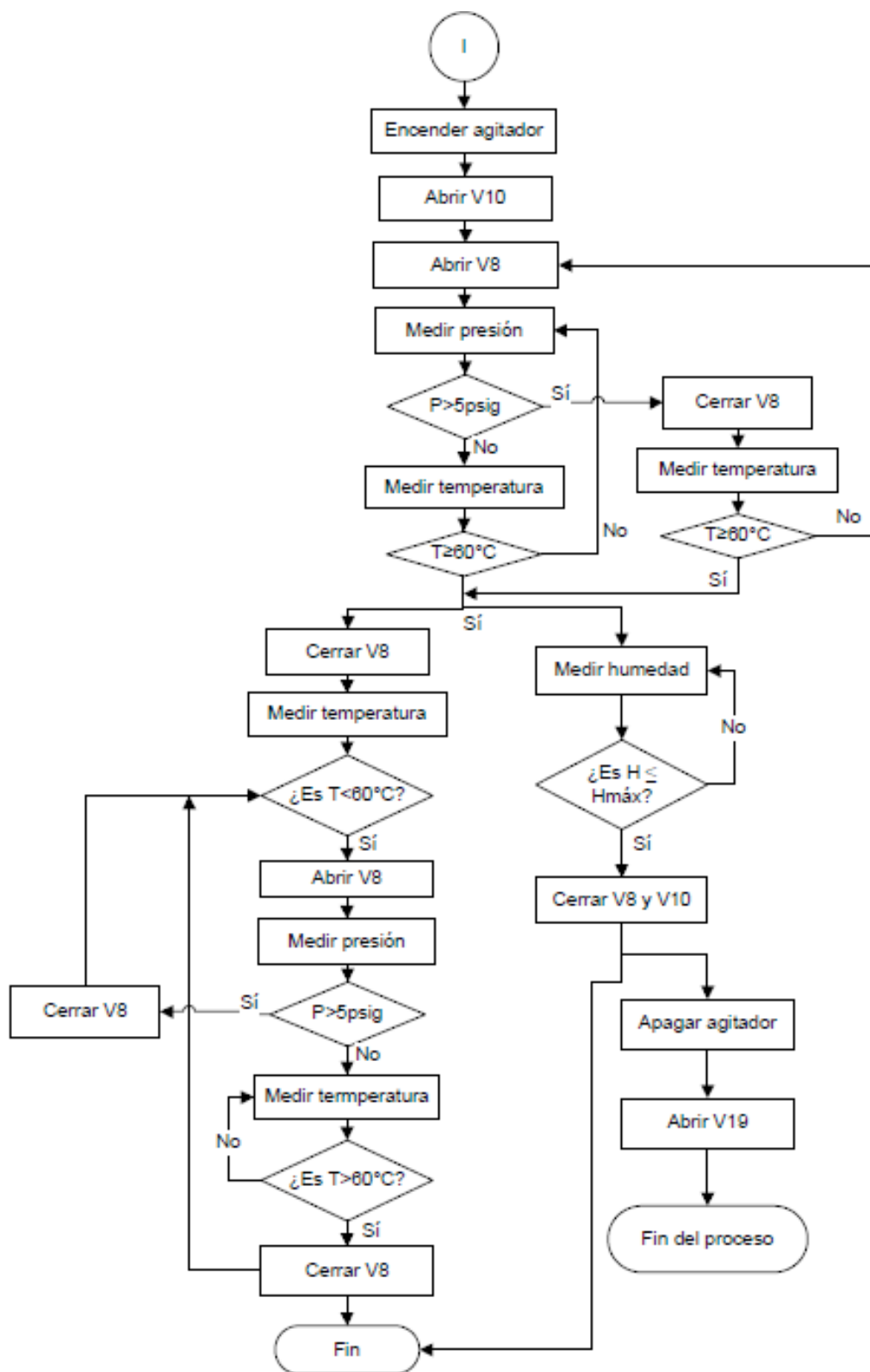


Figura 28: Diagrama de flujo de tratamiento de materia prima

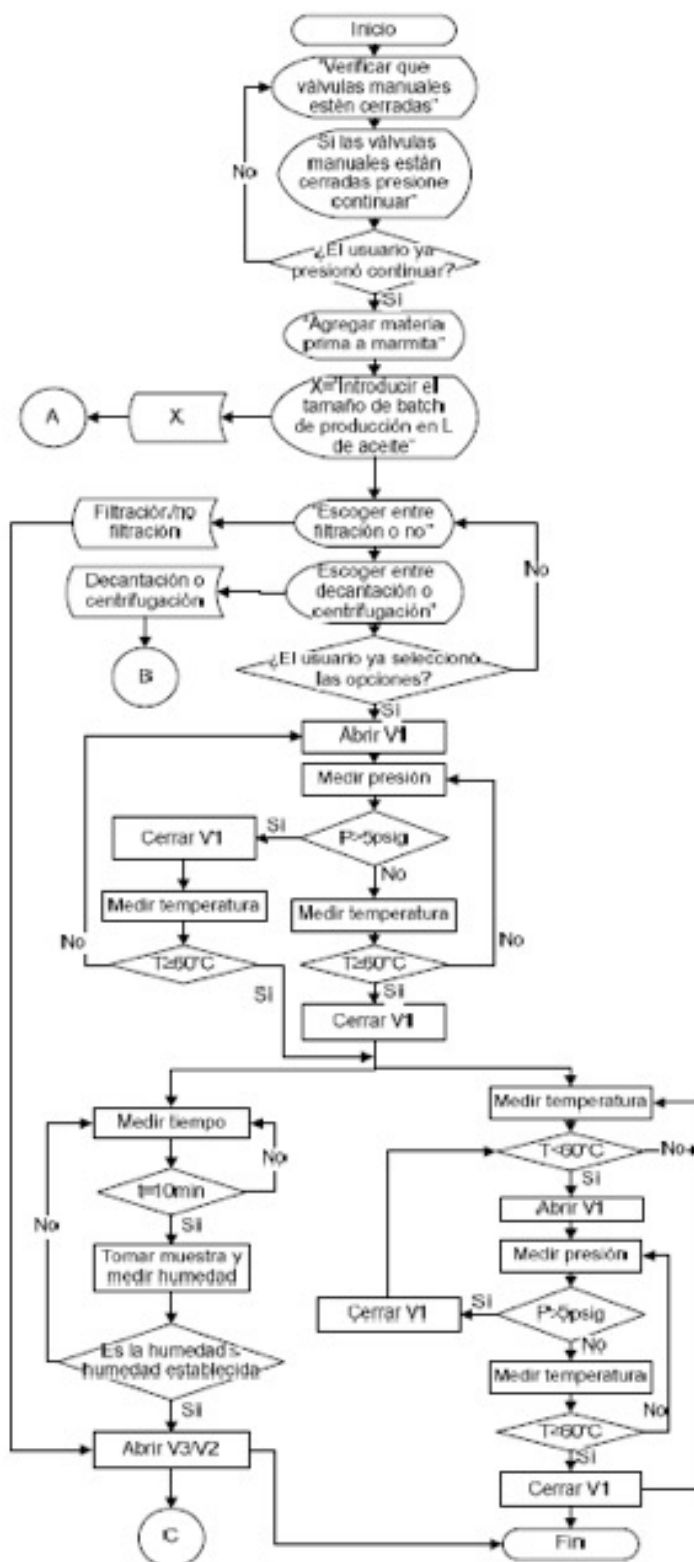
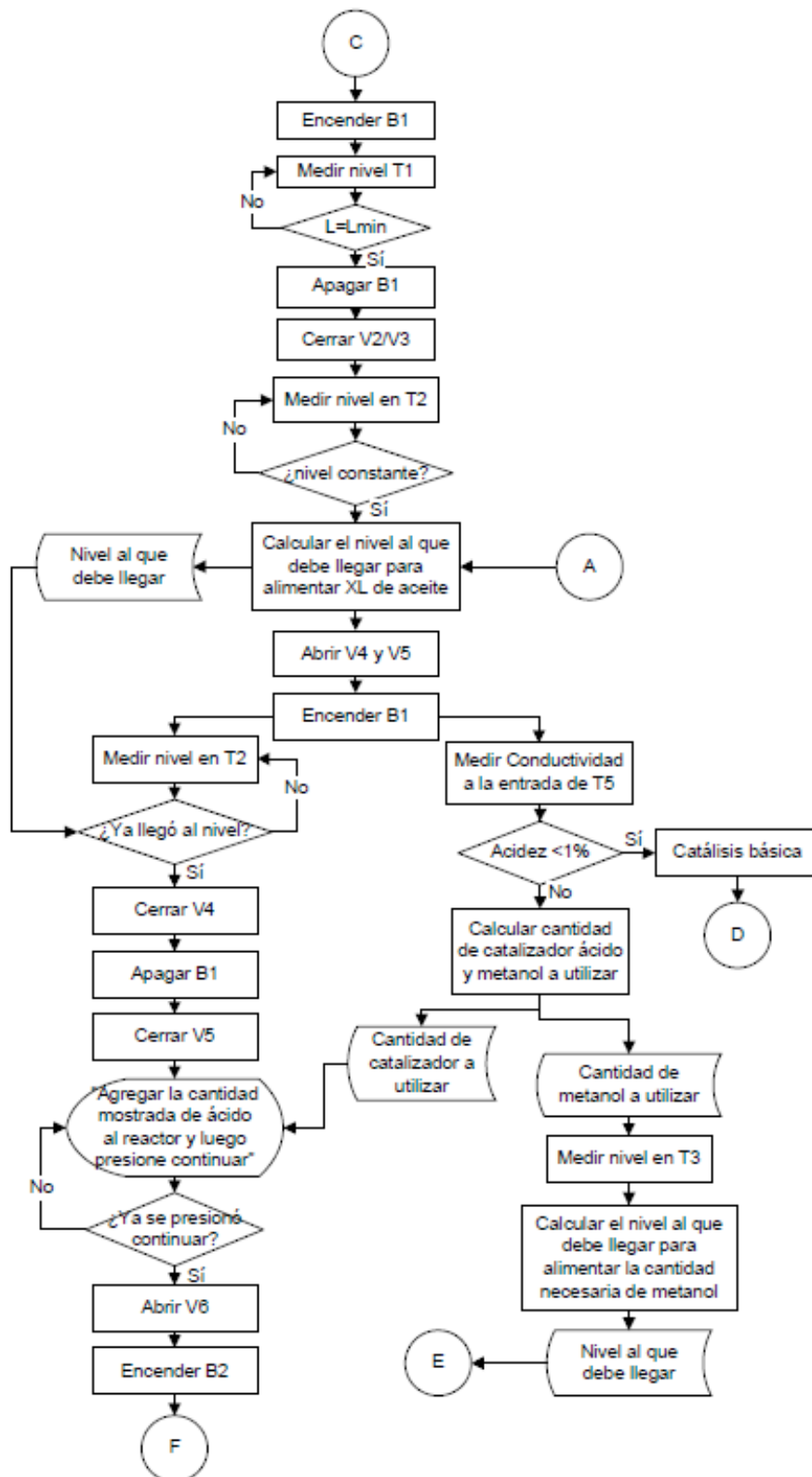


Figura 29: Diagrama de flujo para traslado de aceite filtrado hacia reactor



### C. Pantallas desarrolladas para HMI

Figura 30: Pantalla de presentación de proyecto



Figura 31: Pantalla de configuración de proceso



Figura 32: Pantalla de tratamiento de materia prima

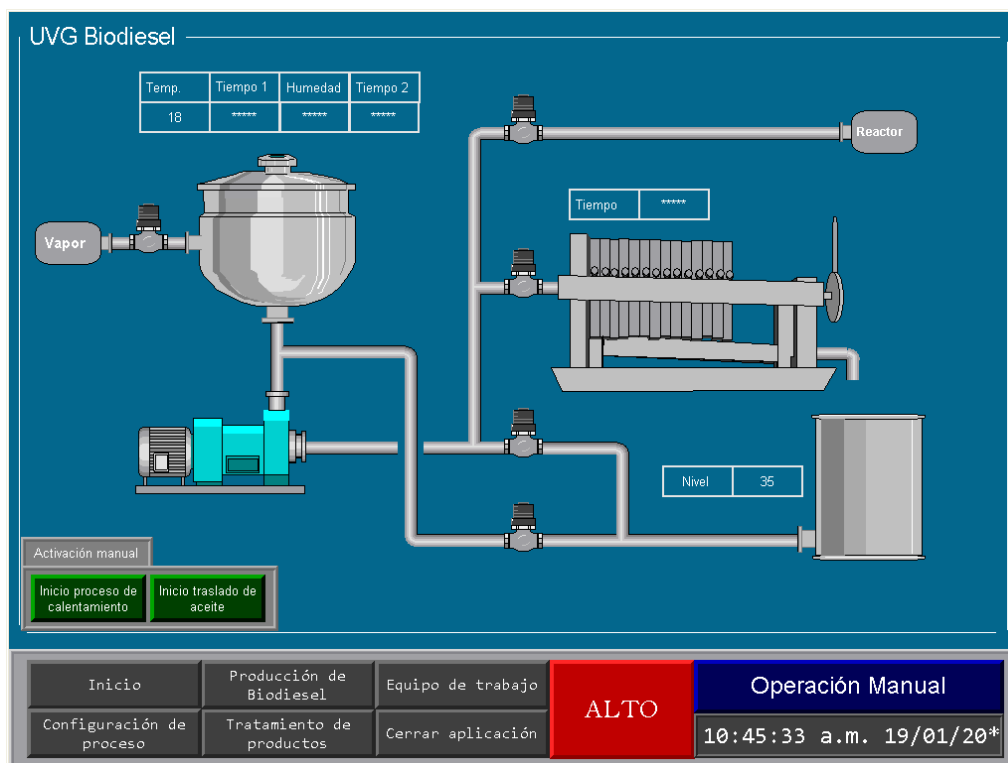


Figura 33: Pantalla de producción de biodiésel

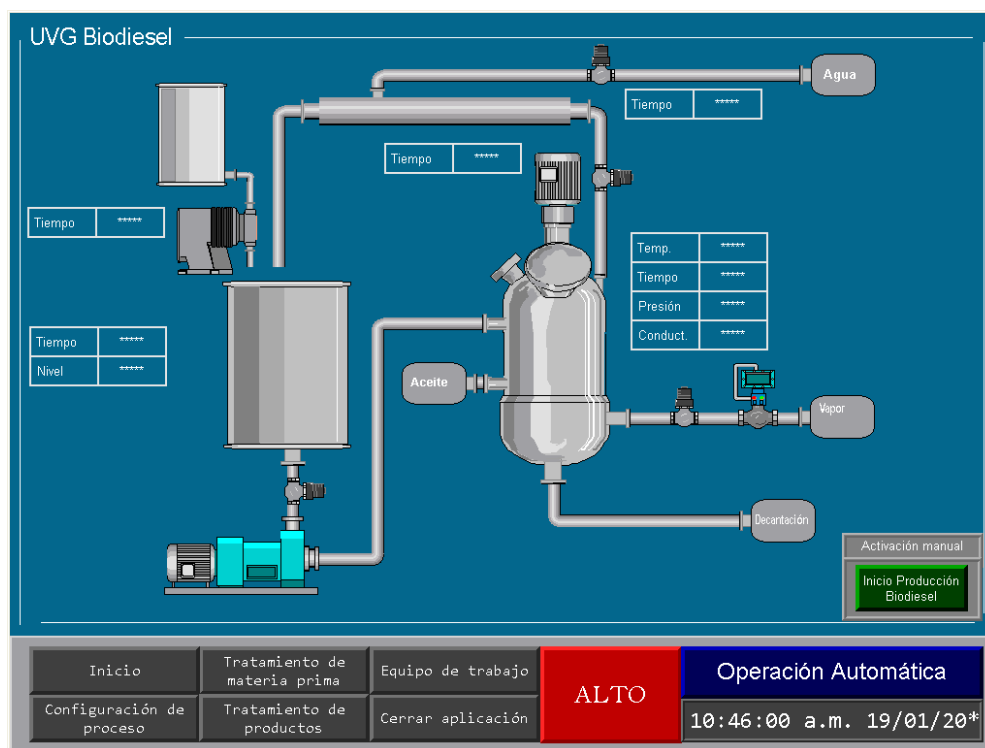


Figura 34: Pantalla de tratamiento de productos

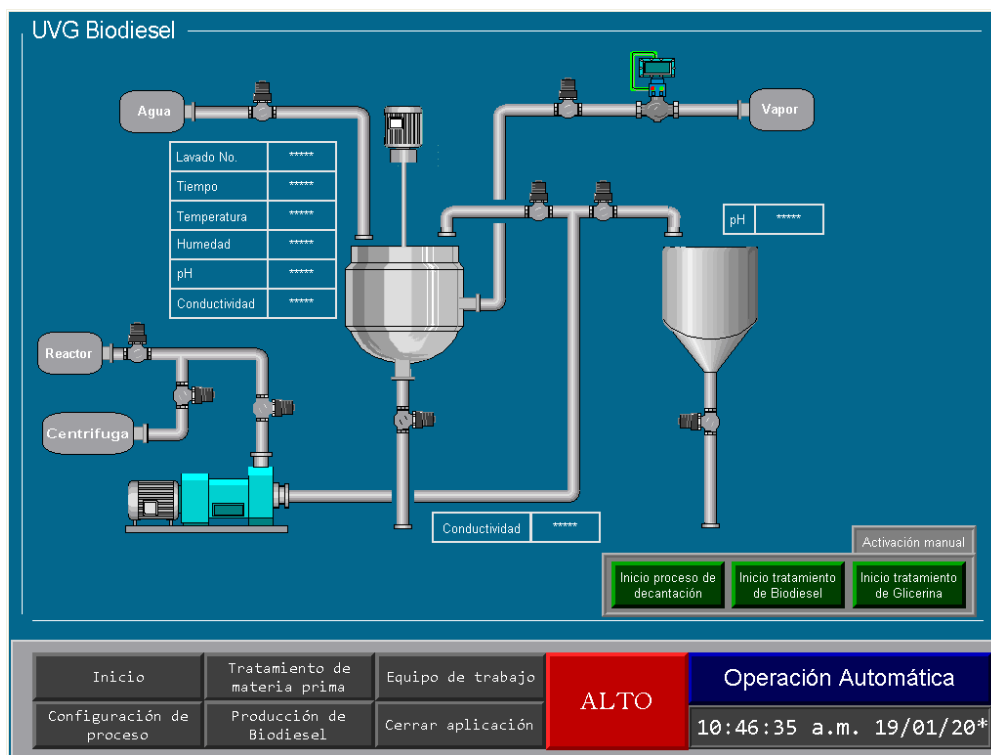


Figura 35: Pantalla en la que se especifican los integrantes del equipo de trabajo

## INTEGRANTES



1966  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Excelencia que trasciende  
DELVALLE  
GRUPO EDUCATIVO

- Byron Salvador  
Módulo de trabajo de graduación  
Tesis: Automatización de planta piloto para la producción de Biodiesel en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Julio Espinoza
- Alejandra Molina  
Módulo de megaproyecto: Rediseño y automatización de la planta piloto de producción de biodiesel del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para obtener biodiesel y glicerina puros de forma automática, aumentando la eficiencia del proceso y la calidad de los subproductos.

Miércoles, 19 de Enero de 2011 10:47:05 a.m.

INICIO	TRATAMIENTO DE MATERIA PRIMA	TRATAMIENTO DE PRODUCTOS
CONFIGURACIÓN DE PROCESO	PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	CERRAR APLICACIÓN

## **XII. Glosario**

Diagrama de contactos – Lenguaje de programación tipo gráfico que consiste en la representación de un circuito electromecánico equivalente al que se hubiera utilizado con elementos convencionales como contactores.

EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) son de sólo lectura pero reprogramables por el usuario previa cancelación de la información anterior por medio de aplicaciones ultravioleta, que inciden al chip por medio de una ventana.

EAROM (Electrically Alterable Read Only Memory) memoria que se reprograman por medios eléctricos sin necesidad de ser extraídas de su puesto de trabajo, también denominadas E<sup>2</sup> PROM (Electrically Erasable PROM).

Human Machine Interface - Son lenguajes de programación que permiten el desarrollo de interfaces gráficas que representen el sistema automatizado y al mismo tiempo son amigables con el usuario.

Lazos de control – Estructuras de control que comparan el valor actual de la variable de interés con el valor deseado de la variable. De la comparación surge un error el cual es manipulado algebraicamente para alterar el comportamiento del actuador y así corregir el error.

Lenguaje de Programación – Lenguaje artificial en el cual se define un conjunto de reglas sintácticas y semánticas que permiten expresar un conjunto de instrucciones que serán ejecutadas por una computadora.

Programmable Logic Controller (PLC) - Son dispositivos electrónicos que accionan todos los actuadores de un sistema en función de la información otorgada por los sensores y según las instrucciones de un programa desarrollado para controlar el proceso del sistema.

PROM (Programmable Read Only Memory) son de sólo lectura pero programables por el usuario antes de ser utilizadas. Una vez programadas son inalterables.

ROM (Read Only Memory) o memorias de sólo lectura. La escritura de la información se lleva a cabo durante la construcción por lo cual el contenido no es modificable ni borrable.