

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO EN LA AUTOMATIZACIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS.

Daniel Alexis Nieto Mora

Ingeniería Mecatrónica

Luis Fernando Cardona Sepulveda

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

12 de Enero de 2017

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El trabajo desarrollado comprende lo que es la automatización de un reactor de pirólisis para uso industrial. El proyecto involucra lo que es el diseño de planos eléctricos con todos los elementos que se requieren para el gabinete de control y el suministro de potencia a los equipos que lo necesitan, así como también el diseño en la programación que está estructurada entre el código del elemento de control, en este caso un PLC, e interfaz hombre-máquina HMI para la visualización y monitoreo del proceso.

Adicionalmente la contratación incluía un periodo de pruebas y puesta en marcha para dejar la máquina y el proceso a punto. Algunos detalles son omitidos en este informe debido a que el proyecto tiene una cláusula de confidencialidad acerca del cliente final y los parámetros de operación, detalles que no son relevantes y que no se involucran en la explicación de la automatización.

Para este proyecto fueron utilizadas principalmente herramientas informáticas, como lo son los softwares Excel para el diseño de los planos eléctricos, Gx Works 2 para el diseño del código para el PLC y GT Designer 3 que es utilizado para la elaboración y diseño de interfaces de operador. Los software involucrados con la programación requieren una licencias, que Make Solutions, empresa donde realice las prácticas profesionales y contratada para el proyecto, brinda a todos sus ingenieros.

Como resultado final luego de las pruebas pertinentes y la puesta en marcha, el equipo se pone en operación exitosamente, obteniendo la cantidad de producto final deseado y con las propiedades que son requeridas, adicionalmente se evaluó la seguridad del proceso y se hicieron mejoras en los eventos de alertas y emergencias para tener mayor redundancia en los ciclos de mayor peligrosidad.

Palabras clave: Actuador, amperímetro, analógico, automatización industrial, bloques de función, condensación, controlador lógico programable, controlador proporcional integrador derivativo, disyuntor, DPS, estado sólido, fusible, ladder, librería, modulación de pulsos, Mitsubishi, presión de vacío, pulgadas de mercurio, reactor, relé, sensor, servomecanismo, térmico, transductor, tren de pulsos, variador de velocidad, voltímetro.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Expreso agradecimiento a mi familia quienes estuvieron apoyando mi labor académica liberándome de obligaciones que hubieran podido retrasar el proceso de formación y que además estuvieron animando y aconsejando en decisiones importantes de la carrera y mi vida profesional, sin ayuda de ellos hubiera sido difícil alcanzar tantos éxitos a tan corta edad.

Agradezco también a mis más allegados amigos, Alejandro Ramirez, Nicolás Bueno y Sebastián Vergara, con los que habitualmente se podía encontrar información que debatir para ampliar panoramas y puntos de vista, permitiéndome ser una persona más crítica en los diferentes aspectos de la vida, además son una fuente eficaz en donde encontrar solución a dificultades académicas e investigativas.

A todos los docentes que depositaron en mí su tiempo y conocimiento para poder replicarlo y perfeccionarlo, les estoy totalmente agradecido, por ellos podré ejercer en mi carrera con seguridad y estar a un excelente nivel construyendo un mejor futuro científico en la sociedad.

A la empresa Make Solutions que me brindó la oportunidad de realizar las prácticas profesionales y desempeñarme como ingeniero, además de permitirme continuar con ellos terminado este periodo para seguir en mi formación laboral con personas de tan alta calidad.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

ANSI American National Standards Institute.

FB Function Block.

HMI Interfaz hombre-máquina.

InHg Pulgadas de mercurio.

ITM Instituto Tecnológico Metropolitano.

PLC Control lógico programable.

PID Proporcional integrador derivativo.

RS Recommend Standard.

SSR Relé de estado sólido.

UNAM Universidad Nacional Autónoma de México.

VDF Variador de frecuencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Descripción de la empresa	9
2.2 Reactores químicos	10
2.3 Reactor químico de pirólisis	12
2.4 Automatización de reactores	13
3. METODOLOGÍA	16
3.1 Diseño de planos eléctricos	17
3.2 Diseño del programa en Gx Works 2	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	28
REFERENCIAS	29
APÉNDICE	30

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

La automatización industrial es un campo técnico y tecnológico que cada día toma más fuerza debido a la exigencia de los consumidores y los mismos empresarios sobre los productos que se comercializan, esto debido a que los procesos que involucran automatización y control, son procesos que estandarizan parcial o totalmente un producto o servicio según el grado de automatización, satisfaciendo las expectativas de calidad y aumentando en gran medida la producción comparada con una operación donde el personal humano es el principal operador.

Actualmente para una empresa poder crecer y mantenerse en un mercado tan agresivo y competitivo como el que se vive, es indiscutible que se deben tener procesos o líneas automatizadas que eleven la producción y sobretodo mantengan una alta integridad en los productos, esto es algo que se puede ver como opcional en ciertos sectores empresariales como alimentos, vestuario y algunos otros que de alguna manera vienen de trabajos artesanales o caseros, en donde aún se puede producir con personal humano, pero existen operaciones que resultan altamente riesgosas y tediosas para que un ser humano las desempeñe, es allí donde se ha hablado de la gran utilidad de la robótica que no es independiente a la automatización, lo que indica que para ciertas empresas es requisito en sus procesos de mayor peligro y fatiga, migrar sus métodos de control y operación para evitar accidentes y errores por el factor humano.

En el caso del reactor automatizado, se puede ver claramente la necesidad de desplazar al personal humano por cuestiones de seguridad, una de las grandes ramas en las que se puede especializar una empresa dedicada a los procesos de control, en este caso se trabaja un reactor que opera con aceite vegetal a una presión negativa y alta temperatura, lo que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

hace que el entorno de trabajo se torne de alto riesgo para que una persona manipule manualmente los actuadores que llevan el equipo hacia su punto de operación.

El principal objetivo de la construcción del reactor, es la extracción exitosa del compuesto químico de interés, teniendo en cuenta que este compuesto debe ser extraído en un tiempo máximo aproximado de hora y media, luego de este tiempo la materia prima se solidifica y se vuelve no apta para el proceso, adicionalmente al finalizar cada bache de proceso se debe tener como se mencionó anteriormente, un 40% de la materia prima en producto terminado, demostrando la eficiencia máxima del equipo. Esta eficiencia fue puesta a prueba en equipos de laboratorio bajo condiciones controladas y se hicieron los cálculos de lo que se podría esperar en un equipo industrial, en donde hay mayores cantidades y posiblemente incremento de pérdidas o disminución del porcentaje final esperado. Otro de los objetivos del proyecto es poder generar condiciones seguras de trabajo, ya que este equipo pretende ser operado en un periodo de pruebas para verificar si es capaz de suministrar el suficiente producto demandado por la industria, las condiciones seguras hacen referencia a que las temperaturas y presiones sean controladas en todo momento, y si se presenta una situación anormal, el equipo pueda responder automáticamente sin necesidad del personal humano, disminuyendo de esta forma el error por factor humano.

Como objetivo secundario pero indispensable sabiendo que el equipo puede ser replicado y no necesariamente por Make Solutions, y también sabiendo que el prototipo será trasladado a otra ciudad, es que el mismo pueda ser parametrizado y acondicionado por una persona con suficientes conocimientos de los puntos de operación, esto quiere decir que el programa pueda ser modificado desde la pantalla de proceso y no necesitar del programador para modificar parámetros que pueden ser riesgosos al ser manipulados, pero que deben ser ajustados según el lugar donde se ponga en marcha.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción de la empresa

Make Solutions S.A.S es una empresa de ingeniería dedicada a los procesos de automatización y control industrial, fue fundada en 2010 por Yuber Marín, ingeniero de control del politécnico Jaime Isaza Cadavid y Luz Stella Jaramillo, ingeniera electrónica de la Universidad de Antioquia.

Actualmente la empresa cuenta con una oficina ubicada en el sector del Poblado de Medellín y un taller en esta misma ciudad en donde se construyen y ensamblan los gabinetes de control que son requeridos para los procesos contratados.

La empresa dispone de un grupo de 4 ingenieros de proyectos incluyéndome, en donde desempeño el cargo de ingeniero de proyectos categoría Junior y los demás ingenieros de categoría Senior, adicionalmente se cuenta con un electricista quien se encarga de los montajes y el cableado de los equipos que se suministran, una gerente comercial y una asistente del área administrativa.

Actualmente Make Solutions trabaja para grandes empresas a nivel nacional e internacional, algunas de ellas son: Noel, Colcafe, Avícola Nacional, Yanbal, Produsa, Peldar, Solla, Cipa, Consulta Inteligente, I2R, Bajaj, incolmotos y otras que tienen una alta exigencia en los niveles de producción y día a día buscan la manera de optimizar sus procesos.

Inicialmente mi llegada a la empresa en Enero del 2016 fue bajo un contrato de auxiliar de ingeniería y luego en Junio del mismo año se hizo un cambio para poder hacer en la empresa las prácticas profesionales bajo la modalidad de convenio interinstitucional, contrato que caducaría en diciembre del 2016 para luego poder ejercer como ingeniero de proyectos,

cargo en el que se desempeñan labores como son: Diseño de planos eléctricos, programación de PLC y HMI, diseño de arquitecturas y redes de comunicación industriales, puesta en marcha de proyectos, soporte a proyectos, y selección de equipos.

2.2 Reactores químicos

La clasificación de reactores químicos se puede hacer según el tipo de mezcla, los tiempos y formas de operación (continuo o por batches) o si es catalizado o no entre otras. Según el doctor Rogelio Cuevas Garcia de la facultad de química y física de la universidad nacional autónoma de México UNAM, realiza algunas clasificaciones en los reactores, en donde comienza por resaltar que las reacciones pueden ser de tipo homogéneas o heterogéneas, en donde las reacciones heterogéneas son en las que hay involucradas dos o más fases y las homogéneas solo una fase (Cuevas, 2009), el grafico que se muestra a continuación puede aclarar y ayudar a clasificar los tipos de reacciones de una forma general.

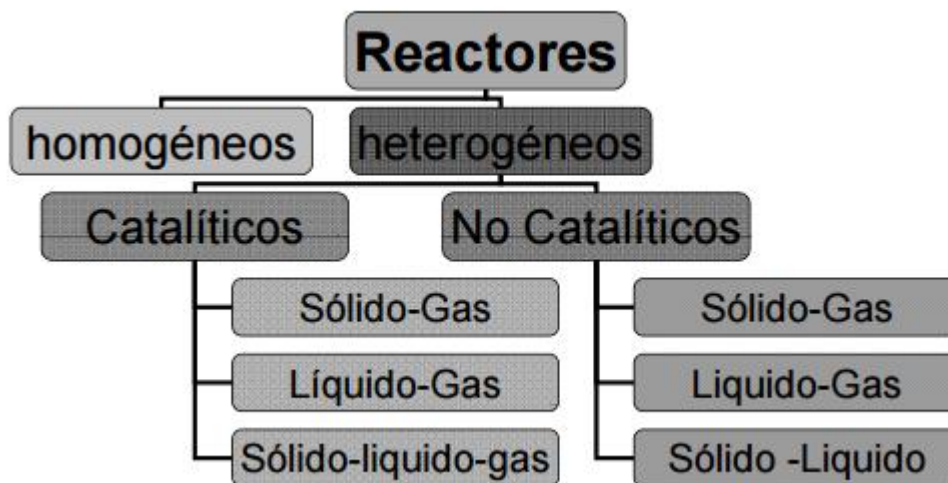


Figura 1: Clasificación de los reactores según las fases internas. Tomado de (Cuevas, 2009).

Más adelante en el artículo de Cuevas, se hace una clasificación de los reactores químicos según su modo de operación, encontrando las siguientes categorías:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Reactores intermitentes o batch.
- Reactores continuos.
- Reactores semi-continuos.

De los tres anteriores es de interés el primero, ya que se ajusta al reactor automatizado. Los reactores tipo batch son los que no tienen un flujo de materia continuo, sino que se ingresa la materia prima, se lleva el equipo a las condiciones de trabajo, se obtiene el resultado de la reacción por aparte y se lava para volver a comenzar un nuevo bache, tal y como se hace en el equipo de este informe.

En la industria hay ciertos reactores que son usados con mayor frecuencia que otros debido a su capacidad de producción y rapidez en alcanzar un resultado, en la siguiente tabla puede observarse el porcentaje de utilización de un reactor continuo o uno por baches dependiendo del sector industrial.

Tabla 1
Porcentajes de utilización de los reactores continuos y discontinuos en los sectores industriales

SECTOR INDUSTRIAL	MODO DE OPERACION	
	CONTINUO	DISCONTINUO
FARMACEUTICO	80	20
ALIMENTACION	65	35
QUIMICO	45	55
METALURGICO	35	65
VIDRIO Y CEMENTO	35	65
PAPEL	15	85
REFINACIÓN	5	95

Nota: Recuperado de Introducción a los reactores químicos por Rogelio Cuevas García.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 Reactor químico de pirólisis

Para entender más acerca del proceso se debe saber que la pirólisis es un proceso en el cual se expone un compuesto o molécula a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno y algunas veces puede hacerse en vacío para someter la materia a etapa de ebullición. El resultado de esta exposición es el rompimiento de la molécula.

Lo que se pretende en el proceso investigado y el cual fue automatizado, es tomar una materia prima X, que es obtenida naturalmente de los recursos ambientales, es decir, no tiene ningún tratamiento previo; luego se ingresa a un tanque totalmente sellado al vacío que comienza a calentarse por medio de una resistencia eléctrica a temperaturas superiores a los 200 grados Celsius, para de esta forma forzar el cambio de estado líquido a gaseoso de uno de los compuestos de la materia que es el compuesto de interés y a la vez producto final esperado, luego este se enfría de nuevo rápidamente por un intercambiador de calor que consiste en el paso de agua fría por la chaqueta externa de la tubería (El diseño mecánico fue realizado por una empresa externa, por lo cual no se tienen muchos detalles y no son de interés en esta tesis), lo que hace que el compuesto pase de gaseoso a líquido y quede almacenado en un tanque independiente, todo esto ocurre con una presión de vacío de -20 InHg para finalmente obtener un rendimiento máximo del 40% en producto terminado.

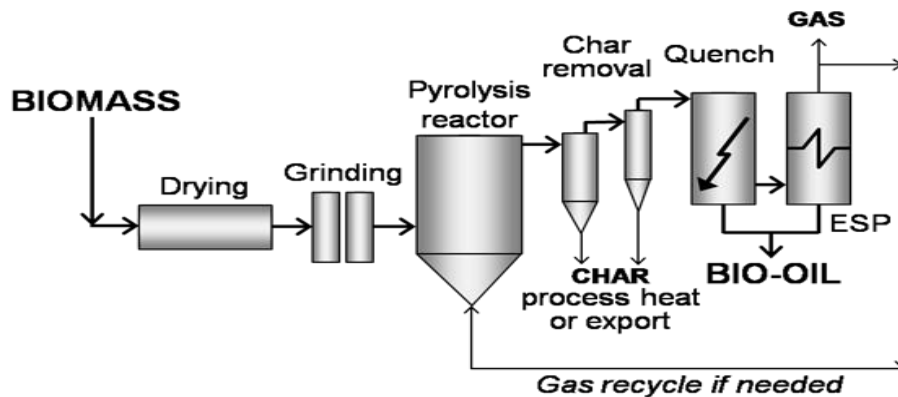


Figura 2: Proceso de pirólisis industrial. Tomado de (Aston University).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4 Automatización de reactores

Generalmente la automatización de equipos tan complejos y de riesgo latente como lo son los reactores cuentan con un estándar en selección de equipos y diseño de la programación, de por si las secuencias y etapas del proceso suelen ser las mismas, para el reactor de pirólisis en vacío por ejemplo, el proceso es básicamente generar vacío, comenzar etapa de calentamiento para obligar a la materia prima a entrar en etapa de ebullición y finalmente un tiempo de espera mientras ocurre la reacción y el producto terminado queda almacenado en su tanque de destino, aparte de esto se debe mantener estable el procedimiento.

Los equipos generalmente utilizados son todo el equipo eléctrico que son básicamente protecciones para los motores y actuadores, estos pueden ser disyuntores o guarda motores que protegen el equipo en caso de un corto o una sobre corriente que pueda generar daños, estos equipos deben ser perfectamente seleccionados ya que los motores son generalmente muy costosos y como meta principal se encuentra en todo proyecto el mantenimiento y debido funcionamiento de todos los componentes. Además de protecciones para los motores también se deben agregar disyuntores o fusibles en todos los demás elementos controlados como las electro válvulas, resistencias eléctricas, válvulas servo pilotadas, sensores y transductores.

El controlador es quizá el elemento más crítico a seleccionar, ya que es de los equipos más costosos y el que debe contar con la capacidad para poder manejar el proceso sin problema alguno, de tal manera que debe poseer memoria suficiente para ser programado con todas las rutinas y la lógica que el reactor demanda, en caso de hacer una mala selección de un controlador con memoria limitada, la empresa tiene perdidas económicas por el cambio que debe hacer o en el mejor de los casos, es necesario optimizar rutinas lo que finalmente

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

implica más tiempo programando. Aparte de una buena selección de memoria del controlador, también es sumamente importante tener en cuenta el manejo de la periferia, es decir, contar con suficientes I/O (inputs, outputs) para poder controlar físicamente el reactor (abrir y cerrar válvulas, encender resistencias, tomar lecturas de los sensores, etc).

Para los reactores y en general para una gran cantidad de procesos industriales que involucran lógica y automatización, los controladores que más se pueden ver son los PLC (Programmable Logic Controller), estos son dispositivos electrónicos que internamente son tarjetas electrónicas con una construcción de gran robustez que se ha ganado fiabilidad en la industria por no ser afectado debido al gran ruido que puede haber en una planta a causa de los motores, variadores, gran cantidad de dispositivos y aparatos conectados a la red eléctrica y demás dificultades que puede sortear esta tecnología.

Mario Tocado Orviz de la facultad de ingeniería eléctrica, electrónica y automática de la Universidad Rovira I Virgili en su ensayo *Automatización de un proceso industrial del sector químico* hace toda una documentación para la automatización de un reactor, en ella detalla toda la instrumentación necesaria para llevar a cabo la labor, desde una introducción a los reactores, pasando por sensores y controladores hasta tener todo el equipo necesario de control que es requerido.

Los sensores que menciona Mario Tocado son principalmente de temperatura o más conocidos como termocuplas, en el caso de este reactor, la documentación menciona particularmente una PT100 que es básicamente un sensor que entrega una señal eléctrica por cada grado Celsius como la mayoría de transductores, en este caso la respuesta del sensor no es lineal, por lo que se utiliza un acondicionamiento de la señal que la linealice o la lleve a una señal interpretable para el controlador. Adicionalmente se hace mención de sensores de nivel, que bien pueden ser ultrasónicos o réflex, sensores de presión y actuadores tales como son electroválvulas, válvulas servo pilotadas, motores y demás.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La selección que se hizo del controlador fue un PLC, como se ha dicho anteriormente estos son los dispositivos electrónicos más confiables a nivel industrial y que tienen mayor versatilidad a la hora de involucrar muchos aspectos de planta, como puede ser la administración por plataforma MES o SAP, conexión directa con bases de datos para ordenes de producción, seguridad, gestión energética y demás servicios muy útiles y que se han vuelto requerimiento de las empresas a la hora de solicitar el servicio; en este caso el PLC fue un SIMATIC S7 de siemens, marca alemana y mundialmente reconocida por sus excelentes prestaciones. Además de la CPU y sus entradas y salidas de modulo compacto, también se anexaron módulos para los sensores analógicos y demás interacciones que no son posibles desde la CPU compact.

Comparando el proyecto de la Universidad de Rovira con el reactor automatizado, el método es básicamente el mismo y los elementos utilizados son prácticamente los mismos, difiriendo únicamente la cantidad y marca en la mayoría de los dispositivos, incluso el orden de programación demostrado en el artículo llega a tener semejanza con el de Mitsubishi en términos de agrupamiento de funciones y rutinas, teniendo en cuenta que las operaciones son diferentes debido a que los software también lo son.



Figura 3: Reactor de pirólisis para laboratorio. Tomado de (Tomption Company).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto fue desempeñado siguiendo instrucciones del ingeniero Yuber Marin según una secuencia lógica que ayuda a optimizar tiempos en las entregas de las diferentes etapas, para ello se tiene la siguiente distribución.

Tabla 2

Cronograma de las actividades destinadas al proyecto y ejecutores a cargo.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PROYECTO REACTOR DE PIRÓLISIS			
ACTIVIDAD	TIEMPO ESTIMADO	EJECUTOR(ES)	CARGO(S)
<i>Dimensionamiento de elementos y pedidos a distribuidores</i>	45 Días	Luz Stela Jaramillo, Yuber Marín	Gerente comercial, Gerente de proyectos
<i>Diseño de planos eléctricos</i>	7 Días	Daniel Nieto Mora	Practicante de Ingeniería
<i>Montaje del gabinete eléctrico</i>	5 Días	Javier Holguín	Técnico Electricista
<i>Programación del PLC</i>	10 Días	Daniel Nieto Mora	Practicante de Ingeniería
<i>Programación de la HMI</i>	5 Días	Daniel Nieto Mora	Practicante de Ingeniería
<i>Puesta en marcha y pruebas</i>	5 Días	Daniel Nieto Mora	Practicante de Ingeniería

De esta forma se pueden realizar tareas de forma simultánea que no involucre algún estado particular de otra actividad (sin empezar, en desarrollo, terminada), para así tener en el menor tiempo posible el mayor número de tareas finalizadas. Algunas tareas que dependen de otras son las que están directamente ligadas al código, como puede ser la programación de la HMI, que requiere las variables del código del PLC para poder enlazar animaciones y acciones a los gráficos diseñados, sin embargo, existe la posibilidad de comenzar el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

desarrollo estético de la interfaz, dejando para el final el enlace con el PLC. En esta ocasión no se obró bajo este método debido a que las dos tareas estaban bajo mi responsabilidad, y cuando esto sucede no es óptimo trabajar dos códigos a la vez.

Otra tarea que se ve restringida es el montaje del tablero eléctrico, ya que los planos que son diseñados por el área de ingeniería deben estar terminados para comenzar dicha acción. El área de ingeniería debe encargarse de los planos porque estos guardan una estrecha relación con lo que se programa, las entradas y salidas deben coincidir para agilizar tiempos y evitar posibles inconvenientes durante la puesta en marcha, además los voltajes y corrientes deben ser verificados por el ingeniero para asegurar que los dispositivos solicitados por el área comercial son los apropiados y desempeñaran su función sin problema alguno.

3.1 Diseño de planos eléctricos

Los planos eléctricos son el primer paso para llevar a cabo cualquier proyecto, estos son los que dan una idea muy sólida del sistema que se tiene a cargo y las posibilidades de control, ya que pueden haber señales discretas y continuas o analógicas, un cambio como este puede hacer que un programa deba ser reestructurado totalmente.

Para la empresa solicitante se realizaron los planos en Excel bajo guías y estándares puestos a mi servicio por la empresa, lo que aumentan la velocidad de diseño, aunque actualmente la empresa utiliza un software de gran acogida y altamente eficiente para el diseño de planos, el Eplan Electric P8 versión 1.17, la diferencia en tiempo puede ser de 1 a 10 en programas hechos desde cero, es decir, sin guías o reutilización de otros proyectos, y reutilizando otros proyectos puede ser aún mayor la ganancia de tiempo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el folder que contiene la documentación de todo el proyecto fueron entregados los siguientes ítems en la sección de planos eléctricos del reactor:

- Portada.
- Guía de símbolos.
- Alimentación.
- Potencia.
- Control.
- Diagrama del rack del PLC.
- Conexión de dispositivos (Variadores, PLC, módulos, HMI)
- Diagrama de entradas y salidas digitales.
- Diagrama de entradas y salidas analógicas.

Todos estos ítems deben estar revisados por una persona diferente al diseñador para evitar conexiones erróneas que retrasan bastante la entrega del proyecto.

El diseño en esta etapa fue orientado a la nomenclatura y distribución de los equipos, en los planos se hace una organización lógica y estándar de los dispositivos, en donde se tratan de agrupar los equipos por potencia y funciones, dándoles un direccionamiento adecuado que cualquier persona pueda entender a la hora de hacer una revisión con planos en mano, lo que puede parecer innecesario ya que cualquier distribución y nomenclatura puede funcionar desde que la conexión sea la misma, pero un tablero que no tiene un orden adecuado es susceptible a daños en el momento de un cambio o revisión, porque obliga a tener una persona con un alto grado de experticia en interpretación de cableado, y si no se cuenta con un profesional de este perfil, es un riesgo modificar las conexiones.

La nomenclatura utilizada por la empresa es de marcación de cable y marcación de elemento, para la marcación del cable se antepone el número de la página, seguido por el código del elemento y finaliza con el número de la fila, de tal forma que un cable ubicado en la página 14 y la fila 7, debe estar marcado como 14L7, donde L es el indicativo para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cables, además rápidamente se puede entender que este es de control, ya que hay rangos de páginas designados previamente.

3.2 Diseño del programa en Gx Works 2

Gx Works 2 es la herramienta ofrecida por MELSOFT (Mitsubishi Electric Software) para la programación de sus PLC que van desde los FX, que son una gama media y media-alta, hasta la serie Q que son las CPU más potentes con las que cuenta Mitsubishi en el campo de la automatización industrial.

El programa para el reactor fue desarrollado en lenguaje Structured Ladder, que permitió programar todas las rutinas en grupos determinados, siempre buscando el orden y un método coherente de trabajo, que sea fácil de entender por otra persona a la hora de tener que hacer modificaciones, se hace mucho énfasis en estos, ya que es muy frecuente tener que hacer modificaciones en el código en el futuro, ya que las máquinas pueden cambiar sus puntos de operación, o la empresa quiere contar con más salidas o una secuencia diferente por ejemplo, por este motivo es importante dejar todo documentado a la perfección y con un orden lógico.

Las rutinas utilizadas fueron las siguientes:

- Principal:** En este POU, como es llamado cada 'folder' de secuencias en el software, se realiza el código de mapeo de todas las entradas a una variable interna del sistema o marca, que es una M para los bits, es decir la periferia relacionada con las entradas digitales y un INT o Word para lo que es lectura de variables analógicas que en el PLC llegan en forma de conteos, es decir, un número del 0 a 32760 aproximadamente o desde -32760 a 32760 dependiendo de la configuración del canal de lectura y el transductor que envía la señal,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

para el caso del reactor se leyeron todas las variables de 0 a 32760 y no se hizo en este POU sino en el de Análogas.

En esta rutina también se hacen algunos movimientos a variables de memoria de la HMI, como son la transición de una pantalla a otra, esta acción se hace moviendo un número desde el PLC a una Word de la HMI, este número hace referencia al número de pantalla que quiero ver, desde el GT Designer, al momento de crear las pantallas de navegación principales, se les asignó a cada una un número que inicia en 1 y va sumando 1 a cada pantalla nueva, de esta forma la tercer pantalla que se creó por ejemplo, esta numerada como 3, y al momento de mostrarla se debe mover el número 3 en binario al byte de memoria que controla esta operación en la pantalla (ver apéndice B).

- **Condiciones OK:** Las condiciones OK es en donde el programa verifica como está el equipo en lo que son situaciones de emergencia, aquí se verifican los paros de emergencia, los stop y las alarmas que experimenta el reactor en el momento. En caso de que haya presencia de una alarma crítica o que pueda convertirse en ella, las condiciones OK, mantienen desactivada una bandera que es indispensable para comenzar a operar.

- **Análogas:** En el POU de análogas está el mapeo y escalización de las lecturas del PLC. Los transductores arrojan un estímulo eléctrico a la entrada del módulo analógico y la CPU lo lleva a una variable INT en forma de conteos de 0 a 32760, en donde 0 corresponde a 4 mA y 32760 son 20 mA o la máxima intensidad de señal. La escalización del canal leído es la operación en donde se llevó la lectura a valores ingenieriles, es decir, en el caso del sensor de presión de vacío por ejemplo, los conteos eran una presión, pero la CPU los lee como un número simplemente, para ello es que se devolvieron esos conteos a un valor en términos de presión de vacío, en ese caso de -10 a 10 bares y luego se llevó a pulgadas de mercurio que era lo requerido por el cliente final, esto con unas simples operaciones puestas en el código. Así mismo se hizo con las termocuplas, el valor de 0 a 32760 se llevó a una escala

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

dependiendo de la termocupla, en donde una de ellas operaba en un rango de 0 a 400 °C aproximadamente según el fabricante, dato es sumamente importante para poder hacer una regla de correspondencia, en donde 0 mA son 0 °C y 20 mA son 400 °C, o es lo mismo que decir que 0 °C son 0 conteos en el PLC, y 400 °C son 32760 conteos, y con esta última información es que se hicieron los cálculos de la escalización y se trabajó con variables reales para poner puntos de alarmas, puntos de operación y demás.

- **Secuencia:** Esta rutina es la que contiene toda la información del proceso en sí, se puede decir que las demás son la preparación de todo el entorno y la verificación de que el sistema está en un ciclo de control como el que se planeó.

De esta rutina no se puede dar mucho detalle ya que los parámetros de operación y secuencias son confidenciales, pero de manera general lo que se hizo fue, luego de evaluar un arranque seguro y que el operador de Start al reactor, se entra en la primera de las etapas que es Vacío, en ella se abren las válvulas de paso de agua para mantener ciertas partes del reactor a una temperatura baja, estas son las que involucran el producto final, ya que este debe pasar de la temperatura de ebullición a condensarse para quedar almacenada, labor que se logra enfriando el fluido al pasar de la parte cálida a el intercambio con el agua que fluye por la chaqueta. La etapa de vacío termina cuando el sensor marca de forma estable que la lectura ha llegado a un valor de base o setpoint, la estabilidad de esta señal se evalúa durante 20 segundos y si se mantiene, automáticamente el reactor para a calentamiento.

En calentamiento se deben mantener las condiciones de vacío, es decir, el paso del agua debe seguir existiendo y la válvula proporcional ubicada entre el tanque de materia prima y la tubería hacia producto terminado, actúa proporcionalmente a la temperatura en la tubería mencionada ayudada de una termocupla que censa desde 0 °C a 120 °C, rango suficiente teniendo en cuenta que esta sección del reactor fue diseñada para una temperatura no superior a 60 °C, si se llegara a presentar una temperatura así en este lugar, el reactor inmediatamente pasa a una etapa de enfriamiento que se describe más adelante.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El objetivo de calentamiento es comenzar con el switcheo en el encendido de la resistencia a través de un relé de estado sólido, este elemento sirve como obturador como cualquier otro relé pero tiene la cualidad de que funciona con semiconductores tales como diodos, transistores y demás que no solo prolongan la vida útil del elemento sino que tienen una respuesta mucho más rápida.

La secuencia que enciende la resistencia fue diseñada a través de un PID acoplado a un PWM, una estrategia muy interesante que permite a una señal continua convertirse en discreta y más importante aún, aplicar un control ON-OFF básico que de fondo es manipulado por un PID que es mucho más robusto e interpreta a través de un lazo cerrado como se encuentra el sistema, la rutina que realiza específicamente esta función es PID temperatura de reacción y PID temperatura de separación.

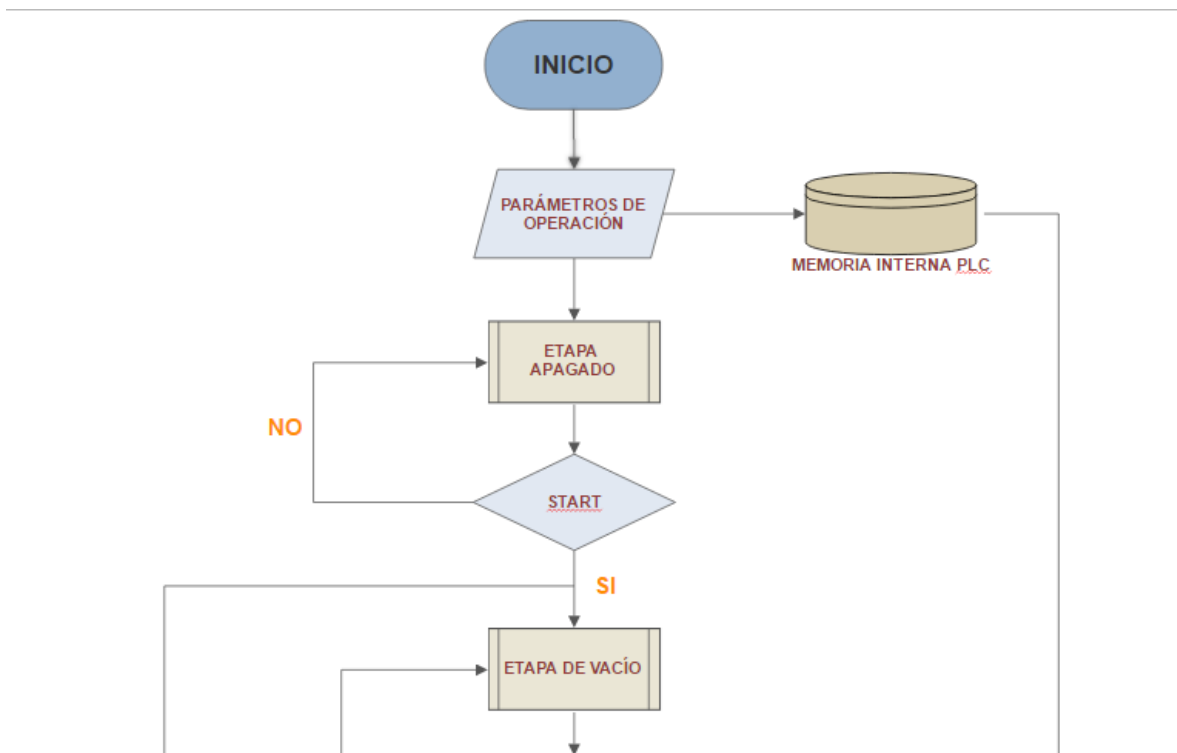
La temperatura se eleva hasta X °C determinados por el operador, esto debe hacerse en un tiempo menor a una hora y media pero no se puede calentar demasiado rápido, en cualquiera de estos casos el producto final no tendría propiedades deseadas y el proceso se torna peligroso ya que se forman grumos de materia prima y obstruyen la tubería, de ahí radica la importancia de un controlador robusto bien acondicionado y con una realimentación rápida.

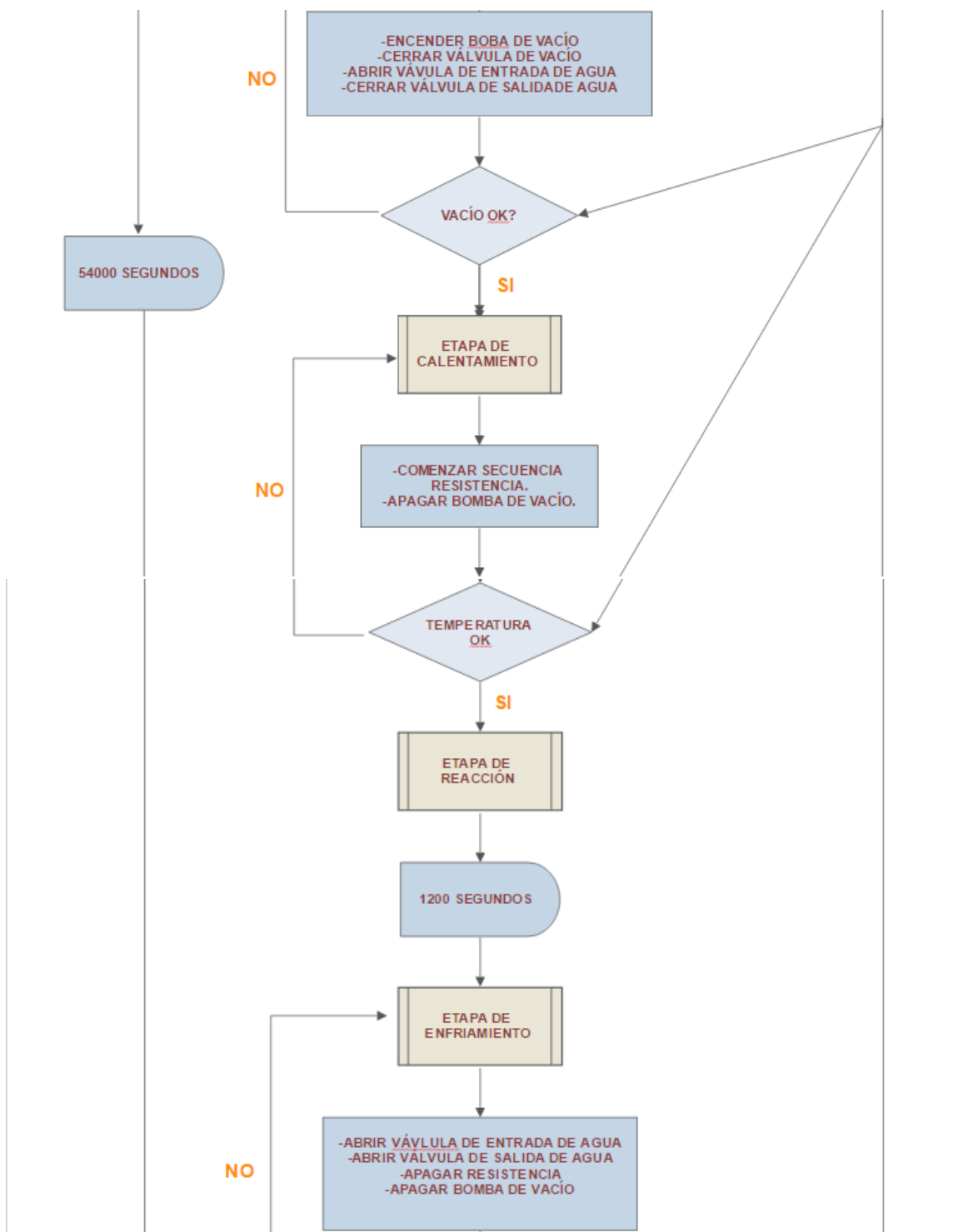
Sigue el proceso con la etapa de reacción al ser alcanzada la temperatura de operación, en esta etapa únicamente se mantiene la temperatura, se mantienen las condiciones y se espera hasta que el tanque de producto final obtenga el nivel establecido, siempre monitoreando todas las variables para reaccionar ante una situación de emergencia.

La etapa de enfriamiento es la que más análisis involucro junto con los ingenieros de la empresa que contrató el proyecto, ya que esta no es solo la etapa preliminar, sino que también es la etapa a la que se acude en cualquier situación de emergencia, bien sea en una

alarma crítica o un paro de emergencia. Inicialmente se pensó en solo dejar pasar el agua por la tubería y hacer una secuencia de ingreso y salida para enfriar el reactor, pero durante las pruebas a punto se vio que el choque térmico era muy peligroso, entonces se decidió anular la secuencia de abrir y cerrar válvulas y dejar un flujo continuo que mantuviera una transferencia térmica constante, además en enfriamiento la secuencia de encender la resistencia es totalmente bloqueada, ni siquiera desde el control manual se puede encender para evitar el error humano.

Cuando el reactor baja a temperaturas de riesgo inferior, es decir por debajo de los 80 °C en el tanque de materia prima (el tanque que alcanza mayores temperaturas), el reactor pasa a apagado, aquí se cierran las válvulas, se deja apagada la resistencia, la válvula proporcional se cierra del todo y se puede iniciar un bache nuevo desde el punto de control, ya que primero se debe ingresar materia prima y para esto se requieren procedimientos ajenos a la automatización.





 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

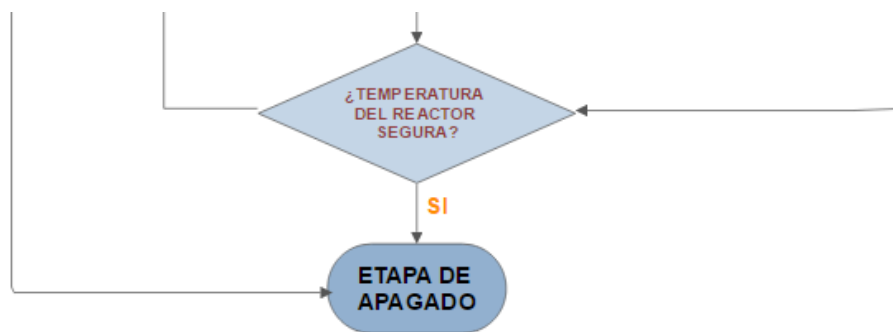


Figura 4: Diagrama de flujo del proceso de reacción.

- **Alarmas:** En alarmas permanentemente se monitorea que no hayan condiciones inseguras en el proceso, lo que se hace básicamente es comparar los parámetros de operación con las lecturas actuales del proceso, predeterminadamente existen unos rangos de temperaturas y presiones que no se deben dar por ningún motivo, si la variable de proceso comienza a acercarse a estos valores, inmediatamente se saca la alarma en la HMI y de ser necesario se realiza acción directa sobre el proceso sin intermedios del operador. Las alarmas programadas fueron:

- ***Vacío no alcanzado en el tiempo.***
- ***Vacío por debajo de lo establecido.***
- ***Temperatura alta en el reactor.***
- ***Temperatura alta en el condensador.***
- ***Cantidad materia prima insuficiente.***
- ***Nivel de producto final muy alto.***
- ***Temperatura de separación fuera de los rangos máximos o mínimos.***
- ***Nivel en el tanque de materia prima muy bajo.***
- ***Paro de emergencia activado.***

- **Salidas:** Las salidas son el mapeo de las secuencias hacia el campo físico, se hace tal cual en principal, solo que aquí se lleva al bit de salida todo un resultado de lógica para cada actuador, para ayudar a mapear la salida se puso individualmente a las salidas un bit de secuencia, este es prácticamente el que se mueve a la periferia y se utiliza así por orden y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

para buscar errores rápidamente, además cualquier cambio efectuado lo envuelve el bit secuencia y no hay que hacer modificaciones en la salida directamente.

- PID Temperatura de reacción:** Las rutinas de PID funcionan todas de la misma forma (ver apéndice D), el programa GX Works tiene unos bloques de funciones o lo que viene a ser equivalente a librerías en otros código o toolbox, estos se utilizan para hacer tareas repetitivas o complicadas. En el caso del PID existe un bloque de función llamado PIDfx que viene en dos versiones, la reducida y la que permite mayores cambios en el controlador, para este proyecto se utilizó la más extensa ya que la otra versión no respondió bien en pruebas.

Lo que se debe hacer con este FB es ingresar el setpoint, es decir una temperatura a la que se quiere llevar el sistema con lazo de control cerrado, luego se ingresa el byte que tiene la lectura actual de esa temperatura, lo que sería cerrar el lazo y las variables de todo controlador PID que son el valor proporcional, integrativo y diferencial que en este caso fue despreciado ya que no se requerían cambios bruscos que es la función del derivativo.

El valor proporcional e integrativo se seleccionó de forma empírica, mientras se hacían las pruebas se ensayaban diferentes valores de forma controlada, siempre con el paro de emergencia a la mano y con el equipo de seguridad correspondiente (extintores, máscaras, guantes, bata y demás), cuando los valores se ajustaban se tomaba nota de ellos hasta finalmente tener un punto de operación óptimo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas en campo con el reactor y el grupo de ingenieros químicos, mecánicos y de control fueron exitosas, finalmente se consiguió un muy buen volumen de materia final que según los investigadores químicos y de materiales, tenía las propiedades encontradas en las pruebas de laboratorio que se hicieron en un espacio más controlado y a menor volumen.

En el aspecto de control y gracias a la experiencia de Make Solutions, no se dejaron aspectos pendientes y el cliente final no tuvo queja alguna en las rutinas del programa ni en el funcionamiento de los equipos eléctricos.

Se encontraron algunos detalles que pueden ser mejorados en el equipo, uno de ellos es un medio de transferencia de calor más eficiente que la resistencia eléctrica, ya que este método no es el más eficiente para el proceso, se recomendaría calentar el producto a base de intercambiadores que no entren en contacto con el equipo y de no ser así, es indispensable añadir un agitador, idea que fue presentada en la etapa temprana de desarrollo y que no fue aprobada por el jefe de investigación, aun así, se considera que el agitador puede homogenizar más la temperatura de la materia prima y con ello se aumenta el tiempo de producción pero se reducen las pérdidas por producto quemado y se evita el riesgo de solidificación, razón suficiente para ser añadido el agitador.

Otro factor de diseño a tener en cuenta es generar un desnivel hacia el lado del producto terminado que disminuya los asientos de aceite en la tubería, ya que el vacío no ha sido suficiente para extraer el total de aceite y se requiere una ayuda extra para ello.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- El prototipo de reactor presentado para la pirólisis de aceite está listo para comenzar su comercialización, ya que no solo se extrae producto de la materia prima en una cantidad admisible para el mercado, sino que este producto cumple con las características que busca el sector que está interesado en el proyecto, además cuenta con reglamentación en RETIE y está bajo condiciones seguras de operación.
- Haciendo las mejoras que se proponen, el reactor puede aumentar su eficiencia considerablemente, cifras que no se tienen en este momento pero que de seguro son atractivas y al mostrarse al director de investigación de seguro consiguen el aval para ser puestas en marcha.
- El control suministrado puede tener un mejor alcance al poner equipos de mayor robustez al servicio, posiblemente en este prototipo sea algo sobredimensionado, pero al hacer una construcción para la producción en masa es algo indispensable para el proyecto futuro y la conexión a mayores niveles de la pirámide de la automatización como el nivel de gestión administrativo o ERP.
- Se recomienda que donde vaya a ser instalado el equipo, cuente con una red eléctrica muy estable, con protecciones contra rayos y transientes que hacen que los equipos electrónicos sufran daños permanentes, situación que se presenta sobre todo en el relé de estado sólido.

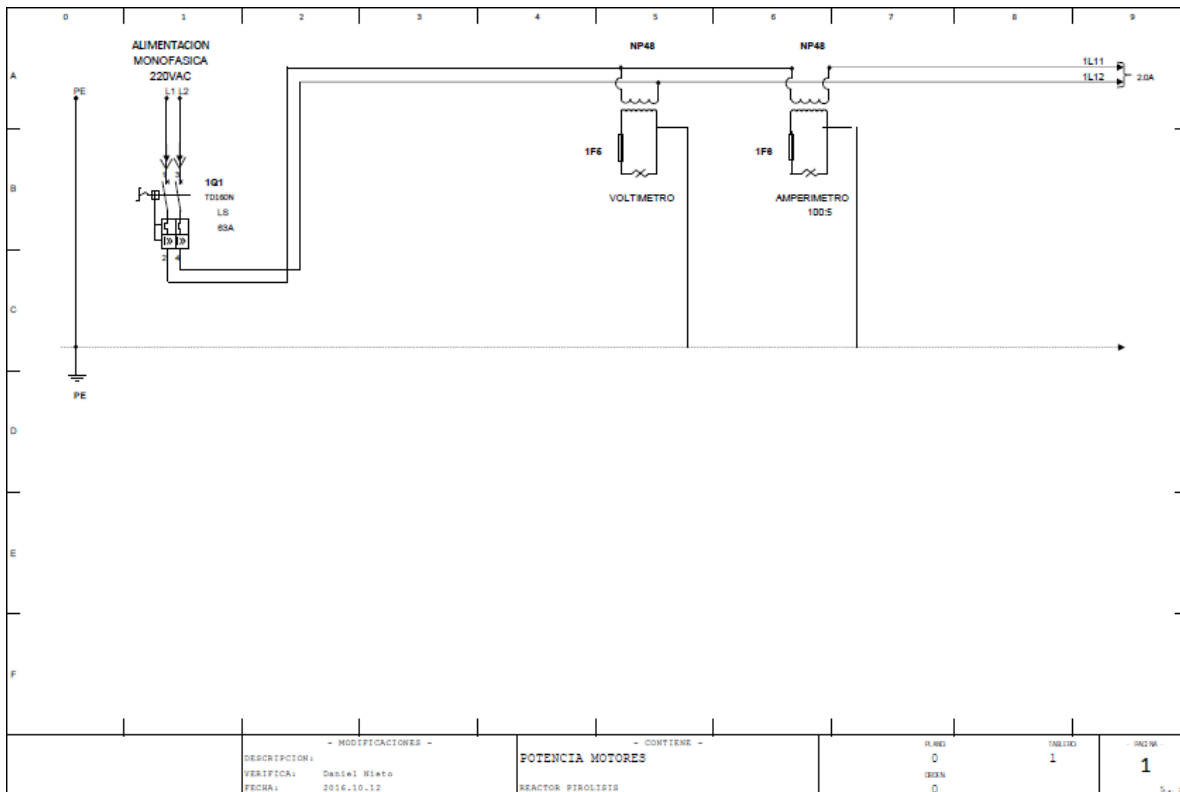
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

-
- Tocado, M. (2007). Automatización de un proceso industrial de una empresa del sector químico (Tesis de pregrado). Universitat Rovira I Virgili. Recuperado de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1100pub.pdf>.
 - Gómez, C. (2015). Tipos de reactores con sus características. Recuperado de http://www.academia.edu/11977961/Tipos_de_Reactores_con_sus_caracter%C3%ADsticas
 - Obando, G. (2015). Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS) (Tesis maestría). Universidad de Manizales, Manizales. Recuperado de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2590/informe%20final%20trabajo%20investigacion%20Gabriel_Obando_2016.pdf?sequence=1
 - Mendiburu, H. (2005). Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un Reactor Químico Continuo (CSTR) (Tesis de maestría). Pontificia Universidad católica del Perú, Lima. Recuperado de file:///C:/Users/DaNiEI/Desktop/MENDIBURU_HENRY_NEUROCONTROLADOR_DINAMICO.pdf
 - Cuevas, R. (2009). Introducción a los reactores químicos. Recuperado de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IntroReactores_10564.pdf

APÉNDICE

Apéndice A.



Alimentación monofásica que se hace pasar por un protector térmico denominado 1Q1 y sale a dar energía a todo el sistema, pasando por medidores analógicos de corriente y voltaje (amperímetro y voltímetro).

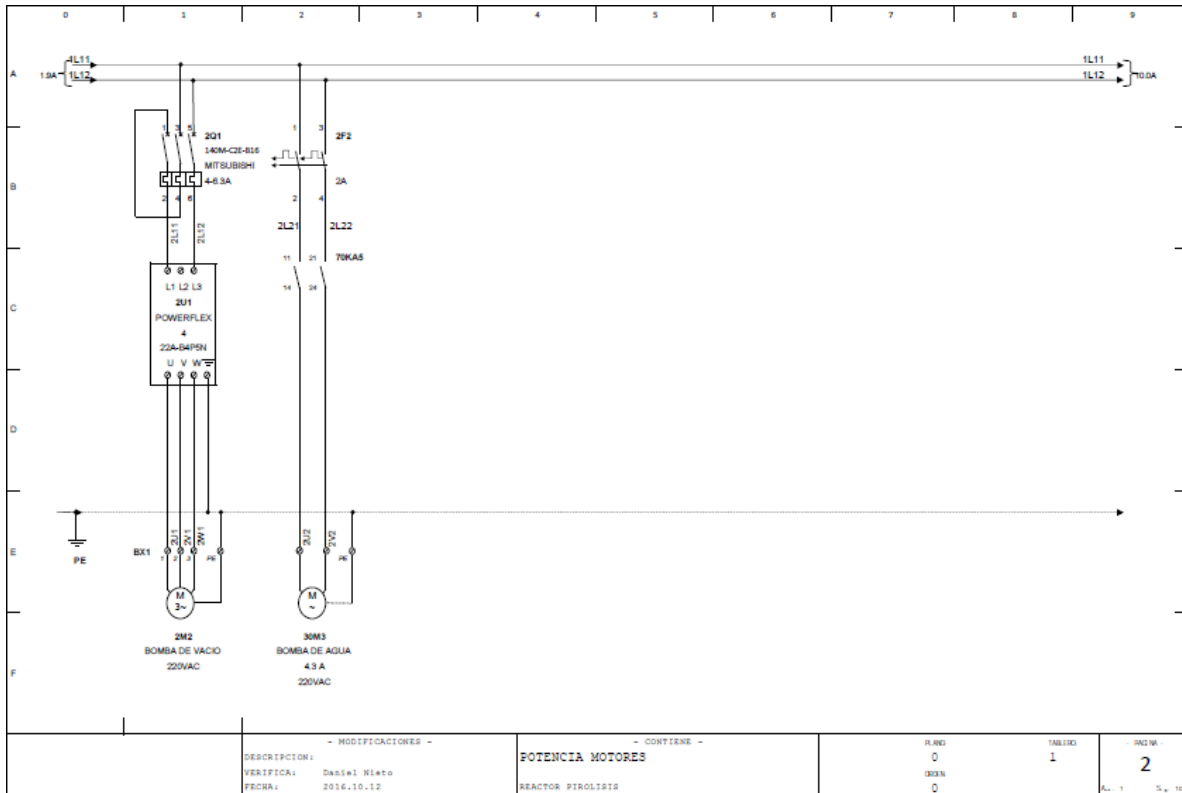
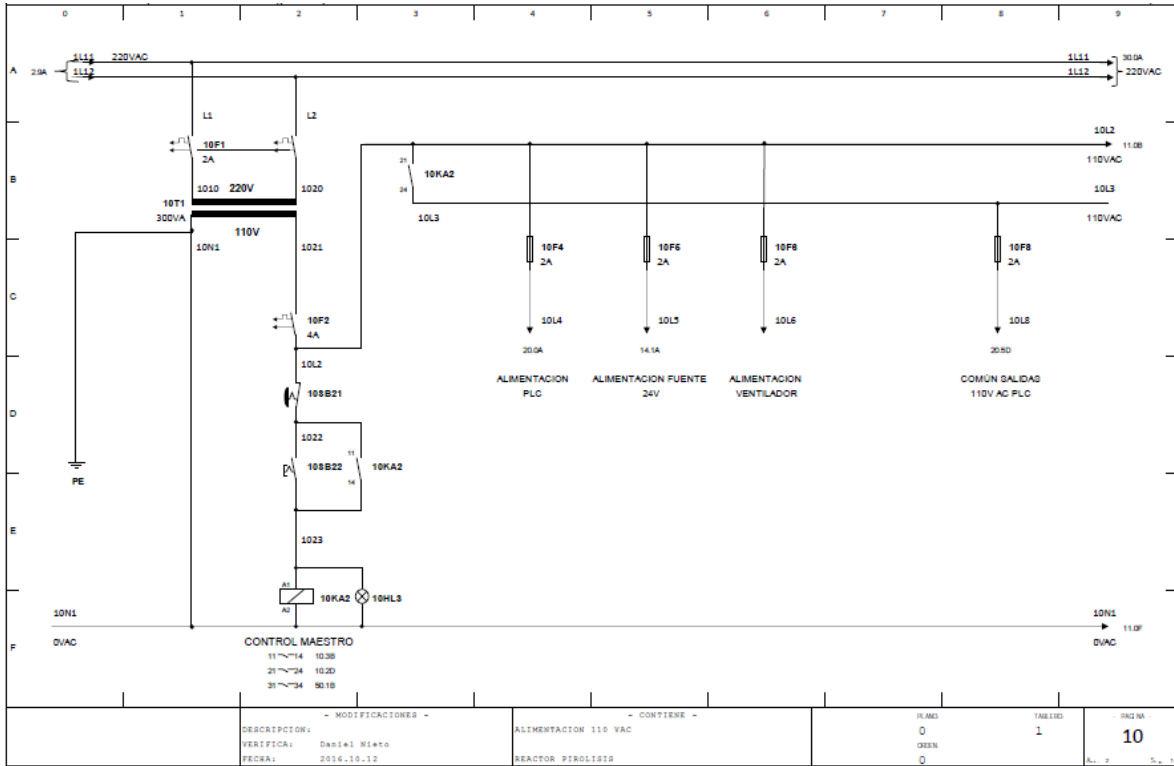
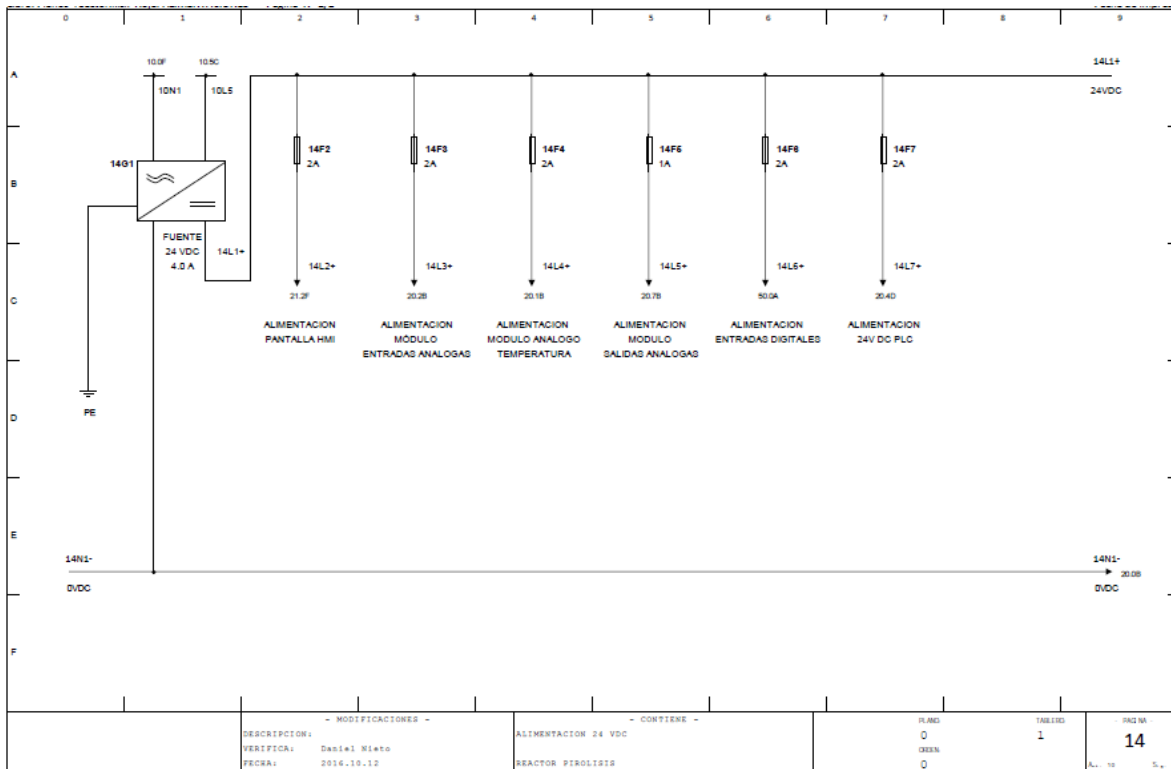


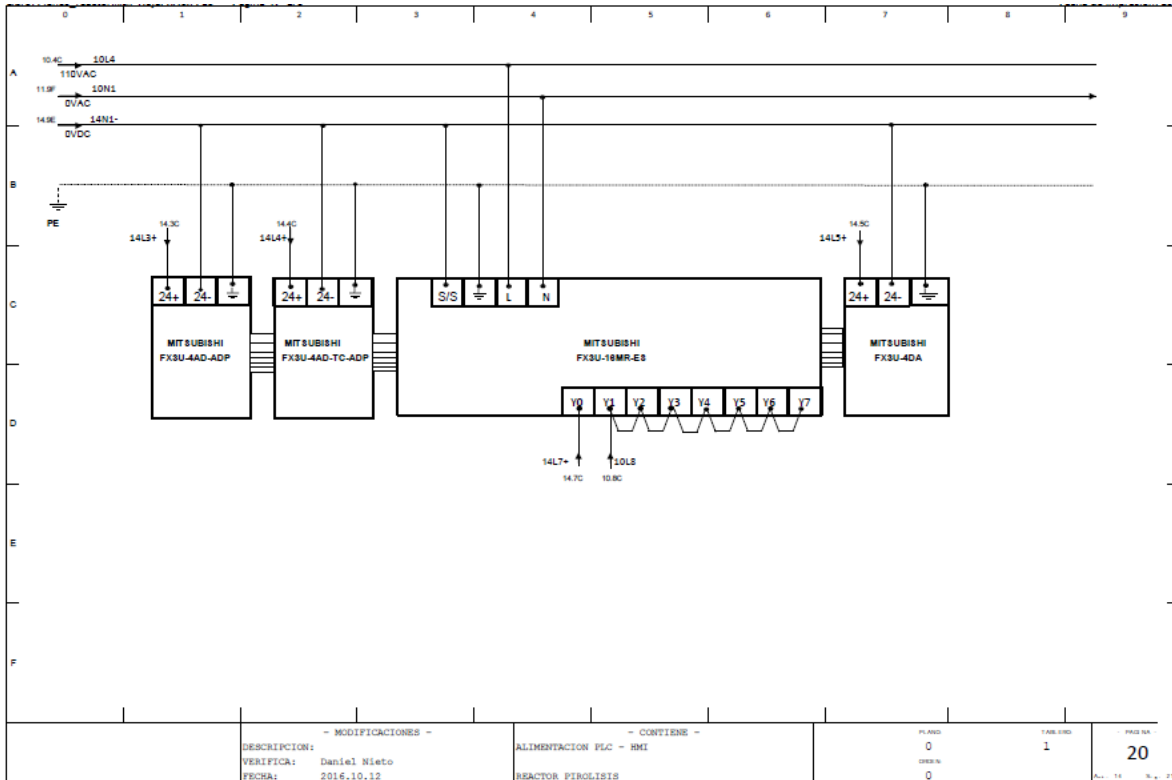
Diagrama de potencia donde se alimentan los motores del reactor, se pueden evidenciar dos que son, la bomba de vacío y la bomba de agua. La bomba de vacío es controlada por un variador de velocidad 2V1, y previamente se protege el sistema con el guarda motor 2Q1; para el otro elemento de potencia se emplea un disyuntor de 2 polos 2F2.



Los 220 VAC se llevan a un transformador que reduce el voltaje a 110 VAC, luego se hace un control que se suele llamar control maestro, que consiste de un paro de emergencia que deshabilita el suministro de los 100 VAC a los demás elementos como son el común de las salidas del PLC de la línea 10L8, las líneas 10L4, 10L5, 10L6 no pasan por control maestro y se protegen con los fusibles 10F4, 10F5 Y 10F6 respectivamente.

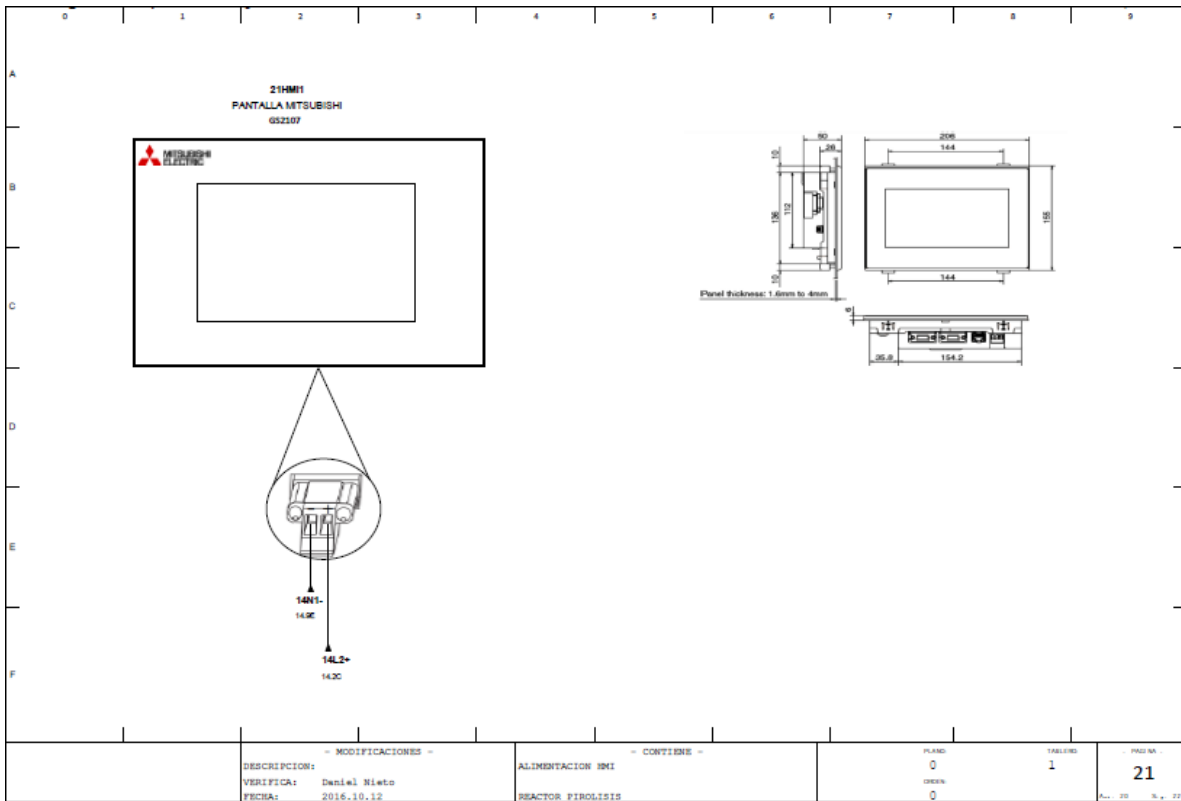


Se alimenta la fuente de 24 VDC y esta sale con la línea 14L1+ a los fusibles que protegen los elementos de 24 VDC como la pantalla y los módulos del PLC.



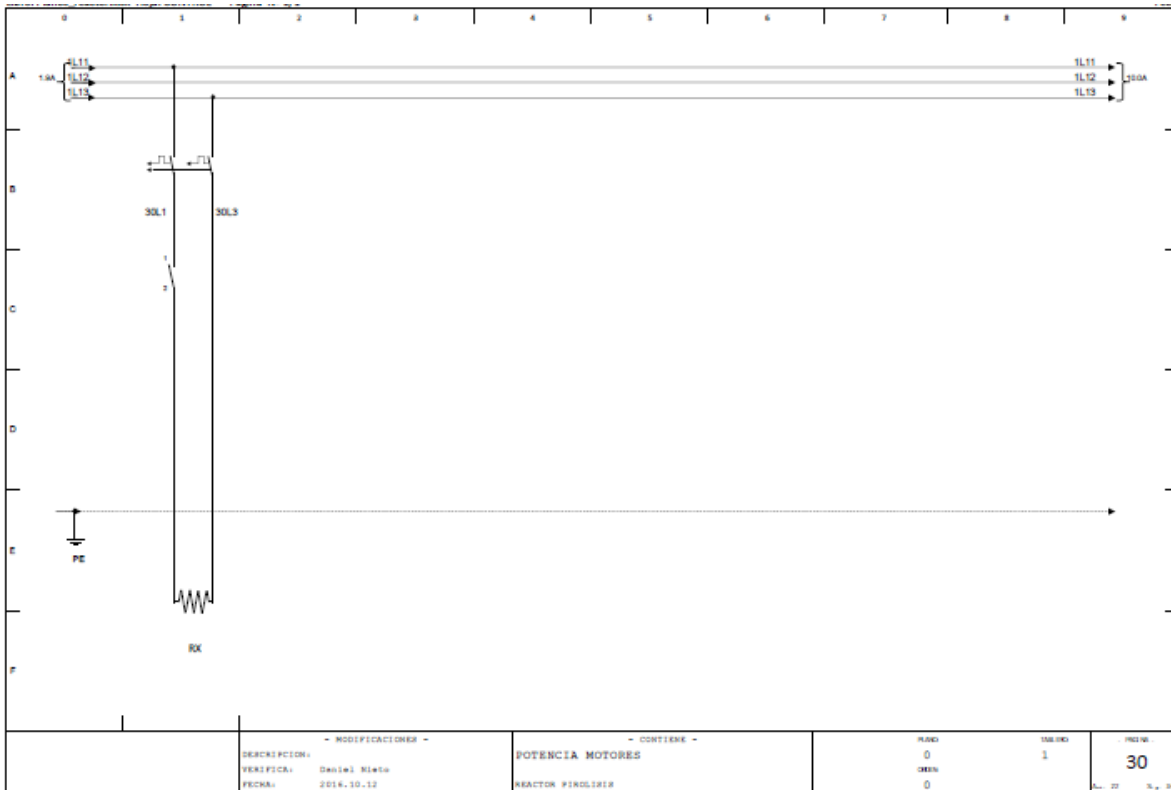
La página de rack del PLC sirve para ver una conexión rápida del PLC y los módulos, además permite ver la ubicación de los módulos respecto al PLC, lo que facilita a la hora de programar ya que el orden influye en el código.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

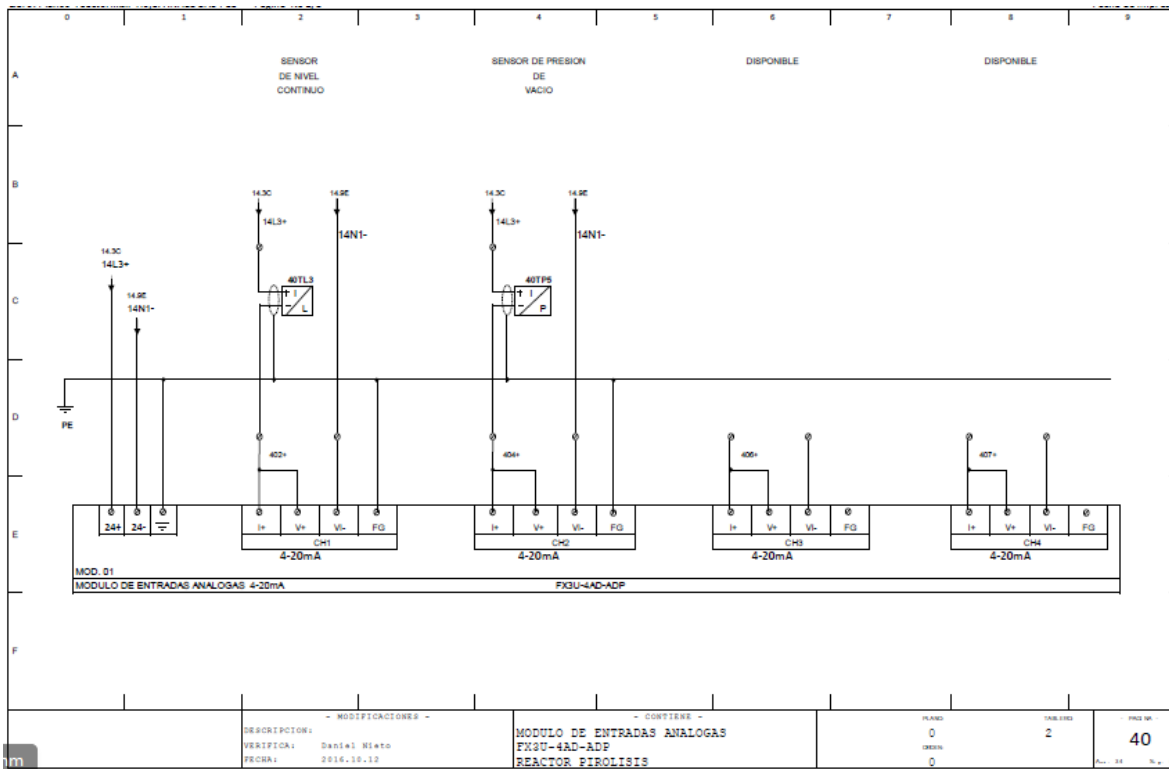


Conexión y esquema de la pantalla donde se detalla el tipo de alimentación y dimensiones del equipo.

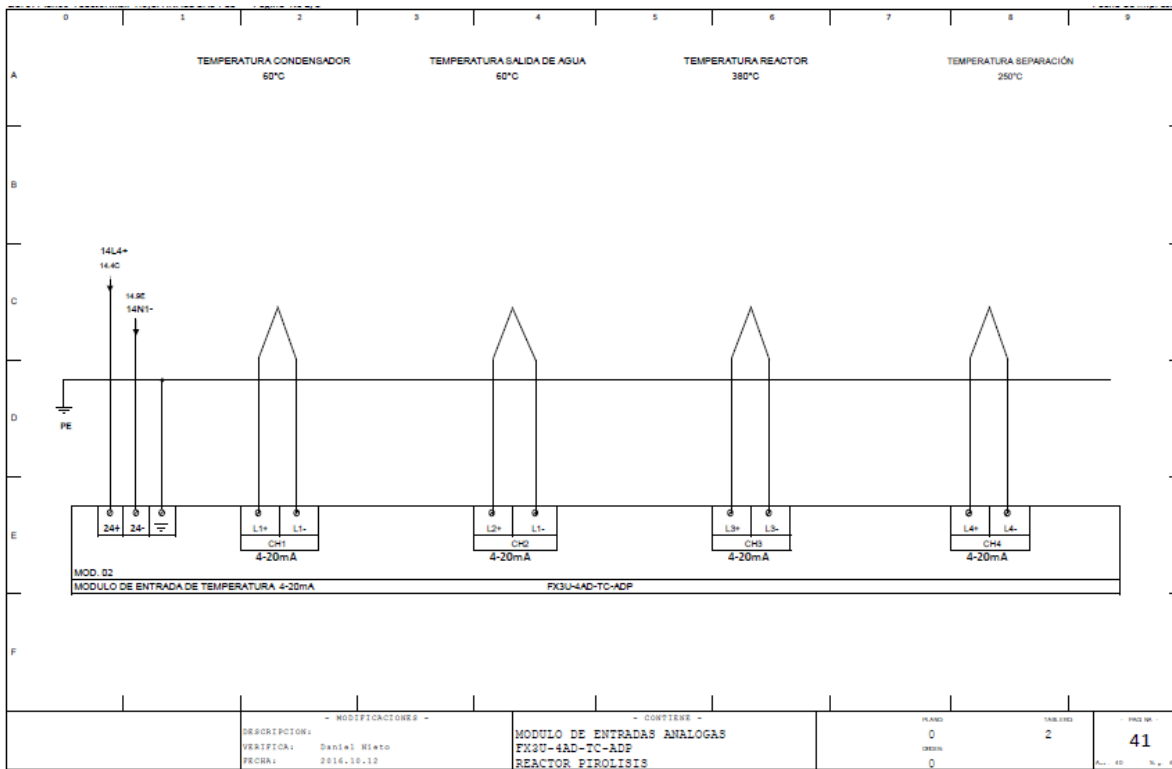
 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



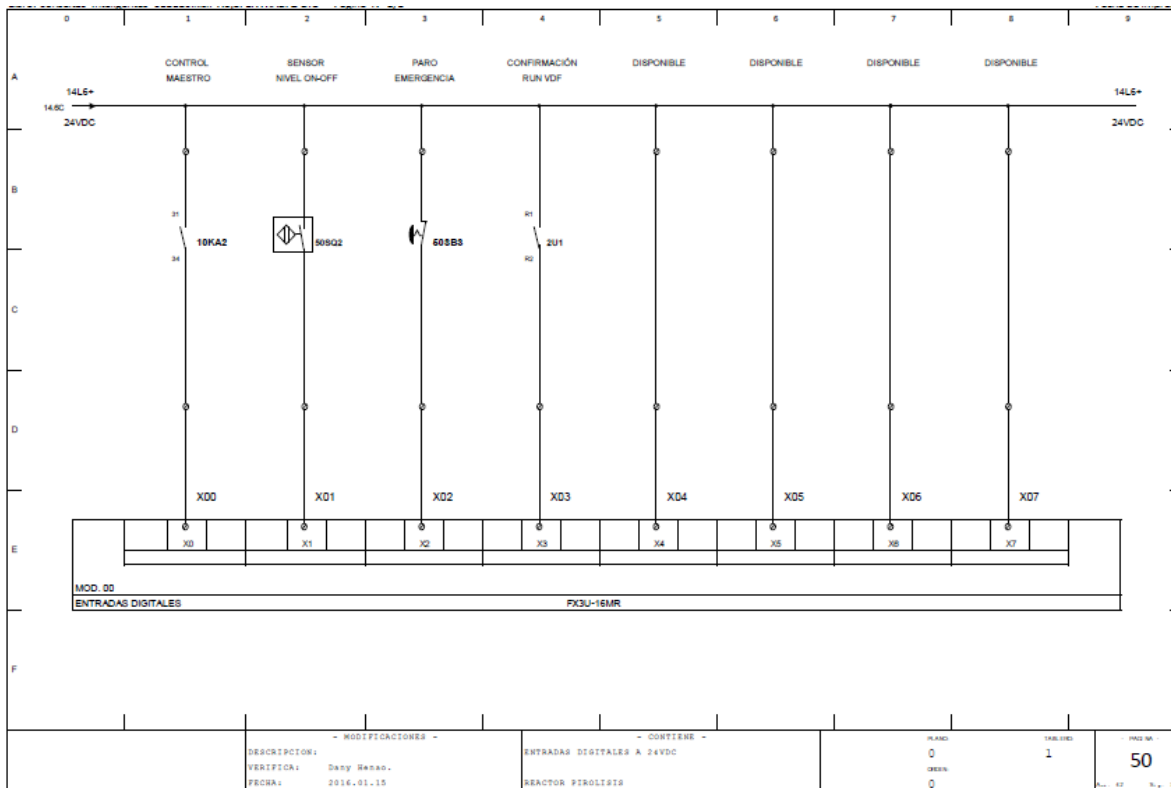
Página de control, en este caso solo aplica para la resistencia eléctrica protegida por un disyuntor de dos polos, además una de las líneas pasa por el contacto del relé de estado sólido para hacer el control ON-OFF.



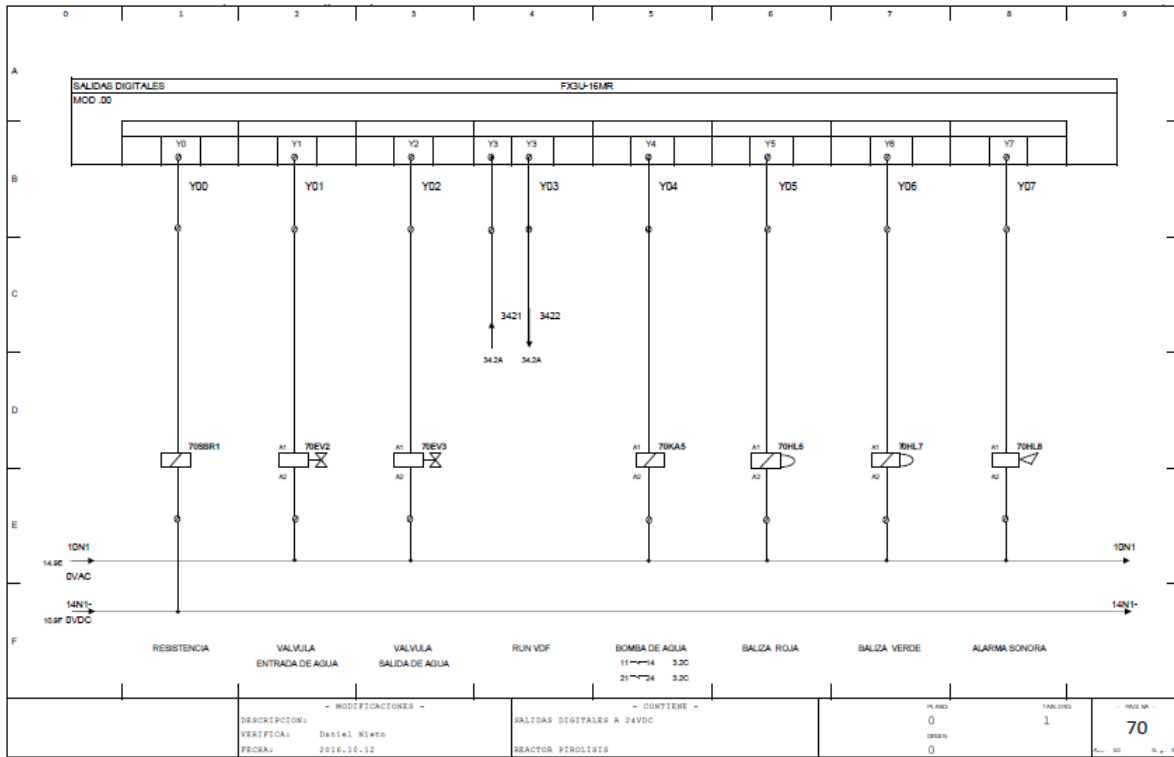
Planos de las entradas analógicas y la alimentación del módulo, se especifica la dirección del canal y la forma de conexión, directa o en bucle.



Conexiones de las termocuplas y el módulo especial para estas, cada canal especifica la capacidad del transmisor en °C.

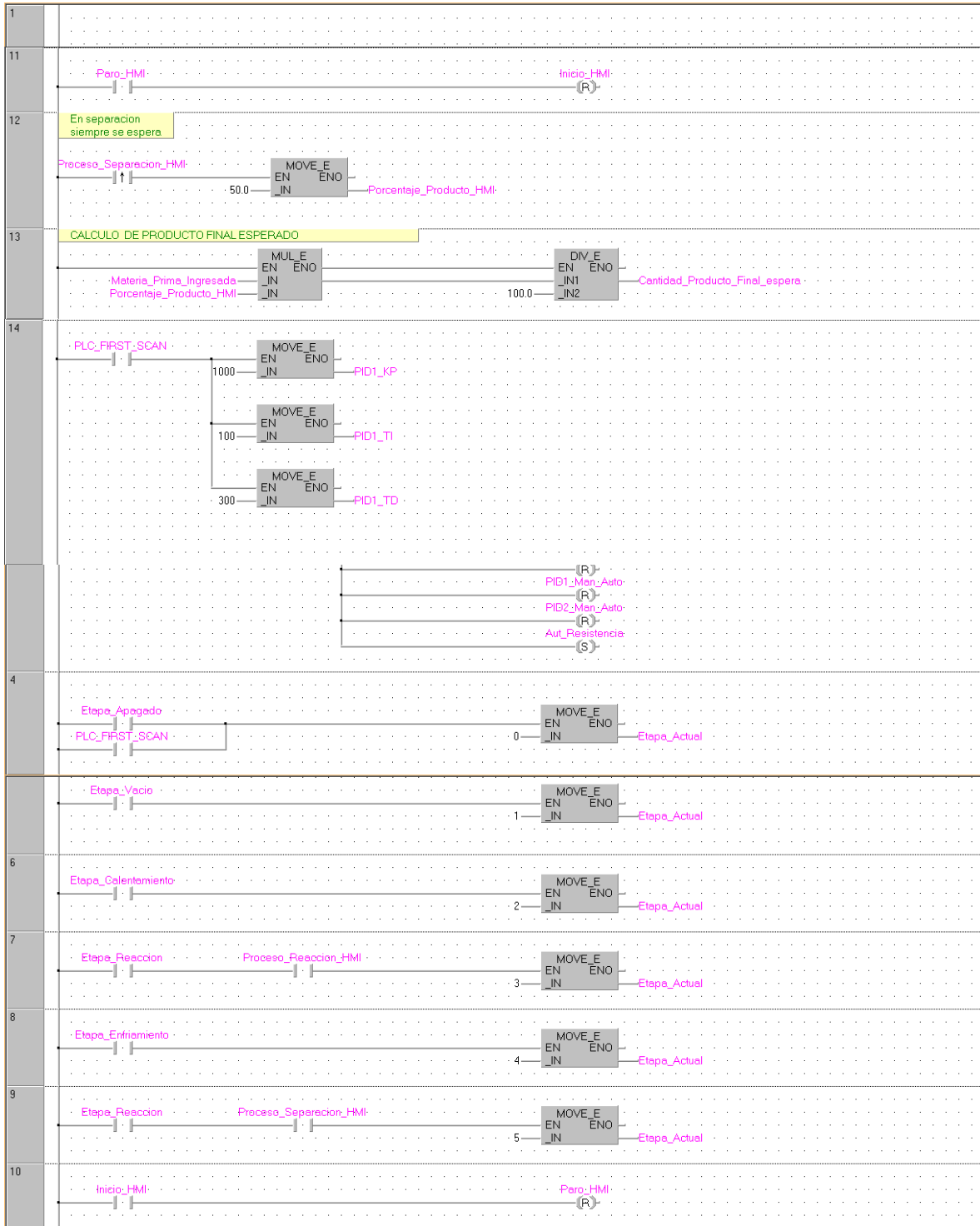


Entradas digitales al módulo principal del PLC, en donde está ubicada la CPU y memorias, se ve la conexión del control maestro en la entrada X0 del PLC, sensor de nivel discreto en la entrada X1, paro de emergencia en X2 y confirmación del variador en X3.

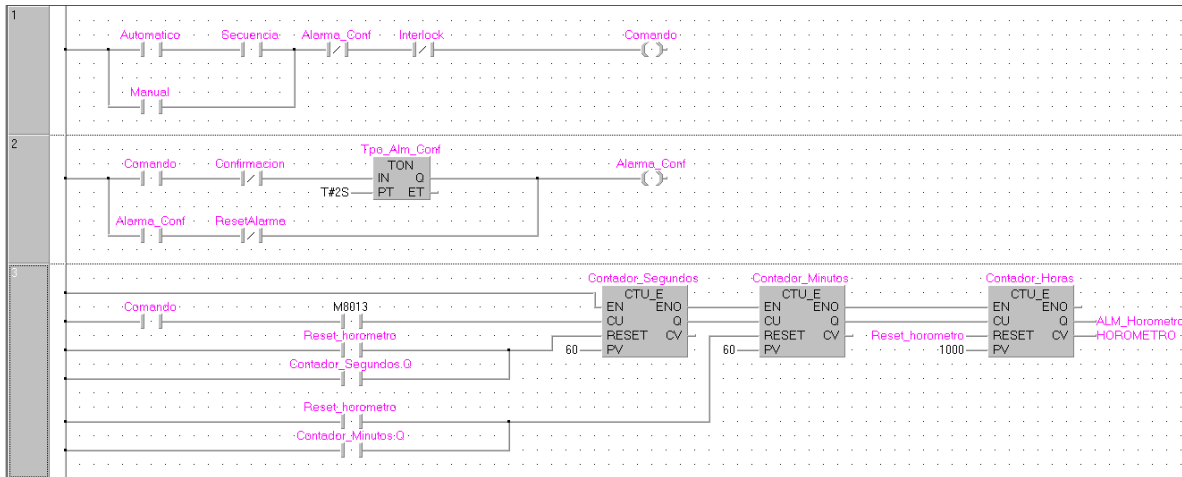


La página 70 contiene la información de las salidas del PLC que van de la Y0 a Y7 para un total de 8 salidas o un byte de salidas, que van a la resistencia, válvula entrada de agua, válvula salida de agua, Run del variador, bomba de agua, baliza roja, baliza verde y baliza sonora respectivamente.

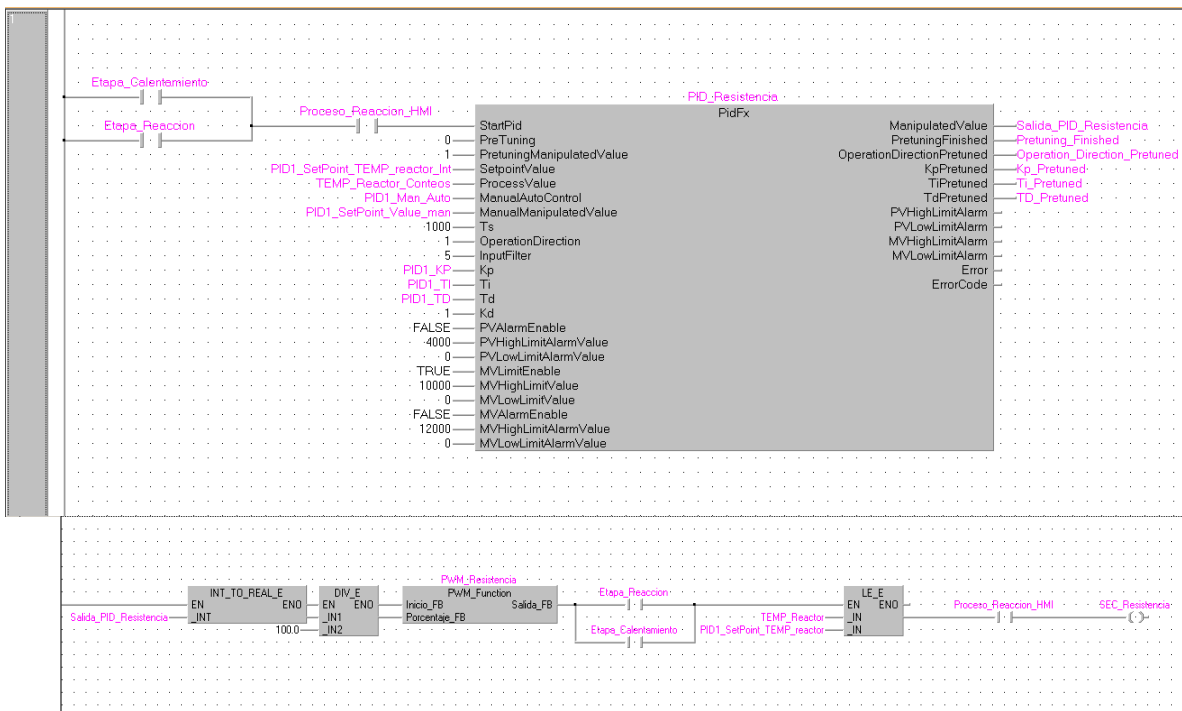
Apéndice B.



Apéndice C.

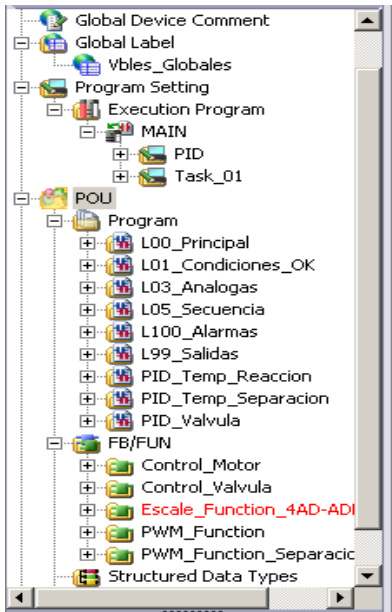


Apéndice D.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice E.



Árbol de estructura en que fue programado el PLC, en la carpeta PROGRAM, se encuentran todas las rutinas detalladas en el informe, las funciones FB/FUN son funciones especiales que facilitan tareas repetitivas y en TASK_01 se llaman las rutinas para que el PLC las ejecute.



INFORME FINAL DE
TRABAJO DE GRADO

Código	FDE 089
Versión	03
Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES

FIRMA ASESOR

PRIMERA ENTREGA DE INFORME FINAL
DE PRACTICA PROFESIONAL

FECHA ENTREGA: 27/02/2017

6:33 PM

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___

ACEPTADO ___

ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____