

AUTOMATIZACIÓN DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO

JAIME ANDRÉS HURTADO GIRALDO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2016

AUTOMATIZACIÓN DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO

JAIME ANDRÉS HURTADO GIRALDO

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR:
FIDERMAN MACHUCA, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2016

DEDICATORIA

A Dios por ser una guía en mi camino

A mi esposa e hija por su amor incondicional

A mis padres y hermanas por estar unidos a pesar de la distancia

A mis familiares y amigos por siempre esperar lo mejor de mi

AGRADECIMIENTOS

Quiero que esta tesis sirva para expresar un sincero agradecimiento a:

- ✓ A familiares y amigos que me colaboraron y animaron para hacer realidad este sueño.
- ✓ A los profesores Fiderman Machuca y Nilson Marriaga por su disponibilidad, apoyo y asesoría en la consolidación de este proyecto.
- ✓ A la escuela de Ingeniería Química, su grupo de docentes, personal administrativo y personal de laboratorio por brindarme un espacio para el aprendizaje de esta maravillosa profesión.
- ✓ A mis jefes y compañeros de trabajo por el aprendizaje y ayuda recibidos.

RESUMEN

El evaporador de doble efecto ubicado en la planta piloto de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Valle es uno de los equipos disponibles para el aprendizaje y práctica de la comunidad universitaria. Debido a fallas del sistema electrónico y modificaciones mecánicas previas, ésta valiosa herramienta se encontraba con poca funcionalidad. Con el fin de recuperar este equipo, en el presente proyecto, basándose en un inventario y diagnóstico iniciales, se propuso e implementó un nuevo sistema de control que ahora permite la operación del evaporador en modo automático y manual.

Para lograr esto, dado que no se encontró documentación, fue necesario empezar con la identificación y la búsqueda de especificaciones y manuales de los componentes del sistema, así como realizar el levantamiento de planos eléctricos y mecánicos. Después, se propuso un nuevo sistema de control mediante la elaboración de diagramas P&ID para la operación del evaporador de doble efecto en paralelo y contracorriente. En este punto, se hizo un análisis de los equipos faltantes y las modificaciones eléctricas y mecánicas necesarias para la puesta en marcha del sistema de control propuesto. Basándose en esta información, se efectuó la adquisición de los materiales y equipos requeridos y se iniciaron los trabajos necesarios para la implementación física del nuevo diseño.

Finalmente, se procedió a la programación del PLC y la HMI, haciendo un adecuado manejo de las señales provenientes de la instrumentación de campo, tomando como base un algoritmo desarrollado y haciendo pruebas del sistema con el fin de observar y corregir posibles errores en el programa. De esta implementación se destaca el control automático de Brix (Porcentaje peso a peso de azúcar en una solución acuosa) en el producto, para el cual fue necesario diseñar un sistema de medición basándose en la adquisición de datos de presión y temperatura.

Palabras Clave: evaporador de doble efecto, planta piloto, control automático, PLC, HMI.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	9
1. MARCO TEÓRICO	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 MARCO CONCEPTUAL	10
2. DISEÑO METODOLÓGICO	14
2.1 INVENTARIO Y DOCUMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	14
2.2 PRUEBA Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS	14
2.3 DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL	15
2.4 DISEÑOS ELÉCTRICO Y MECÁNICO DEL SISTEMA	15
2.5 SELECCIÓN Y COMPRA DE PLC, EQUIPOS Y MATERIALES FALTANTES	15
2.6 MODIFICACIONES ELECTRICAS Y MECÁNICAS	15
2.7 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE PLC E INSTRUMENTACIÓN	16
2.8 PUESTA EN MARCHA Y ENTREGA DEL SISTEMA	16
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	17
3.1 INVENTARIO Y DIAGNÓSTICO	17
3.2 PRUEBA Y MANTENIMIETO DE EQUIPOS	20
3.3 DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL	21
3.4 DISEÑOS ELÉCTRICO Y MECÁNICO DEL SISTEMA	26
3.5 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES ADICIONALES.....	27
3.6 MODIFICACIONES ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS	30
3.7 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA	32
3.8 PUESTA EN MARCHA Y ENTREGA DEL SISTEMA	41
4. CONCLUSIONES.....	43
5. REFERENCIAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evaporador de tubos verticales, circulación natural.	11
Figura 2. Modos de operación de evaporadores de múltiple efecto.	13
Figura 3. Control de motores, válvula solenoide y sistema de vacío	18
Figura 4. Subsistemas identificados en el evaporador de doble efecto	19
Figura 5. Soporte gráfico de mantenimiento y prueba inicial de equipos.	21
Figura 6. Diagramas P&ID del diseño de instrumentación propuesto	22
Figura 7. Algoritmo de control automático propuesto para el sistema de evaporación	26
Figura 8. Vistas elevadas tomadas del diseño mecánico del sistema.	27
Figura 9. Análisis de las modificaciones mecánicas hechas en tuberías	31
Figura 10. Ilustración de la programación en lenguaje KOP.	33
Figura 11. Representación en lenguaje KOP para manejo de entradas análogas	34
Figura 12 Prueba de señales de entrada y salida.	35
Figura 13. Resultados pruebas preliminares a sistema de medición de brix	35
Figura 14. Regresiones polinómicas para datos de la relación brix – densidad de sacarosa.....	36
Figura 15. Compensación por temperatura de la concentración de soluciones de sacarosa	37
Figura 16. Compensación por temperatura de la concentración de soluciones de sacarosa	37

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Inventario del sistema de evaporación de doble efecto al inicio del proyecto	46
Anexo 2. Diagrama eléctrico multifilar del evaporador de doble efecto.....	47
Anexo 3. Distribución de planta	48
Anexo 4. Vistas isométrica y trasera del diseño mecánico.....	49
Anexo 5. Detalle intercambiadores 1 y 2	50
Anexo 6. Detalle Evaporadores 1 y 2	51
Anexo 7. Detalle sistema de generación de vacío	54
Anexo 8. Antes, durante y después de trabajos eléctricos.....	56
Anexo 9. Soporte fotográfico de modificaciones mecánicas realizadas	57
Anexo 10. Configuración de instrumentación de campo	59
Anexo 11. Tablas de compensación de concentración en soluciones de azúcar	60
Anexo 12. Diagramas KOP de cálculos del sistema de medición de Brix.....	62
Anexo 13. Diagramas KOP de los lazos de control configurados.....	63
Anexo 14. Imágenes de las ventanas desarrolladas en la interfaz HMI	65

INTRODUCCIÓN

El evaporador de doble efecto, ubicado en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle, es una de las herramientas de aprendizaje y práctica disponible para la comunidad universitaria. En el momento en que se inició presente trabajo, el uso de esta herramienta era poco debido a que presentaba fallas considerables en su sistema de control.

En un principio, dicho evaporador fue adquirido por la universidad con un sistema SCADA (supervisión, control y adquisición de datos), desde el cual a través de un computador se podían supervisar y controlar algunas variables facilitando su operación. De esta manera el equipo se venía empleando en prácticas que permitían a los estudiantes ampliar sus conocimientos de las operaciones unitarias y tecnologías empleadas en su funcionamiento.

Sin embargo, la falla de componentes electrónicos y algunas modificaciones mecánicas con respecto al diseño original imposibilitaban el normal funcionamiento del equipo y su disponibilidad para la realización de prácticas. Como los componentes electrónicos en fallo permitían la comunicación entre el computador y la instrumentación de control, y el sistema no tenía respaldo de interfaces físicas de entrada para la operación manual sin uso del SCADA, entonces el evaporador de doble efecto quedó inoperable.

Posteriormente, se intentó recuperar la funcionalidad del sistema. Estudiantes de cursos de laboratorio de Ingeniería Química lograron implementar un panel de operación conectado a la instrumentación de salida: variadores de frecuencia, válvula solenoide, y encendido de motor de vacío. Pese a que habilitaron una operación manual de algunas salidas de control, no se trabajó en el acceso a la información proveniente de la instrumentación de entrada como termocuplas y transmisores de presión, ni tampoco en un control automático del sistema.

Dado que la condición observada del evaporador de doble efecto era muy limitada, surge el presente proyecto con la finalidad de poner en funcionamiento este sistema adicionando principalmente un PLC (Controlador lógico programable) y una HMI (Interfaz hombre máquina). Es así como en este documento se evidencia el proceso seguido como un intento para la recuperación de este gran patrimonio de la Escuela de Ingeniería Química.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

El funcionamiento y control de operaciones de evaporación por su amplia variedad de aplicaciones, han sido estudiados de diversas formas. Por una parte, a pesar de las diferencias de época, los trabajos de Andre & Ritter (1968) y de Khanam & Mohanty (2011) coinciden en plantear un modelo matemático basándose en las características de diseño de los equipos y en los balances de materia y energía. Después, emplean la solución del modelo propuesto para describir el funcionamiento de los sistemas de evaporación considerados y se comparan los resultados obtenidos con corridas experimentales.

De otra manera, desarrollos como el de Muñoz (2006) se basan en la implementación de instrumentación de procesos acompañada de sistemas de control y supervisorios (HMI o SCADA), facilitando tanto la operación y control del sistema, como la adquisición, manejo y análisis de datos. En la actualidad, el uso de estas tecnologías para el control de procesos se basa en su mayoría en los PLC (Controlador lógico programable). Estos equipos permiten el manejo de la instrumentación de campo y vienen con una diversidad de interfaces de comunicación que les permite a los usuarios una operación tanto de manera local como remota.

En este contexto, como lo muestra Turc (2015), se podría lograr acceder a los PLC desde cualquier parte del mundo usando sistemas SCADA con servicios de internet, posibilitando operaciones de monitoreo y control remotos en tiempo real. Adicionalmente, según Carbajal, Montes, & Rosales (2008), una implementación exitosa de este tipo de sistemas en un proceso determinado, debe fundamentarse en desarrollos de ingeniería conceptual, básica y de detalle que garanticen un adecuado y seguro funcionamiento del sistema. Para ello es importante que en estos desarrollos se incluya la elaboración de diagramas P&ID, listado e identificación de instrumentación, diagramas lógicos para el sistema de control, diagramas eléctricos, diagramas mecánicos de instalación, entre otros.

1.2 MARCO CONCEPTUAL

Evaporadores industriales. Los evaporadores son equipos que ejecutan una operación unitaria cuyo objetivo es la concentración de una solución compuesta por un soluto no volátil y un

solvente volátil. Por lo general son usados en la concentración de soluciones por evaporación de agua. Aunque hay diversidad de diseños para evaporadores, esencialmente están compuestos por un intercambiador de calor que eleva la temperatura del producto hasta su temperatura de ebullición, un separador en el que el vapor se retira de la fase líquida concentrada y un condensador o bomba de vacío para evacuar el vapor generado.

En este sentido, es común encontrar en evaporadores arreglos tubulares metálicos conocidos como calandrias. Las calandrias son calentadas con vapor de agua que cede su energía al producto por medio de una superficie de transferencia de calor. Los evaporadores también disponen de una alimentación de solución diluida, y salidas de producto concentrado y vapor. Una clasificación dada por Harriott, McCabe, & Smith (1991) para los evaporadores tubulares es la siguiente:

- **Evaporadores de tubos largos verticales** flujo ascendente, flujo descendente, circulación natural, circulación forzada.
- **Evaporadores de película agitada**

La figura 1 muestra un evaporador de tubos verticales con circulación natural, similar a los existentes en el sistema de evaporación de doble efecto de la Escuela de Ingeniería Química.

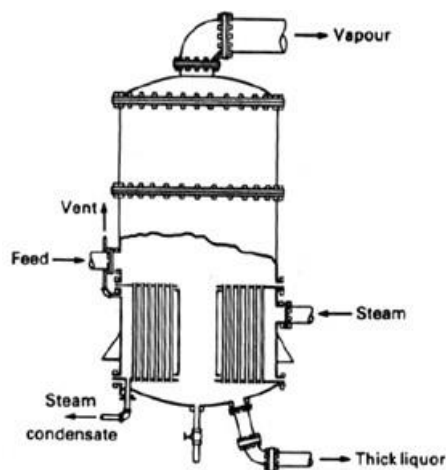


Figura 1. Evaporador de tubos verticales, circulación natural.

Este tipo de evaporador presenta la ventaja de circulación natural debido a los gradientes de densidad y temperatura en su interior, no es apto para líquidos de alta viscosidad y es el más comúnmente utilizado en la industria de azúcar y sales.

Evaporación de simple efecto. Cuando se utiliza un solo evaporador, el vapor procedente del líquido en ebullición se condensa y desecha. Este método recibe el nombre de evaporación de simple efecto, y aunque es sencillo, utiliza ineficazmente el vapor de entrada. Para evaporar un 1 kg de agua requiere entre 1 a 1.3 kg de vapor de agua.

Evaporación de múltiple efecto. Es un conjunto de evaporadores que se encuentran conectados mediante tuberías, de tal manera que el vapor generado pasa de un equipo (también llamado efecto) al siguiente en serie. De esta forma, el calor suministrado en el primer efecto, se utiliza para evaporar el solvente concentrando la solución que hay en ese equipo. Como en ese proceso se genera vapor, entonces puede ser utilizado como medio de calentamiento en el siguiente efecto y así sucesivamente, hasta que el vapor del último efecto se envía al condensador.

Dada la naturaleza del proceso, la evaporación es una de las operaciones unitarias que requieren mayor consumo de energía. Durand (1996) afirma que la evaporación en múltiple efecto contribuye a minimizar efectivamente el consumo de energía y el agua de enfriamiento empleada en la condensación, por esta razón es comúnmente utilizada en las industrias químicas.

Operación en vacío. Se sabe que la temperatura de ebullición de una solución depende de la composición y de la presión. Al operar evaporadores a presiones bajas incluidas las condiciones de vacío, se baja también la temperatura que debe alcanzar el sistema de intercambio de calor para producir la ebullición. Por esta razón en un efecto de evaporación, los vapores generados a menor temperatura que el vapor alimentado sirven para inducir evaporación en un siguiente efecto siempre y cuando se encuentre a una menor presión. Adicionalmente, la condensación producida en la calandria de un efecto ayuda a la generación de vacío del efecto anterior requiriéndose el condensador o bomba de vacío solo para el último efecto.

Métodos de alimentación. La Figura 2 muestra dos configuraciones usadas para la operación de un evaporador de múltiple efecto.

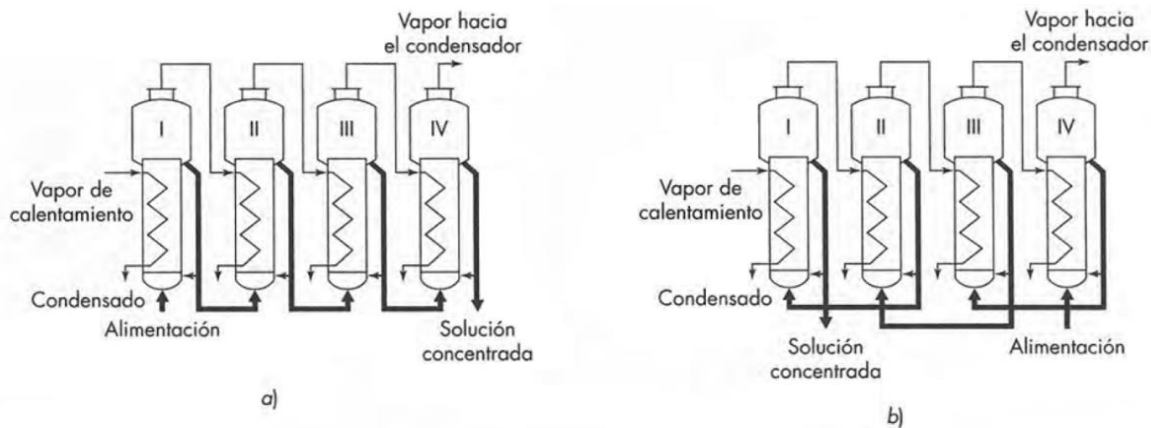


Figura 2. Modos de operación de evaporadores de múltiple efecto. Tomado de Harriott, McCabe, & Smith (1991): (a) alimentación paralelo; (b) alimentación contracorriente; línea delgada: corrientes de vapor de agua y vapor condensado; línea gruesa: corrientes de líquido.

Dependiendo de la configuración elegida, se utilizan equipos adicionales para el transporte de fluidos o para el control del proceso:

- **Alimentación en paralelo.** En este caso tanto el vapor como el líquido son alimentados en el primer efecto y retirados en el último. Como la presión es menor en los siguientes efectos, no es requerido bombeo para el paso de líquido de un efecto a otro. Para la extracción de la solución concentrada del último efecto es necesario un bombeo o una pierna barométrica capaz de vencer el vacío generado.
- **Alimentación en contracorriente.** Esta configuración consiste en alimentar la solución a concentrar en el último efecto y retirarla en el primero. El flujo de vapor es similar al de la configuración en paralelo. Aunque el vacío del ultimo efecto puede ayudar a la alimentación de líquido al sistema, para pasar líquido a un efecto con mayor presión se requiere de bombeo.

Calentamiento de la alimentación. Aproximadamente en cada efecto de evaporación, por cada libra de vapor alimentado se evapora una libra de agua de la solución, como la cantidad de solución que pasa al siguiente efecto es menor, se puede requerir menor cantidad de vapor para seguirla concentrando. Teniendo en cuenta esto, muchos sistemas toman parte del vapor del primer efecto para calentar la alimentación de solución antes de ingresar al sistema de evaporación.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

A continuación, se resume el proceso llevado a cabo con el fin de lograr la automatización del evaporador de doble efecto:

2.1 INVENTARIO Y DOCUMENTACIÓN DEL SISTEMA

El proyecto comienza con una búsqueda de la documentación del sistema. Dado que esta información resultaba de importancia para entender el funcionamiento y diseño del evaporador de doble efecto, se consultó a profesores y personal de laboratorio. Sin embargo, no fue posible acceder a alguna información de este tipo, de allí se decidió realizar el levantamiento de la documentación y la elaboración de un diagnóstico inicial. Para este fin, se desarrolló un inventario en el cual se pudieran identificar las características, referencias y fabricantes de los diferentes componentes. Después, con la información recopilada, se realizó una búsqueda por internet de manuales y especificaciones, teniendo en cuenta que los fabricantes de equipos industriales por lo general publican en sus páginas web información de soporte.

Adicionalmente, se procedió a realizar un análisis del sistema mecánico, entendiendo la dirección de los flujos y el funcionamiento de las diferentes secciones. En la parte eléctrica, se trabajó en el tablero principal y el panel de operación, fue necesario abrir las canaletas de cableado para identificar el origen y destino de cada línea eléctrica, cambiar la numeración e ir elaborando en borrador un plano con las líneas identificadas. Finalmente, el análisis de esta información fue la base para identificar los cambios a realizar en el sistema y su adecuado manejo, con el fin de evitar posibles daños.

2.2 PRUEBA Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

En este punto, se realizó un recorrido por los diferentes componentes del sistema verificando su adecuada instalación, realizando su limpieza y dejándolos listos para la puesta en marcha. Con el fin de verificar un correcto funcionamiento de los equipos, tanto en su parte eléctrica como mecánica, se realizó un cambio inicial en el sistema de tuberías que permitiera bombear agua hacia los evaporadores. Durante la prueba se observó si cada equipo se encontraba funcionando adecuadamente.

2.3 DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL

La información recopilada con las actividades realizadas hasta este punto fue usada para proponer los diagramas P&ID que muestran las estrategias de control a implementar, teniendo en cuenta que se pueda usar el equipo para funcionamiento como evaporador de doble efecto en contracorriente y en paralelo. Se definió para cada caso la instrumentación requerida y se elaboró un diagrama de flujo para el programa del PLC. Adicionalmente se identificó la instrumentación faltante en el sistema.

2.4 DISEÑOS ELÉCTRICO Y MECÁNICO DEL SISTEMA

Se partió del conexionado eléctrico que había inicialmente, realizando modificaciones que permitieran conservar el panel de operación manual del sistema y que a su vez esta información operativa pudiera ser identificada por el PLC. Se elaboró el diagrama eléctrico multifilar usando el software Microsoft Visio y se actualizó permanentemente a lo largo del proyecto. Este diagrama eléctrico evidencia la conexión de las líneas y su respectivo rotulado en el tablero principal y panel de operación.

La parte mecánica fue diseñada bajo el software Solid Edge ST6 versión académica. En ella se refleja el diseño de los intercambiadores de calor, los evaporadores, el sistema de generación de vacío y el diseño del sistema de medición de brix.

2.5 SELECCIÓN Y COMPRA DE PLC, EQUIPOS Y MATERIALES FALTANTES

Después de definir la instrumentación y equipos faltantes, se realizó una búsqueda de empresas que pudieran proveer tales instrumentos a un buen precio y que cumplieran las condiciones requeridas para el proyecto. Se realizó la respectiva compra y se elaboró un resumen de los equipos y materiales comprados.

2.6 MODIFICACIONES ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS

Se ejecutaron las modificaciones al sistema basados en los diseños eléctrico y mecánico. Para ello, fue necesario disponer de las herramientas apropiadas y utilizar elementos de protección personal para evitar accidentes. Estas modificaciones se documentaron fotográficamente y se

resumieron. Al culminar los trabajos mecánicos se realizó la primera prueba con agua y vapor. Dicha prueba fue realizada con el panel de operación manual usando las configuraciones en contracorriente y en paralelo. Adicionalmente se realizó el conexionado de la instrumentación nueva, del PLC y de la HMI, basándose en los manuales de usuario recopilados en el levantamiento de la documentación del sistema y en la información de los equipos comprados.

2.7 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE PLC E INSTRUMENTACIÓN

Para iniciar la programación y configuración del sistema de control, primero se estudiaron los manuales y especificaciones de la instrumentación, del PLC Siemens S71200, de la HMI Siemens KTP400, del software de programación Siemens TIA PORTAL V13 UPD 6 y de los componentes adicionales del sistema.

Después, se trabajó en la instrumentación de campo, haciendo prueba de señales y configurando los instrumentos de acuerdo a lo requerido. Para ello, se desarrolló una ventana de la interfaz HMI para visualización y modificación de todas las entradas y salidas del PLC. Con esta ventana se analizó cada sensor para verificar su funcionamiento y transmisión de la señal, y de ser necesario corregir las conexiones, programación de los sensores o del PLC.

Se programó en el software del PLC el algoritmo propuesto, y se diseñó en la interfaz HMI pantallas de operación del sistema. Los parámetros del programa final del PLC fueron obtenidos mediante un proceso de prueba y afinación.

2.8 PUESTA EN MARCHA Y ENTREGA DEL SISTEMA

En este punto se concluye el proyecto poniendo a funcionar el sistema de evaporación, probando toda la funcionalidad y modos de operación del diseño implementado, se elaboró el manual de operación de acuerdo a las pruebas realizadas y se hizo la entrega del sistema junto con su documentación al personal encargado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente trabajo se logró el funcionamiento automático del evaporador de doble efecto a través de la realización de modificaciones eléctricas y mecánicas del sistema, la adición de nuevos componentes y la programación de un PLC y una HMI.

3.1 INVENTARIO Y DIAGNÓSTICO

Debido a que no había documentación del sistema, se realizó como primera actividad un inventario y diagnóstico iniciales. La tabla 1 indica las principales observaciones encontradas:

Tabla 1. Observaciones del sistema evidenciadas al inicio del proyecto

ESTADO	DESCRIPCIÓN
	Se evidenció falta de uso del equipo. Superficies con depósitos de polvo y grasa
	Conexión incompleta de tuberías, el primer efecto estaba conectado a sistema de vacío. Segundo efecto con entradas y salidas desconectadas
	Sistema de adquisición de datos que únicamente estaba conectado al suministro eléctrico y sin modem de comunicación a PC. Computador enciende pero no inicia sistema operativo.
	Desconexión de termocuplas y transmisor de presión

Como observación adicional, en la figura 3 se evidenció un trabajo realizado por un grupo de

laboratorio de ingeniería química en el cual se logró habilitar el encendido y control de velocidad de motores, manejo de válvula solenoide y bomba de vacío. Para ello, instalaron paralelo al tablero eléctrico principal un panel que estaba conectado a los relevos de control y a las entradas de potenciómetro de los variadores de frecuencia. Así, lograron habilitar el sistema eléctrico para la operación manual del evaporador de doble efecto.



Figura 3. Control de motores, válvula solenoide y sistema de vacío del evaporador de doble efecto. Trabajo realizado en 2014 curso laboratorio de ingeniería química.

El anexo 1 resume el inventario realizado y se evidencia la disponibilidad de equipos como termocuplas, bombas, variadores, válvulas solenoide, módulos de adquisición de datos, relevos, protecciones eléctricas y otros elementos componentes de lazos de control. Algunos de estos elementos se encontraron total o parcialmente desconectados. La realización de este inventario ayudó a la identificación de las referencias y marcas de los equipos de instrumentación y control, esta información permitió encontrar por internet las hojas de datos y especificaciones de los siguientes equipos:

- Variadores altivar 312
- Transmisor de presión FESTO SPAB
- Fuente de alimentación Mean Well DR-75-24
- Bomba de vacío DOSIVAC DVR30
- Bomba dosificadora a diafragma DOSIVAC DD600
- Módulos de adquisición de datos ADAM 4000 series

Al analizar la documentación encontrada se determinó que, de los componentes disponibles, los módulos de adquisición de datos ADAM 4000 series serían retirados. Esta decisión fue motivada debido a que son equipos que requieren grandes esfuerzos de programación y puesta en marcha con respecto a los sistemas actuales de control de procesos. Además, aunque tales dispositivos tienen la capacidad de soportar entradas y salidas de instrumentación y control, presentan como desventaja la forma en que procesan la información.

Para el manejo de datos, los módulos ADAM se conectan a través de la red industrial RS485, reciben comandos por medio de caracteres ASCII y dan una respuesta que contiene los valores de entradas provenientes de sensores o ejecutan las acciones de control dependiendo del tipo de comandos que ha sido enviado. Cualquier computador con comunicación serial y un modem RS485 podría acceder al manejo de los módulos ADAM, sin embargo, se requiere del desarrollo de un complejo programa capaz de recolectar la información transmitida por comunicación serial y mostrarla a través de una interfaz de usuario. La velocidad de muestreo de datos también es afectada, dado que se transmite o recibe un dato a la vez y es necesario hacer un barrido por todas las variables del sistema.

En cuanto a la parte mecánica del sistema, al observar las conexiones de tuberías entre los equipos e identificar su funcionalidad, como lo muestra la figura 4, se propuso dividir el sistema global en los siguientes subsistemas:



Figura 4. Subsistemas identificados en el evaporador de doble efecto

- Tableros de control
- Almacenamiento insumos
- Bomba 1
- Intercambiador de calor 1
- Evaporador 1
- Bomba 2
- Evaporador 2
- Intercambiador de calor 2
- Generación de vacío

3.2 PRUEBA Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

En esta actividad se realizó la limpieza y mantenimiento requerido del sistema de evaporación en general, así como la revisión de conexiones eléctricas y mecánicas, prueba y encendido de los equipos e instrumentos eléctricos y electrónicos. De igual forma, se hizo cambios en algunas tuberías del sistema para hacer una aproximación a la configuración para evaporación de doble efecto. Los principales cambios mecánicos fueron:

- Retiro de línea de salida de vapor de evaporador 1 a intercambiador 2
- Conexión de la línea de salida de vapor de evaporador 1 a calandria de evaporador 2
- Conexión de línea de salida de evaporador 2 a intercambiador 2
- Conexión de salida de líquido de bomba 2 a evaporador 2
- Conexión de salida de insumos a entrada de bomba 1
- Desarme y revisión de intercambiadores de calor

Como resultado del mantenimiento y prueba de los equipos, se logró llenar ambos evaporadores con agua utilizando el panel de operación manual, con lo cual se probó el funcionamiento de los motores, los variadores y la válvula solenoide, quedando pendiente el sistema de generación de vacío, la inyección de vapor y los sensores de temperatura y presión. La figura 5 presenta el soporte gráfico de las pruebas realizadas. Es de rescatar que todos los componentes probados funcionaron adecuadamente.



Figura 5. Soporte gráfico de mantenimiento y prueba inicial de equipos encontrados en el sistema de evaporación de doble efecto.

3.3 DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL

Diagramas P&ID. Luego de analizar diferentes configuraciones de arreglos de tubería y sistema de instrumentación, y teniendo en cuenta que los equipos disponibles identificados en el inventario inicial, se procedió a elaborar los diagramas P&ID del nuevo sistema de control tanto para la utilización del doble efecto en paralelo como en contracorriente. La figura 6 presenta los diseños propuestos en esta actividad. Se observa en el diseño que el intercambiador 1 utiliza como fluido de calentamiento la salida de vapor del evaporador 1 en vez de estar conectado al calderín. Por otra parte, la alimentación de solución en contracorriente es realizada aprovechando el vacío del segundo efecto y la bomba 2 en ambos casos quedaría funcionando como la salida de producto.

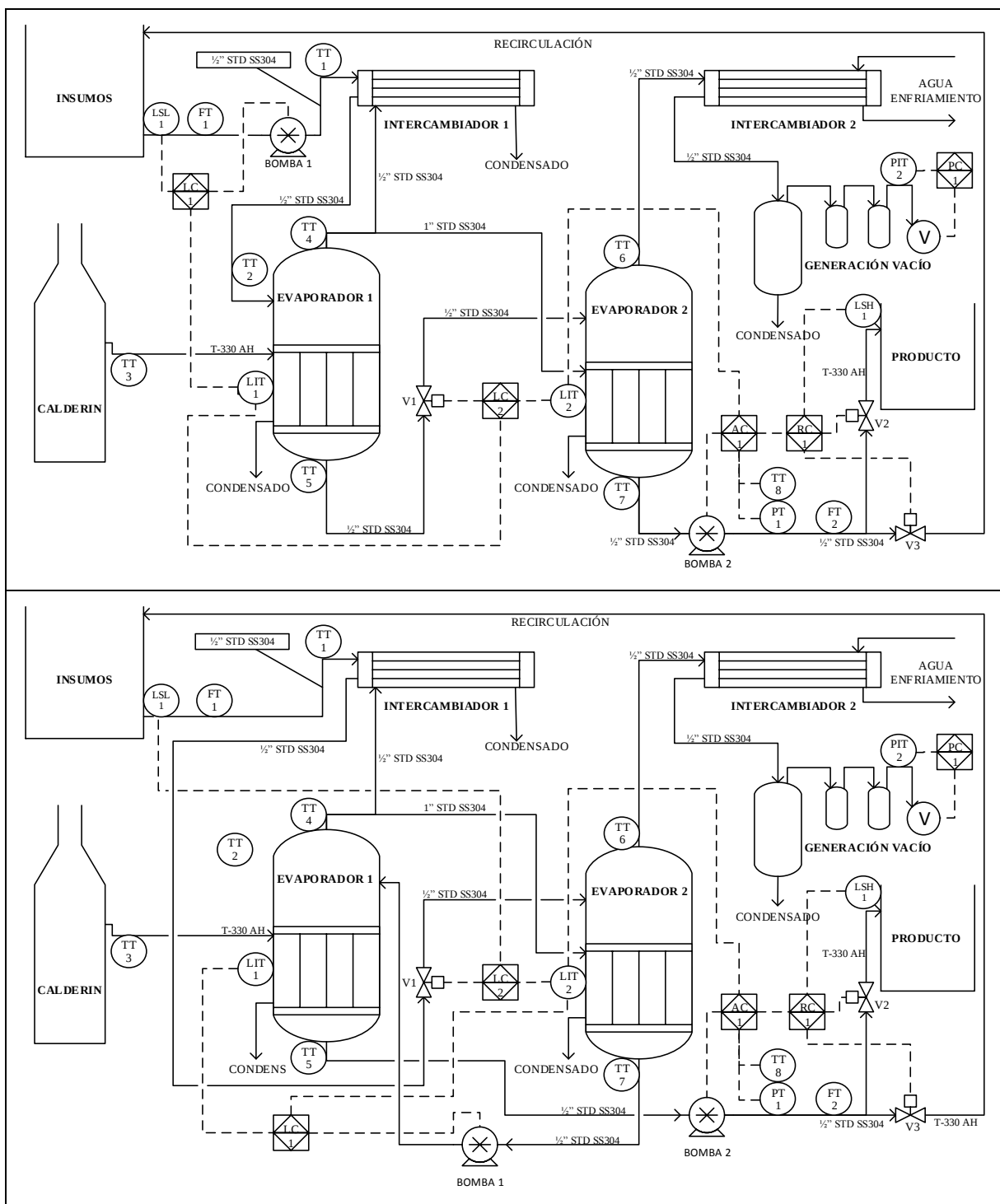


Figura 6. Diagramas P&ID del diseño de instrumentación propuesto para el control automático del evaporador de doble efecto en los modos de operación en paralelo (superior) y contracorriente (inferior). Simbología basada en las normas ANSI/ISA S5.1 (1992) donde AC equivale a control de concentración (Brix) y RC a control de recirculación.

Descripción de los lazos de control a implementar. En los diagramas P&ID que se muestran en la figura 6, se pueden observar los diversos lazos de control propuestos. Se observa que, tanto para la operación en paralelo como en contracorriente, los lazos de control empleados son similares y se describen a continuación:

- **PC1 - Generación de vacío.** Corresponde a un tipo de control on-off de lazo cerrado cuya realimentación proviene del transmisor de presión PIT2 que envía una señal de voltaje de 0 a 5VDC en el rango de -1 a 1 bar. En este lazo, a través del encendido y apagado de una bomba de vacío (V), se debe mantener una presión del sistema de generación de vacío cercana a un valor deseado. Para ello el usuario debe introducir en la HMI el valor de vacío en el que se quiere trabajar, que es comparado con el valor del transmisor PIT2 ubicado en la línea de baja presión. Cuando la presión PIT2 se encuentra por encima del valor deseado, se enciende la bomba de vacío hasta que PIT2 llegue por debajo del valor deseado. De manera adicional, un temporizador que retarda el encendido o apagado de la bomba de vacío ayuda a evitar intermitencias de la señal de control cuando PIT2 se encuentra cerca del valor deseado.

- **LC1 - Nivel evaporador 1.** En este caso se usa un control on-off de lazo cerrado con una señal de realimentación puntual LIT1, que cuando detecta nivel transmite 24VDC y 0VDC en caso de no detectar líquido en ese punto. El objetivo de este lazo es mantener el nivel de líquido del evaporador 1 cerca al punto de instalación del sensor LIT1 mediante el accionamiento de la bomba 1. Dicha bomba se apaga cuando se activa la señal LIT1 y se enciende en caso de no detectar líquido. La frecuencia de operación del motor de la bomba 1 es manejada por medio de la variable POT1 enviada desde el PLC hasta el variador en una señal de 0 a 10VDC, el usuario introduce de forma manual un porcentaje en la HMI que representa en el variador una frecuencia entre 0 y 60 Hz. Cuando el modo de operación del sistema es en paralelo, una señal puntual LSL1 proveniente del tanque de insumos evita que se accione la bomba 1 en caso de no haber material para bombeo. De manera similar, en el modo de operación en contracorriente, para el encendido de la bomba 1 se requiere que haya detección de nivel en el sensor LIT2. Sumado a esto, se requiere de un temporizador para el retardo del encendido o apagado de la bomba 1 para ayuda a evitar intermitencias de la señal de control cuando el nivel de líquido en el evaporador 1 se encuentre cerca del transmisor LIT1.

- **LC2 - Nivel evaporador 2.** Es un tipo de control on-off de lazo cerrado con una señal de realimentación puntual LIT2, similar a LIT1. La implementación de éste lazo ayuda a mantener el nivel de líquido del evaporador 2 cerca al punto de instalación del sensor LIT2 mediante el accionamiento de la válvula solenoide V1. Dicha válvula se apaga cuando se activa la señal LIT2 y se enciende en caso de no detectar líquido. Cuando el modo de operación del sistema es en paralelo, una señal puntual LIT1 proveniente del evaporador 1 evita que se accione V1 en caso de no haber material para succionar hacia el evaporador 2. De manera similar, en el modo de operación en contracorriente, el encendido de V1 depende de que haya detección de nivel en el sensor LSL1 del tanque de insumos. Sumado a esto, se requiere de un temporizador para el retardo del encendido o apagado de V1 para ayuda a evitar intermitencias de la señal de control cuando el nivel de líquido en el evaporador 2 se encuentre cerca del transmisor LIT2.

- **AC1 - Brix de salida.** Este control está compuesto por un controlador de lazo cerrado PID cuya señal de realimentación es la variable brix de salida (Porcentaje peso a peso de azúcar en agua) calculada a partir de los datos provenientes de los transmisores de presión PT1 y temperatura TT8 con las formulas descritas en la sección 3.7 de configuración y programación del sistema. Por medio de la interfaz HMI, el usuario debe ingresar el valor deseado de brix, el controlador compara este valor con el calculado de brix y ejerce una acción sobre la variable POT2 que representa la frecuencia del motor de la bomba 2 cuyo variador recibe una señal entre 0 a 10VDC. La acción del controlador PID es inversa, dado que debe aumentar la frecuencia del bombeo para conseguir la disminución en el valor de brix y viceversa. Por otra parte, se toman las señales provenientes de los sensores de nivel LIT1 del evaporador 1 modo de operación contracorriente y LIT2 del evaporador 2 modo de operación paralelo que ayudan al manejo de la señal de encendido y apagado del motor de la Bomba 2, dependiendo de si hay material para bombeo. Por medio de un temporizador para el retardo del encendido o apagado de la Bomba2 se evita intermitencias de la señal de control cuando el nivel de líquido en el evaporador 2 se encuentre cerca del transmisor LIT2.

- **RC1 - Recirculación de salida.** Corresponde a un control de lazo abierto que se basa en el cálculo de brix hecho en AC1 para accionar el juego de las válvulas solenoide V2-V3. Para ello el usuario debe ingresar a través de la HMI la tolerancia con respecto al valor deseado de brix en la que se puede aceptar el producto. Cuando la concentración de salida del sistema está dentro

de las especificaciones en el rango de valor deseado de brix $\pm$ tolerancia del producto, se abre V2 y se cierra V3 permitiendo el llenado del tanque de producto. Un brix por fuera de las especificaciones de tolerancia, hace que V3 se abra y V2 se cierre permitiendo que la salida de material procesado en el sistema sea recirculada al tanque de insumos. Aunque la salida de material del sistema se encuentre dentro de las especificaciones de brix deseado y tolerancia, la señal del interruptor de nivel LSH1 al detectar alto nivel inactiva el envío de material al tanque de producto y habilita la recirculación. Finalmente, por medio de un temporizador para el retardo en el cambio del juego de válvulas V2-V3 se evita intermitencias en la señal de control cuando la señal de brix se encuentra cerca al valor deseado de brix $\pm$ tolerancia.

- **Alarmas.** Las señales provenientes de los interruptores de nivel de los tanques de insumo (LSL1) y producto (LSH1) y del transmisor de temperatura TT3 brindan información para determinar el arranque o parada del sistema, por ello activan una alarma que puede ser silenciada por el usuario en la HMI, el usuario determina el momento en el cual se realiza el arranque o parada del modo de operación automático.

Diagrama de flujo de programación del PLC. Con el diseño de la estrategia de control se desarrolló el diagrama de flujo mostrado en la figura 7 que sirvió como base para la programación del PLC y es aplicable tanto para la operación en paralelo como para la operación en contracorriente.

Análisis entradas y salidas del sistema de control. Adicionalmente, se procedió a definir las variables de entrada y salida del PLC como se resume a continuación:

- **Entradas digitales.** Automático/Manual, On/Off Variador 1, On/Off Válvula Solenoide 1, On/Off Bomba Vacío, On/Off Variador 2, Válvulas Solenoide Producto/Recirculación, LIT1, LIT2, LSL1, LSH1, FT1, FT2.
- **Salidas Digitales.** On/Off Variador 1, On/Off Válvula Solenoide 1, On/Off Bomba Vacío, On/Off Variador 2, Válvula Solenoide Producto/Recirculación, Alarma sonora.
- **Entradas Análogas.** TT1, TT2, TT3, TT4, TT5, TT6, TT7, TT8, POT1, POT2, PT1, PIT2.
- **Salidas Análogas.** POT1, POT2.



El anexo 2 presenta el diagrama eléctrico multifilar del sistema que fue desarrollado a partir de un borrador del plano eléctrico elaborado al inicio del proyecto en el levantamiento de la documentación. Fue necesario realizar modificaciones considerables al sistema inicial con el fin de conservar el panel de operación manual e introducir la nueva instrumentación. El diseño mecánico fue desarrollado tomando datos de la distribución de la planta, confrontándola con los diseños de los P&ID de la figura 6 y proponiendo una distribución de tuberías. Todos estos

detalles se introdujeron en el software de diseño Solid Edge ST6 versión académica.

La figura 8 muestra una imagen 3D del diseño desarrollado en el presente proyecto donde la manguera roja indica el suministro de vapor al sistema, las azules representan la salida de condensados, la amarilla es la alimentación de solución diluida y las verdes corresponden a la salida de producto, a la salida de la muestra para el sistema de medición de brix y a la recirculación de producto por fuera de especificación al tanque de insumos. Como resultado del diseño realizado, se extrajeron los siguientes planos de detalle mecánico:

- Distribución de planta (Ver Anexo 3).
- Vistas isométrica y trasera del diseño mecánico (Ver Anexo 4)
- Detalle intercambiadores 1 y 2 (Ver anexo 5)
- Detalle evaporadores 1 y 2 (Ver Anexo 6)
- Detalle sistema de generación de vacío (Ver anexo 7)
- Detalle sistema medición de Brix (Ver anexo 8)

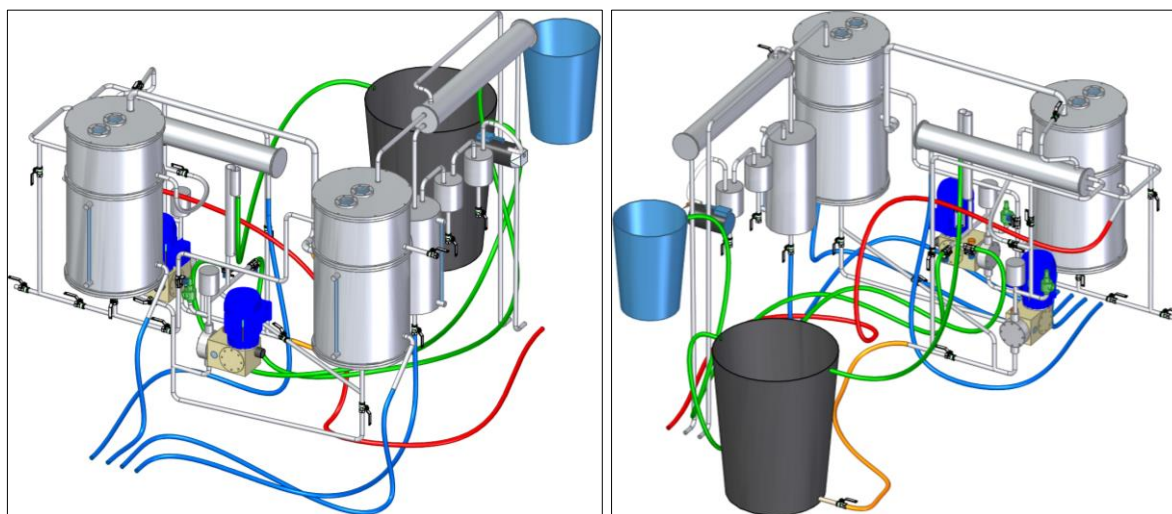


Figura 8. Vistas elevadas tomadas del diseño mecánico del sistema de evaporación de doble efecto, realizado con software Solid Edge ST6 Versión Académica.

3.5 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS Y MATERIALES ADICIONALES

Durante el diagnóstico inicial, se determinó la disponibilidad de equipos e instrumentación como se muestra en el Anexo 1. En la tabla 2, Estos equipos fueron confrontados con los requeridos por el diseño del sistema control mostrado en los P&IDs de la figura 6. De allí se

determinó la instrumentación y equipos faltantes. La adquisición de equipos se basó en un menor precio en el mercado, un menor tiempo de entrega y unas especificaciones de funcionamiento que estuvieran de acuerdo con las necesidades del sistema de control diseñado.

Tabla 2 Análisis de equipos de instrumentación y control faltantes en el sistema y sus costos

Instrumentación requerida	Cantidad requerida	Cantidad inventario	Pendiente	Valor compra*
PLC	1	0	1	1 330
HMI	1	0	1	1 231
Módulo de E/S análogas	1	0	1	1 085
Módulo de entradas de temperatura	1	0	1	1 625
Interruptor de nivel flota	2	0	2	25
Interruptor de nivel capacitivo	2	0	2	80
Sensor temperatura	8	7	1	49
Bomba dosificación	2	2	0	-
Variador frecuencia bombas	2	2	0	-
Bomba vacío	1	1	0	-
Válvulas solenoide	3	1	2	45
Transmisor de presión	2	1	1	1 428
Relevo de control	6	4	2	28
Transmisor de flujo	2	0	2	35

*Valores en miles de pesos

Entre los equipos que faltaba por adquirir para el funcionamiento automático del sistema, el PLC, la HMI y los correspondientes módulos de entrada/salida son los componentes de mayor valor e importancia. Antes de su compra, se consideraron varias alternativas escogiéndose el uso de la marca Siemens. Algunas alternativas, aunque resultaban más económicas suponían un mayor esfuerzo en la parte de programación.

Por ejemplo, se consideró la compra de un modem RS485 para utilizar los módulos de entradas Adam 4000 disponibles, ello supondría trabajar el sistema desde un PC y hacer una programación por medio de algún lenguaje capaz de acceder a comunicación serial como C++, Java, Visual Basic. La economía en hardware, se vería opacada por el tiempo a invertir en un desarrollo y prueba de software que se requería para el sistema. Adicionalmente, se consideró el uso de sistemas que usaran para control equipos arduino o raspberry. Dichos sistemas cuentan con capacidad de soportar entradas de control industrial y su bajo costo los hace atractivos para

la compra. Sin embargo, requieren similares desarrollos y pruebas de software que los comentados anteriormente.

De esta manera, para garantizar una solución estable y confiable, sin que demandara grandes tiempos en su desarrollo, se prefirió invertir en tecnologías con soporte y varios años de prueba y desarrollo como las ofrecidas por los PLC. A pesar de que el mercado de PLC es muy amplio, se decidió escoger el S71200 de Siemens. Su principal atractivo es porque dentro de las principales marcas de PLC, el S71200 es una solución de automatización de bajo costo que tiene incorporado entradas y salidas análogas y digitales con posibilidad de expansión y la última tecnología en comunicaciones. Sumado a ello, fue posible conseguir precio de distribuidor en la compra de estos equipos. Dicho precio equivale a un descuento del 50% del precio sugerido de venta al público, su valor final se observa en la tabla 2.

Por otra parte, la tabla 2 también muestra los costos de los demás equipos de instrumentación y control que fueron adquiridos en el presente proyecto. Entre ellos resalta por su valor el transmisor de presión (Ref. HUBA 691). Dicho equipo fue necesario dimensionarlo de manera especial para el sistema de medición de Brix, su considerable valor obedece a el bajo rango de presión que es capaz de medir (0 a 0.1Bar). Es ideal para medir la presión ejercida por una columna de 50cm de una solución de sacarosa, cuyo cambio en la composición refleja un sensible cambio en la presión de la columna. Entonces, con los datos de presión y temperatura es posible obtener la densidad y brix de la solución.

De manera adicional, aunque la tabla 2 muestra que se requería la adquisición de un sensor de temperatura, realmente fueron adquiridos ocho sensores de temperatura tipo PT100. Esta situación obedeció a que el módulo adquirido para entrada de temperatura estaba diseñado para RTD. Por consiguiente, fue necesario cambiar cada sensor y las termocuplas retiradas quedaron a disposición de futuros proyectos.

En cuanto a otro tipo de costos, a lo largo del proyecto fue necesario comprar herramientas insumos para cableado, insumos para modificación de tuberías e insumos para realización de pruebas del sistema. Como resultado, se tuvo una inversión total de 8.6 millones de pesos incluidos impuestos, de los cuales 7.2 millones estuvieron destinados exclusivamente a compra

de equipos de instrumentación y control y 1.4 millones destinados a insumos, herramientas y materiales.

3.6 MODIFICACIONES ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS

Se procedió a trabajar en la implementación física de los diseños eléctrico y mecánico desarrollados en el presente proyecto. Para ello, en la parte eléctrica fue necesario la apertura de canaletas eléctricas en el tablero de control, el rotulado de cada línea, la canalización de nuevas líneas eléctricas, la organización del cableado, el sondeo de cables hasta la instrumentación de campo, la soldadura de empalmes de cableado, el retiro de los módulos Adam, la instalación del PLC y los módulos de entrada y salida. El anexo 8 muestra una ilustración gráfica del antes durante y después de algunos subsistemas eléctricos intervenidos.

Después, como se ilustra en la figura 9, adicional a los trabajos mecánicos mencionados en la sección 3.2, se realizaron las siguientes modificaciones:

- **Bypass de la entrada de insumos a la bomba 1.** Con esta modificación y un adecuado arreglo de tuberías es posible el paso de material desde el tanque de insumos, pasando por el intercambiador 1 y llegando hasta el evaporador 2 sin usar la bomba 1. El vacío presente en el evaporador 2 ayuda al paso de material en esta configuración.
- **Bypass de intercambiador 1.** Permite que la salida de la bomba 1 pueda conectarse directamente al evaporador 1 sin pasar por el intercambiador 1. Se utiliza en el modo de operación en contracorriente para bombeo de líquido del evaporador 2 al evaporador 1.
- **Conexión salida evaporador 2 con bomba 1.** Permite junto con el bypass del intercambiador 1, el envío de líquido desde el evaporador 2 hasta el evaporador 1 usando la bomba 1. Esta acción requiere el uso de la bomba 1 para vencer la resistencia al flujo ejercida por el vacío presente en el evaporador 2.
- **Conexión de salidas de los evaporadores 1 y 2 a la entrada de la bomba 2.** Esto permite usar la bomba 2 exclusivamente para la salida de producto del sistema por lo cual la salida del evaporador 1 tiene la opción de enviar material tanto al evaporador 2 como a la bomba 2. De

manera similar, el evaporador 2 queda con opción de envío de material a la bomba 1 o a la bomba 2 en las configuraciones de paralelo y contracorriente respectivamente.

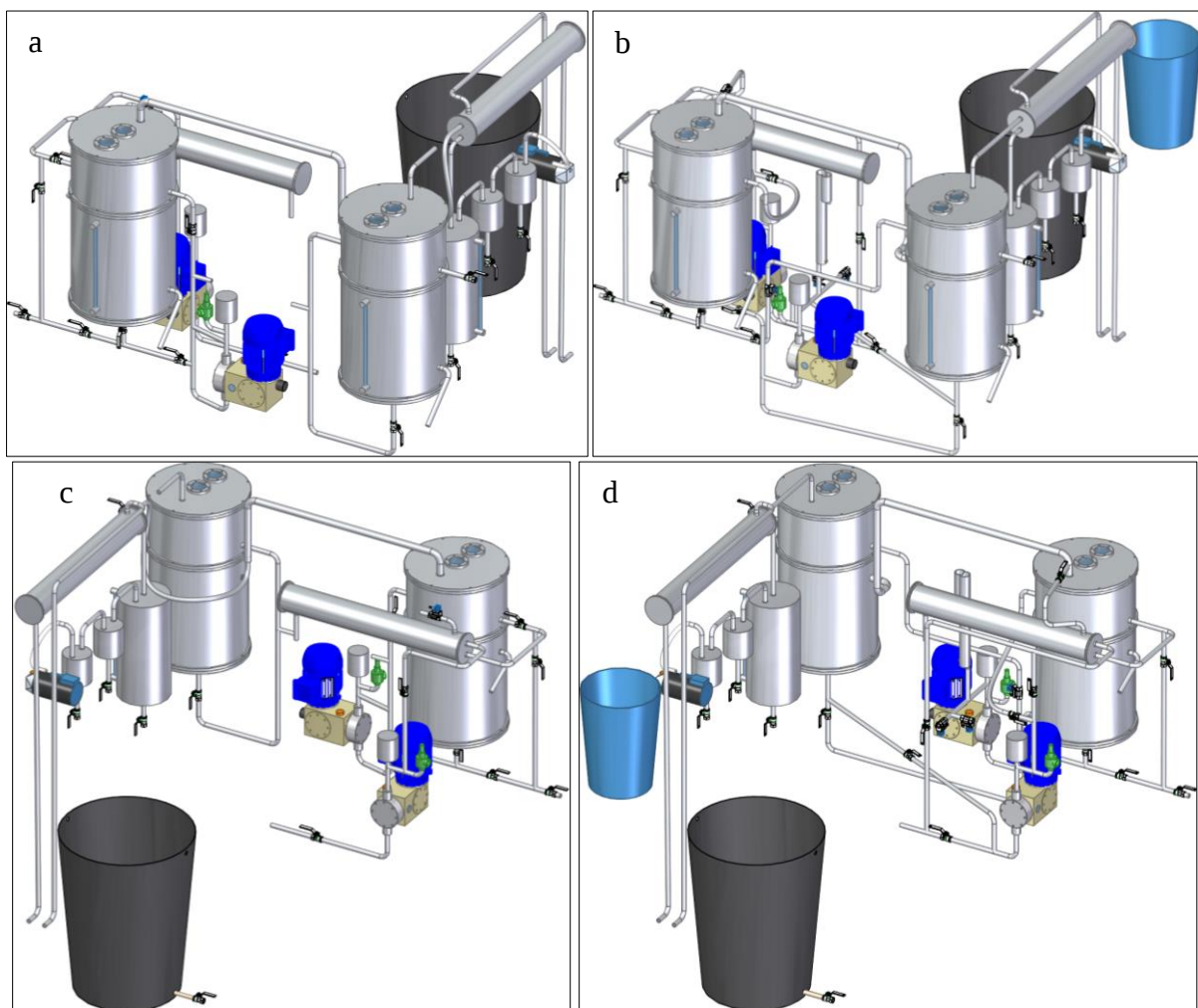


Figura 9. Análisis de las modificaciones mecánicas hechas en tubería de acero inoxidable, no se muestran las mangueras para facilitar visualización. a y c corresponde a vistas del sistema antes de las modificaciones, b y d corresponde al sistema modificado.

- **Derivación de salida de vapor de evaporador 1 a intercambiador 1.** Esto permite eficiencia en el consumo de vapor debido a que el intercambiador 1 no es calentado con vapor proveniente del calderín sino con vapor generado en el evaporador 1.
- **Traslado válvula solenoide a entrada de líquido a evaporador 2.** se retiró la válvula solenoide que controlaba la temperatura en el intercambiador 1 y se colocó en la entrada de líquido del evaporador 2. De esta manera se habilita el sistema para el paso de líquido desde el

evaporador 1 o el tanque de insumos hasta el evaporador 2, por efecto del vacío generado en el segundo efecto de vapor.

- **Fabricación del soporte del sistema de medición de brix.** Como muestra el anexo 8, se fabricó un soporte al que se conectan un transmisor de presión y un transmisor de temperatura que permite evaluar en tiempo real la concentración de azúcar del material que sale del sistema de evaporación por la bomba 2. De esta manera se toma la decisión de enviarlo al tanque de producto o recircularlo al sistema.

- **Salida de bomba 2.** se construyó un tramo de salida de la bomba 2 que permitiera el acople del sistema de medición de brix, y las válvulas solenoides 2 y 3 encargadas de permitir el flujo al tanque de producto o recircular material para el tanque de insumos.

Al finalizar los trabajos mecánicos y la mayor parte de las modificaciones eléctricas, se aprovechó el panel de control manual para hacer la primera prueba del sistema con agua y vapor. Como resultado se pudo poner a funcionar el evaporador de doble efecto tanto en configuración en paralelo como en configuración en contracorriente.

3.7 CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA

Para la puesta en funcionamiento de la instrumentación y equipos de control, después de examinar los manuales de operación de cada componente, se procedió a revisarlos en su instalación mecánica y su conexión eléctrico. Posteriormente, fueron energizados, y por medio de una pantalla de prueba de señales en la HMI se empezó a verificar la transmisión desde los sensores al PLC.

El sistema de control, PLC y HMI, debió ser programado previamente con una interfaz muy básica para permitir la verificación de las entradas y salidas. En este proceso, antes de introducir el PLC al sistema, se hicieron pruebas conectándole individualmente algunos de los sensores y ajustando los rangos y escalado de señales. En este proceso, se observó que el manejo de las entradas o salidas digitales difiere del manejo de las entradas o salidas analógicas.

Configuración de señales digitales y analógicas en PLC. La señal digital maneja dos valores

que se pueden representar por verdadero o falso que es equivalente a expresarlo por 0 o 1. De esta manera, se facilita un actual estilo de programación conocido como KOP, o lenguaje de contactos. En dicho lenguaje, el programa del PLC se desarrolla simulando un circuito eléctrico en el cual una señal digital verdadera o 1 permite el paso de corriente a la siguiente operación del programa y estados de una variable digital en falso o 0 impiden el paso del corriente.

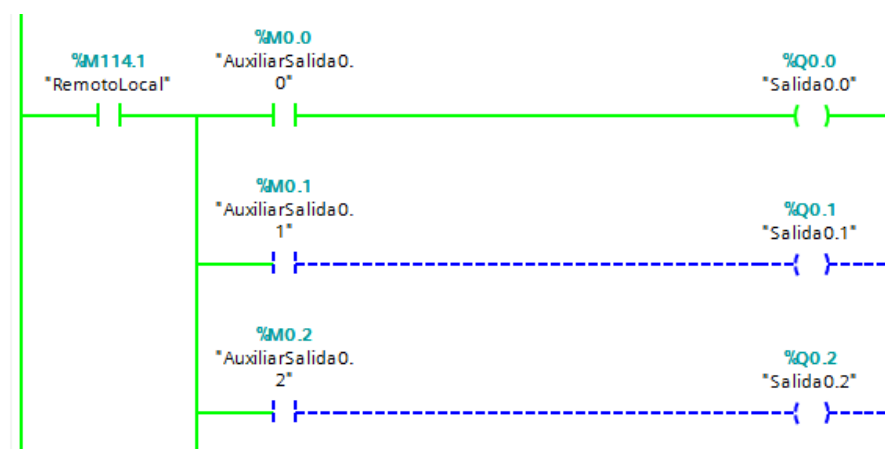


Figura 10. Ilustración de la programación en lenguaje KOP.

En la figura 10, que fue extraída del programa desarrollado para el PLC en el presente trabajo, se observa que las señales digitales son llamadas mediante el contacto representado por dos barras verticales y son escritas por medio de los contactos que están representados por dos paréntesis. En este caso, para permitir la activación de la variable Salida0.0, resultaba necesario que estuvieran a su vez activas las variables AuxiliarSalida0.0 y RemotoLocal. También se observa que a las variables Salida0.1 y Salida0.2 se les está asignando un valor de 0 o falso debido a que en sus circuitos interviene una variable que se encuentra en un valor falso.

En el caso del manejo de las señales análogas, se encontró que requieren el uso de bloques de función colocados sobre los circuitos de la programación KOP. Dichas señales dependiendo de la resolución, pueden tener muchos valores diferentes dentro de su rango de medición. Por ejemplo, cuando se habla de una señal análoga de 10 bits indica que puede tener dentro de su rango de medición 1024 valores diferentes. En el presente trabajo, el PLC escogido permite una resolución de hasta 15 bits es decir 32768 puntos de medición, sin embargo, cada entrada debe ser escalada dado que el PLC no tiene información de los tipos de sensores conectados en las entradas análogas y mira cada entrada como un valor entre 0 y 32767.

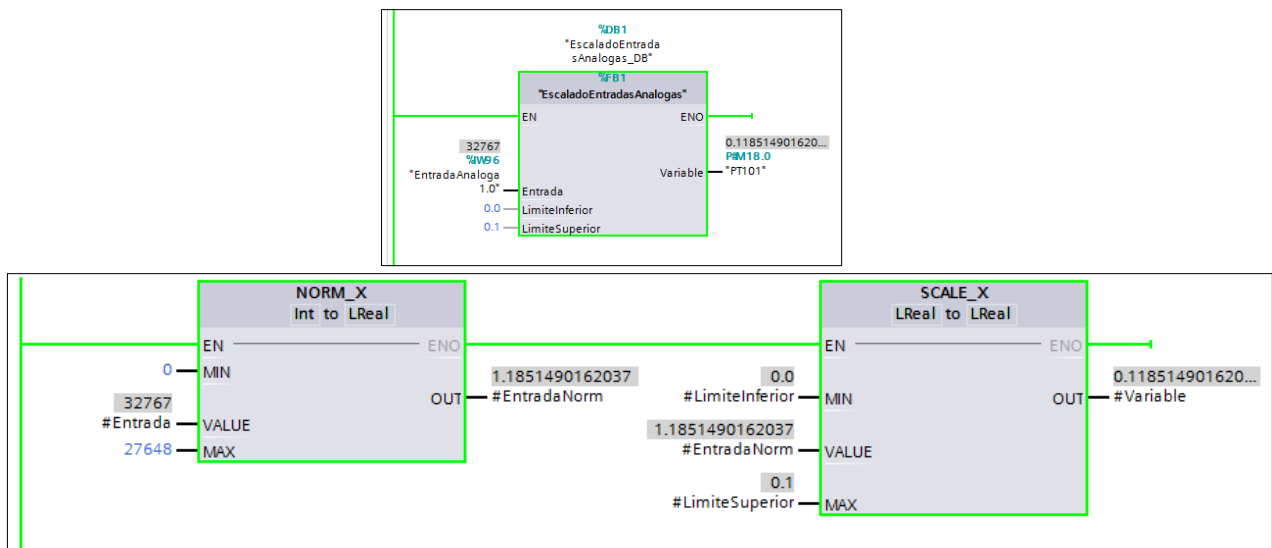


Figura 11. Representación en lenguaje KOP para manejo de entradas analógicas

En la figura 11, se observa el escalado de la señal proveniente del transmisor PT101 que tiene como rango de presión de 0 a 0.1bar. En la parte inferior de la figura 11, está la función utilizada para escalar la variable y traducirla al valor real que queremos visualizar en el sistema. En este caso, se escala solo entre los bits 0 y 27648 dado a que los bits desde 27649 hasta 32767 se utilizan para cuando la señal sobrepasa los límites de corriente o voltaje. De esta manera, el PLC queda habilitado para leer del transmisor de presión 27648 puntos en su pequeño rango de 0.1bar.

De manera similar, se trabajó con las demás señales de control y cuando se terminaron de configurar en el PLC, se desarrolló en la HMI la pantalla de prueba mostrada en la figura 12. Con esto se realizó una prueba de señales, en la que se verificó el adecuado funcionamiento de la instrumentación y su transmisión al PLC. Como observación de la prueba, quedó pendiente revisar la pérdida de señal del transmisor TT3, se encontró un error en la definición del tipo de entrada desde el PLC y se corrigió.

Configuración sistema medición de brix. A continuación, se trabajó en la introducción del algoritmo mostrado en la figura 7 al PLC. En dicho proceso se abordó la configuración del sistema de medición de brix. Como ya se disponía de los transmisores de presión, temperatura y el soporte del sistema, se desarrolló un montaje de prueba mostrado en el anexo 10, en el cual

se dejó pasar soluciones de azúcar a 50, 33, 25 grados brix y luego se dejó pasar agua para diluir el sistema. Adicionalmente, se programó una pantalla de prueba en la interfaz HMI donde se introdujeron los parámetros de configuración y se habilitó el datalogger del sistema de control para la recolección de los datos mostrados en la figura 13.

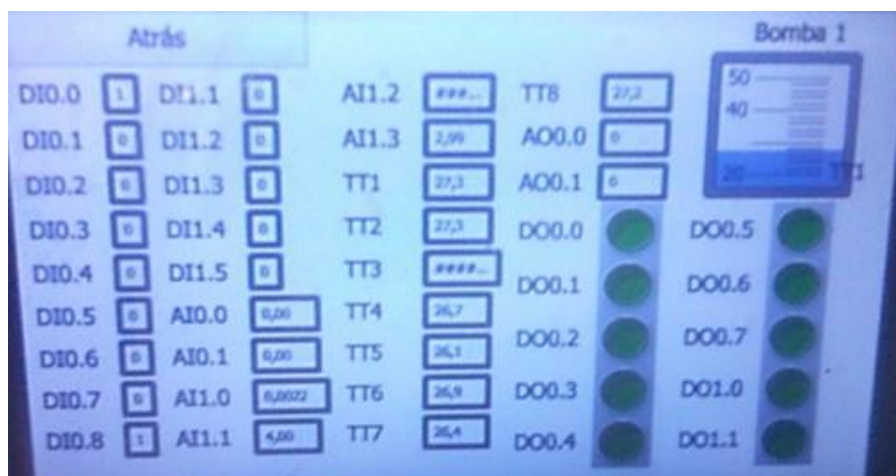


Figura 12 Prueba de señales de entrada y salida.

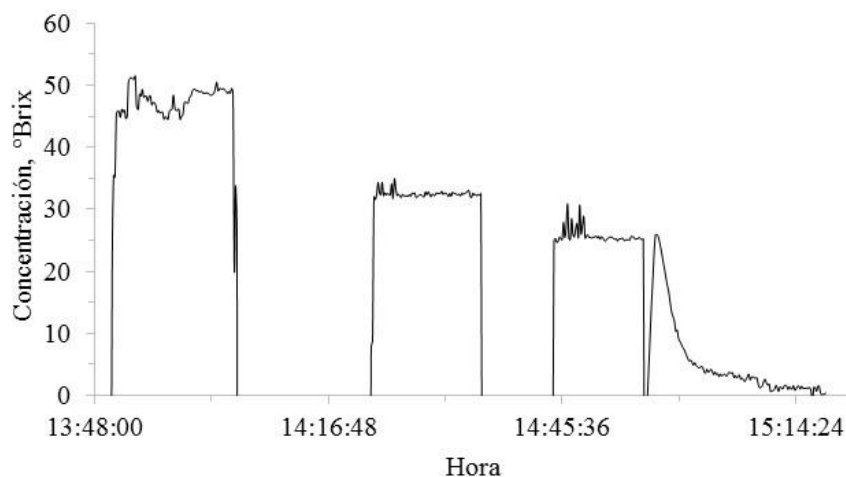


Figura 13. Resultados pruebas preliminares a sistema de medición de brix

Para lograr estos resultados fue necesario calcular previamente el sistema, definiéndose trabajar con un soporte como en el mostrado en el anexo 8 diseñado en el presente proyecto. Este soporte permite que por desborde de líquido en la parte superior se tenga un nivel constante. Haciendo un balance de energía mecánica se puede calcular la densidad del sistema por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{(P - P_{atm})}{gh} \quad (1)$$

Donde:

- ρ Densidad calculada del sistema, kg m^{-3}
 P Presión del sistema tomada del transmisor de presión, Pa
 P_{atm} Presión atmosférica a la altura sobre nivel del mar del sistema, Pa
 g Constante gravitacional, 9.8 m s^{-2}
 h Altura de la columna de líquido, m

Para soluciones de azúcar en agua, al cambiar la concentración se produce un cambio en la densidad que es afectado levemente por variaciones de temperatura. De tal manera que, con la densidad calculada en la Ec. 1 y la temperatura proveniente de un transmisor, se obtiene la concentración de azúcar en grados brix. En este proceso, como lo muestra la figura 14 se obtuvieron dos ecuaciones a partir de regresiones polinómicas de segundo grado de la tabla A de la norma NTC 5969, Icontec (2012) que permiten el cálculo de grados brix a partir de la densidad o viceversa, para soluciones de sacarosa a 20°C.

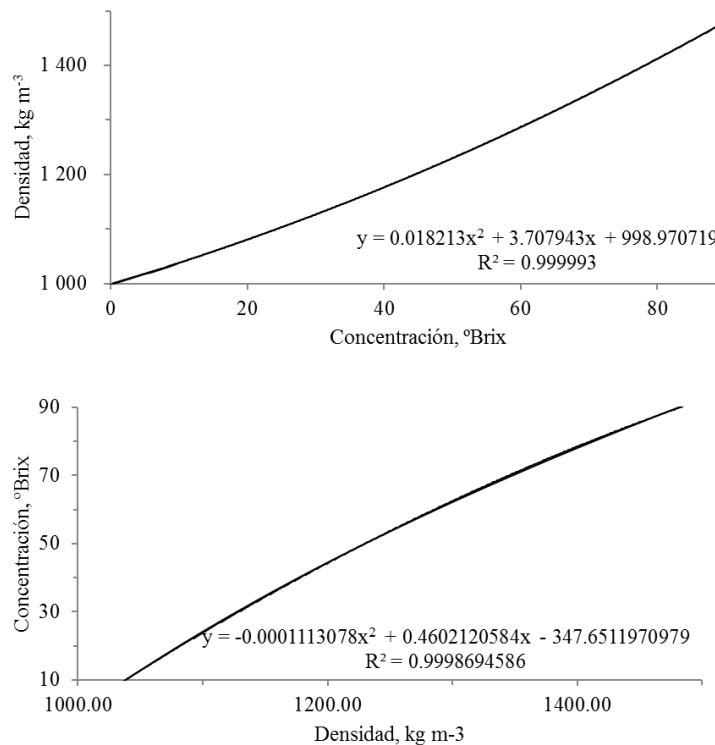


Figura 14. Regresiones polinómicas para datos la relación brix – densidad de soluciones de sacarosa a 20°C

Para compensar los efectos de tomar mediciones a temperaturas diferentes a 20°C, se tomó del manual de usuario del refractómetro de procesos CM-800 alpha, Atago (2014) la tabla mostrada en el anexo 11 que contiene datos de correcciones de la concentración por cambios en la temperatura. Se hicieron regresiones para los datos mostrados a 15 y 40°C, obteniendo la información de las figuras 15 y 16.

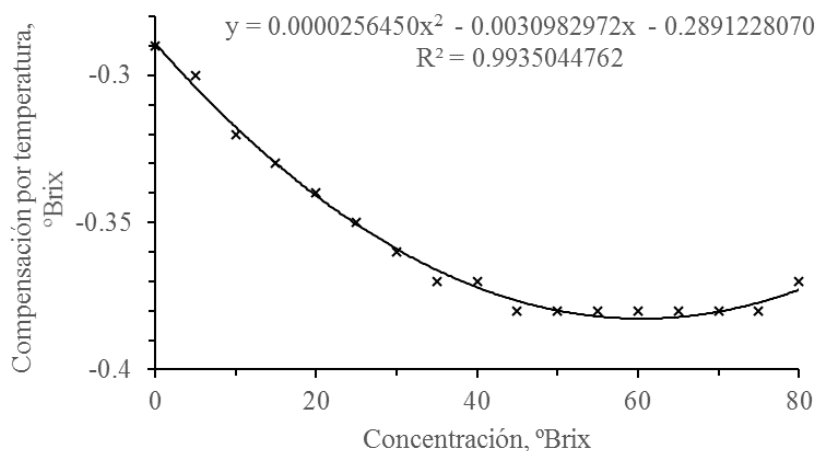


Figura 15. Compensación por temperatura de la concentración de soluciones de sacarosa a 15°C

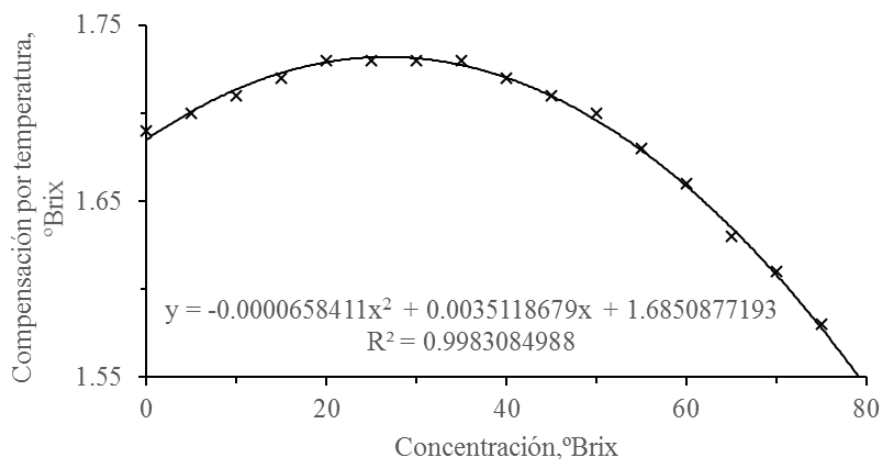


Figura 16. Compensación por temperatura de la concentración de soluciones de sacarosa a 40°C

Con esta información, se propuso que los coeficientes de los polinomios de segundo orden obtenidos de las regresiones de compensación de temperatura a 15°C y 40°C tuvieran un comportamiento lineal con respecto a la temperatura, por lo cual se crearon los siguientes

sistemas de ecuaciones y sus respectivas soluciones:

- Con coeficientes de orden cero:

$$\left. \begin{aligned} -2.8912 \times 10^{-1} &= 15a_0 + b_0 \\ 1.6851 &= 40a_0 + b_0 \end{aligned} \right\} \rightarrow a_0 = 7.8968 \times 10^{-2}, b_0 = -1.4736 \quad (2)$$

- Con coeficientes de primer orden:

$$\left. \begin{aligned} -3.0983 \times 10^{-3} &= 15a_1 + b_1 \\ 3.5119 \times 10^{-3} &= 40a_1 + b_1 \end{aligned} \right\} \rightarrow a_1 = 2.6441 \times 10^{-4}, b_1 = -7.0644 \times 10^{-3} \quad (3)$$

- Con coeficientes de segundo orden:

$$\left. \begin{aligned} 2.5645 \times 10^{-5} &= 15a_2 + b_2 \\ -6.5841 \times 10^{-5} &= 40a_2 + b_2 \end{aligned} \right\} \rightarrow a_2 = -3.6594 \times 10^{-6}, b_2 = 8.0536 \times 10^{-5} \quad (4)$$

De esta manera se obtiene la siguiente ecuación para la compensación de brix con respecto a la temperatura:

$$CAT = \sum_{i=0}^{i=2} (a_i T + b_i) B^i \quad (5)$$

Donde:

CAT	Compensación automática de temperatura, °Brix
T	Temperatura de medición, °C
a _i , b _i	Coeficientes de regresión encontrados en Ec. 2, Ec. 3 y Ec. 4
B	Brix de la solución antes de compensación automática de temperatura, °Brix

Por consiguiente, la ecuación del brix real del sistema compensado a 20°C está dada por:

$$\mathbf{Brix = B + CAT}$$

(6)

Donde Brix corresponde a la composición real de la solución en porcentaje peso a peso.

Este procedimiento de cálculo fue introducido en una tabla de Microsoft Excel y se reprodujo la tabla de compensaciones de Atago (2014), como se muestra en el anexo 11 parte b, al comparar estas tablas se encontró un error máximo de 0.17°Brix. Adicionalmente, el anexo 12 muestra la programación del PLC donde se aplicaron las formulas desarrolladas para el cálculo de brix. En este apartado se refleja también que fue necesario desarrollar un filtro de la señal de brix dado a que por las bombas tipo diafragma utilizadas en el sistema de evaporación se genera un flujo pulsante que logra variar sensiblemente el nivel del sistema de medición de Brix. Por ello se calcula un valor promedio por cada segundo.

Configuraciones adicionales. Durante el desarrollo de software del PLC fue necesario incluir otros sistemas de medición para tener mayor acceso a información y control de los evaporadores, entre estos sistemas se encuentran:

- **Contadores de flujo** Estos dispositivos SEA YF-S201 generan una señal digital gobernada por la siguiente ecuación:

$$f = 7.5Q \quad (7)$$

Donde:

- f Frecuencia de la señal digital, Hz
- Q Flujo que pasa por el sensor, l/min

Esto indica que si el sensor genera 7.5 pulsos en un segundo, la velocidad de flujo correspondería a 1 litro por minuto. Como el rango del sensor es de 1 a 30 l/min, entonces podría llegar a generar señales de hasta 225 pulsos por segundo, esta situación implicó la programación de contadores rápidos en el PLC y de allí obtener señales de flujo y volumen total de líquido a la entrada y salida del sistema de evaporación. Dichos contadores fueron fundamentales en el desarrollo una interfaz que permitiera ver el balance de materiales en tiempo real.

- **Medición de nivel.** Como se muestra en el anexo 10, se incluyeron en el sistema 2

interruptores de nivel por principio capacitivo ubicados en las mirillas de vidrio de la zona de calandrias de los evaporadores. Estos sensores ayudan al control de nivel de solución en la calandria y tienen una ranura que permite con un destornillador ajustar su sensibilidad. El programa mide los tiempos en que se activan o desactivan estas señales digitales y enciende o apaga las bombas o la válvula solenoide 1. Sumado a ellos, están dos flotas de nivel ubicadas para informar al sistema el estado bajo del tanque de alimentación y un alto nivel del tanque de producto.

- **Calculo de la presión del vapor de entrada.** Considerando que se mide la temperatura en la entrada de vapor y asumiendo que la salida del calderín suministra vapor saturado, se calcula la presión de la línea utilizando la ecuación de Antoine con las constantes calculadas en el libro web de química del NIST (2016).

- **Sensor de presión de vacío.** El valor de presión proveniente del transmisor PIT2 se utiliza para encender o apagar la bomba de vacío cuando la presión se encuentre por encima o debajo del valor deseado respectivamente. Dicho sensor envía una señal de 1 a 5VDC en el rango de presión de -1 a 1 bar. Dicho escalamiento se introdujo en el programa del PLC.

- **Balance de materiales.** Se programó en el controlador cálculos que permiten el balance de materia y es mostrado en tiempo real por la HMI, adicional tiene un botón de reseteo de los totalizadores.

Programación de lazos de control. Finalizados el conexionado y configuración de las señales de entrada provenientes de los diferentes sistemas de medición instalados y de las señales para manejo de instrumentación de salida, y considerando el diseño desarrollado en la sección 3.3 para el sistema de control del evaporador de doble efecto, se procedió a la programación de los lazos de control basándose en el diagrama de flujo para el programa del PLC mostrado en la figura 7. En el anexo 13 se muestran los diagramas KOP de los lazos de control configurados en el PLC.

Programación HMI. Se trabajó en el formato de la HMI (Interfaz usuario máquina. Este dispositivo no realiza ningún tipo de cálculo solo permite la visualización de variables de salida y el cambio de valores en las variables de entrada programados en el PLC. Por ello, como se

muestra en el anexo 14, se diseñó una pantalla principal desde la cual se accede a las diferentes ventanas del sistema. Las demás ventanas programadas son las siguientes: Vista global del sistema, evaporador 1, evaporador 2, intercambiador 1, control de brix del producto, control de bombas, control de vacío, balance de materia y configuración del sistema.

Prueba y afinación de la programación. Con el fin de optimizar los parámetros programados en el sistema de control, se determinó realizar las siguientes pruebas:

- **Prueba de control en paralelo con agua.** Se ejecutó en el sistema el siguiente procedimiento: se colocaron las válvulas manuales para operación en paralelo, se llenó el tanque de alimentación con agua, se colocó el sistema en automático desde el panel de operación manual y se inició el control automático en paralelo desde la interfaz HMI. Después se procedió a observar que los lazos de control trabajaran adecuadamente y se hicieron las modificaciones necesarias.
- **Prueba de control en contracorriente con agua.** Se ejecutó de igual manera que la prueba en paralelo con agua, pero con las válvulas manuales configuradas para operación en contracorriente.
- **Prueba de control en paralelo con agua y vapor.** Se ejecutó de igual manera que la prueba en paralelo con agua, pero permitiendo el suministro de vapor entre 15 a 20psig provenientes desde el calderín.
- **Prueba de control en contracorriente con agua y vapor.** Se ejecutó de igual manera que la prueba en contracorriente con agua, pero permitiendo el suministro de vapor entre 15 a 20psig provenientes desde el calderín.

La realización de las pruebas mencionadas, evidenció parámetros que requerían cambios para mejorar la programación desarrollada. Por tanto, al finalizar y corregir las observaciones resultantes, se logró dejar el sistema listo para el arranque y puesta en servicio.

3.8 PUESTA EN MARCHA Y ENTREGA DEL SISTEMA

Se realizaron los cálculos de insumos necesarios para realizar una prueba completa del sistema

de control implementado en el evaporador de doble efecto usando el sistema agua-azúcar. Se tuvo en cuenta las acciones de seguridad necesarias para proteger el sistema, se exploró los diversos modos de operación y se recopiló información de los procedimientos operativos a seguir. La tabla 3 resume las configuraciones de los lazos de control del sistema introducidas en la HMI para la operación en automático del sistema en paralelo y contracorriente.

Tabla 3. Parámetros de control configurados

Lazo de control	Variable controlada	Variable manipulada	Configuraciones HMI paralelo	Configuraciones HMI contracorriente
PC1 - Generación de vacío	PIT2 P.Op: Membrana con puente de resistencias	Bomba Vacío	Retardo enc: 10 000 ms	Retardo enc: 10 000 ms
LC1 - Nivel evaporador 1	LIT1 P.Op: Capacitivo	Bomba 1 POT 1	Retardo enc: 5 000 ms	Retardo enc: 20 000 ms
LC2 - Nivel evaporador 2	LIT2 P. Op: Capacitivo	Válvula Solenoide 1	Retardo enc: 2 000 ms	Retardo enc: 10 000 ms
AC1 - Brix de salida	Brix P. Op: Calculo a partir de datos de presión y temperatura	Bomba 2 POT2	SPBrix: 30.0 °Bx Ganancia: 0.05 Tiempo integral: 1.00 s Tiempo derivativo:1.00 s Sintonía: Error y ensayo Limite bajo salida: 7% Acción: Inversa Retardo enc: 20 000 ms	SPBrix: 25.0 °Bx Ganancia: 0.05 Tiempo integral: 1.00 s Tiempo derivativo:1.00 s Sintonía: Error y ensayo Limite bajo salida: 7% Acción: Inversa Retardo enc: 20 000 ms
RC1 - Recirculación	Recirculación Sin retransmisión	Válvulas Solenoide 2 - 3	Tolerancia: 2.00 °Bx Retardo enc: 5 000 ms	Tolerancia: 2.00 °Bx Retardo enc: 5 000 ms

Finalmente, con la documentación compilada durante todo el proyecto sumado al manual de operación desarrollado, se creó una carpeta de documentación con respaldo digital en CD y se entregó al personal a cargo. Se realizó la respectiva capacitación y se firmó un documento de entrega.

4. CONCLUSIONES

- Se logró acondicionar y recuperar el evaporador de doble efecto habilitándolo para operar de forma tanto manual como automática, con sistemas de control que permiten la obtención de un producto dentro de los parámetros deseados.
- El proceso de automatización del evaporador de doble efecto consistió en la caracterización de su condición inicial, el conocimiento a fondo cada componente, la identificación del modo de operación de los subsistemas encontrados, el diseño de un nuevo sistema de control, la identificación y adquisición de equipos faltantes, el diseño de las modificaciones eléctricas y mecánicas, la implementación física de los diseños desarrollados, el conexionado, configuración y prueba de la instrumentación, la programación del PLC y la HMI y finalmente el arranque y puesta en servicio del sistema.
- El software seleccionado permitió de manera eficiente plasmar los diseños mecánicos, eléctricos y de control, así como la programación del PLC y la HMI.
- El acople de la instrumentación de campo con los sistemas de control como el PLC y la HMI, requiere de un manejo y escalamiento de las diferentes señales industriales que intervienen, así como la implementación de un algoritmo que permita ligar dichas señales con las acciones de control ejecutadas por el PLC en la instrumentación de salida.
- Fue posible el desarrollo de un sistema para medición de concentración de azúcar (°Brix) en la línea de producto. Para ello se requiere la adquisición de datos de presión y temperatura de una columna de líquido de altura fija y el empleo de las ecuaciones desarrolladas en el presente trabajo.

5. REFERENCIAS

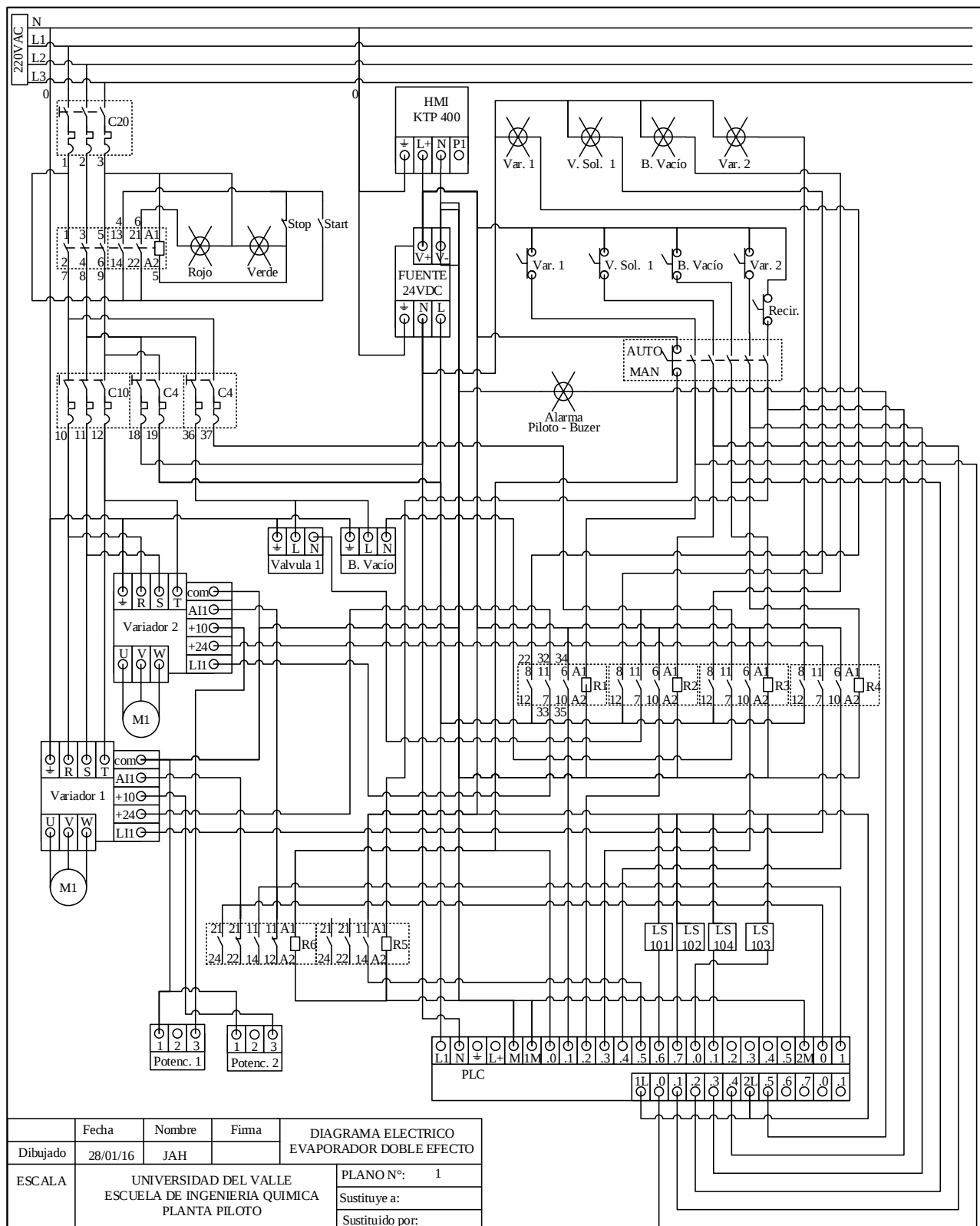
- Andre, H., & Ritter, R. A. (1968). Dynamic response of a double effect evaporator. *Can. J. Chem. Eng.*, 46: 259–264.
- Atago. (2014). *In line brix monitor CM800alpha instruction manual Cat. 3564-E03*. Tokyo: ATAGO CO.,LTD.
- Carbajal, B., Montes, S., & Rosales, J. (2008). *Tesis: Sistema de control para el proceso de evaporación en la producción de azúcar estandar*. México, D. F.: Instituto Politecnico Nacional.
- Durand, A. (1996). A shortcut for designing evaporators. *Chem. Eng.*, 103(1):123-126.
- Harriott, P., McCabe, W. L., & Smith, J. C. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Madrid: McGraw-Hill. 482-517.
- Icontec. (2012). *Norma tecnica colombiana NTC 5969*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Tecnicas y Certificación.
- Instrumet Society of America. (13 de July de 1992). ANSI/ISA S5.1-1984. *Instrumentation Symbols and Identification*. Nort Carolina, United States: ISA.
- Khanam, S., & Mohanty, B. (2011). Development of a new model for multiple effect evaporator system. *Computers and Chemical Engineering*, 35: 1983-993.
- Muñoz, R. (2006). *Tesis: Sistema SCADA para el tren de evaporadores del laboratorio de procesos productivos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- NIST - National Institute of Standards and Technology. (10 de 2 de 2016). (U. S. U.S.A., Ed.)
Obtenido de Base de Datos de Referencia Estándar del NIST:
<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Units=SI&Mask=7&Type=ANTOINE>

Turc, T. (2015). Using WEB Services in SCADA Applications. *Procedia Technology*, 19:584-590.

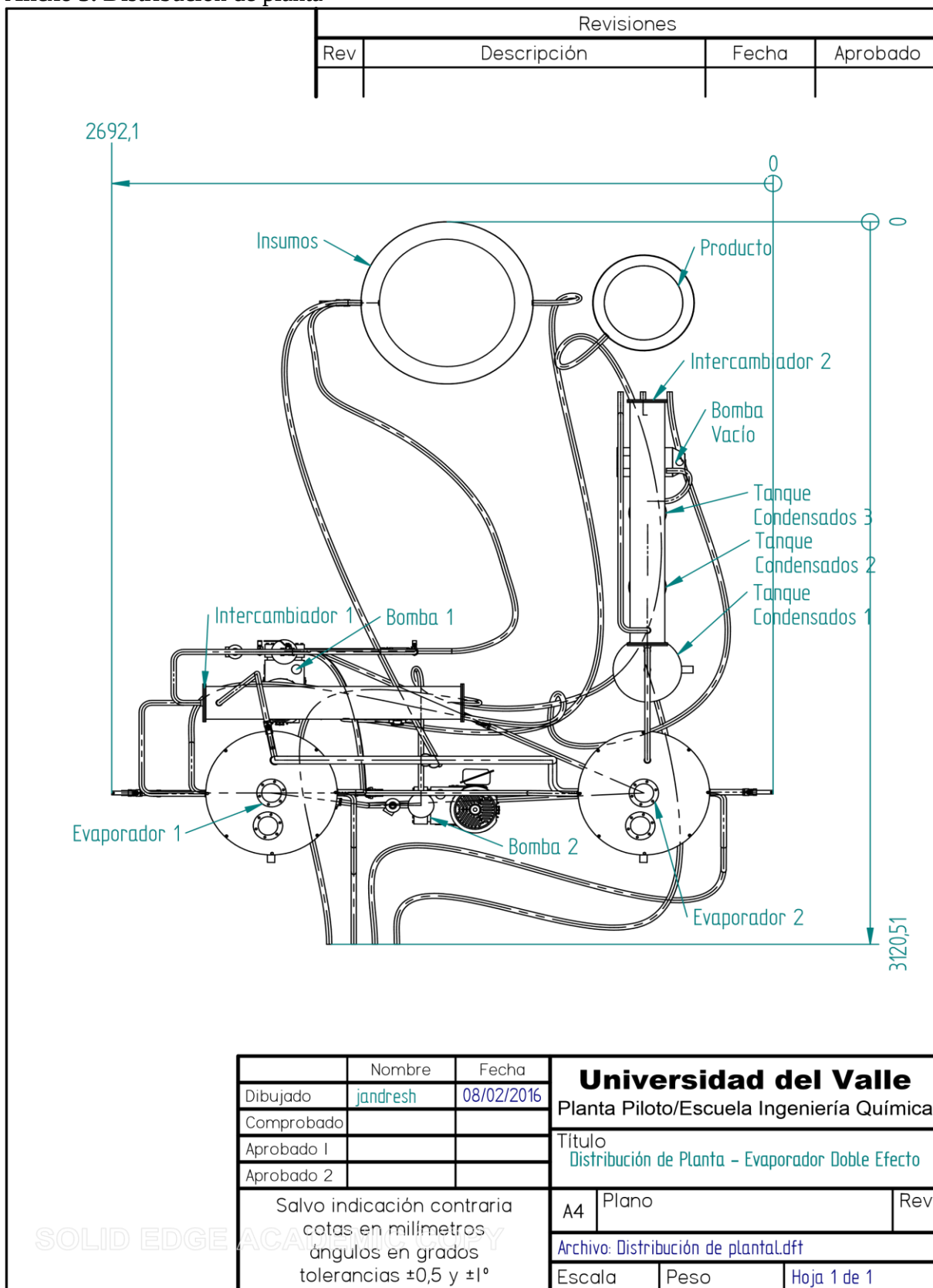
Anexo 1. Inventario del sistema de evaporación de doble efecto al inicio del proyecto

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	REFERENCIA	MARCA	ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	REFERENCIA	MARCA
1	MANGERA SUMINISTRO DE VAPOR DESDE CALDERA T-33017 BAR STEAM DRAIN AFTER USE BS/5342/A/2 NPT 47263 CT 13 DIN 2825 IQ 08	2	T-330	ALFAGOM	24	CODO 90° CON TERMOPOZO	1		
2	VALVULA SOLENODE DANFOSS MAX TEMP 185°C A 140 PSI MAX PRESIÓN DE PRUEBA 25 ATMOSFERAS	1	EY25B15	DANFOSS	25	TERMOCUPLA	1		
3	INTERCAMBIADOR DE CALOR ENTRADA INSUMOS: LONGITUD 1M DIAMETRO 5" PASOS 2 SOLUCIÓN POR TUBOS VAPOR POR CORAZA 5 TUBOS 1/4" PORCADA PASO DOS ABRAZADERAS DE 5" 1 TAPON DE 5" 1 TAPA DE 5" CON CONEXIÓN DE FLUIDO POR TUBOS 1/2" DOS CONEXIÓN PARA ENTRADA POR CORAZA DE 1/2" ROSCADA VALVULA FILTRO Y 1/2" SALIDA VAPOR DE INTERCAMBIADOR PARA PROTEGER TRAMPA DE VAPOR	1			26	SECCIÓN DE 40" + 19" CON CODO 90° CONEXIÓN CLAMP 1" AISLAMIENTO TÉRMICO CON 2 ABRAZADERAS CLAMP	1		
4	TRAMPA DE VAPOR 1/2" PMO 600PSIG, PMA, 600PSIG, TMA 800°F	1			27	MANJERA NEGRA	1		
5	MANJERA SALIDA DE CONDENSADO INTERCAMBIADOR CONEXIÓN 1/2"	1	1/2" TD52	SPIRAX SARCO	28	FILTRO Y INCOMPLETO	1		
6	CODO 90° 1/2 CON TERMOPOZO	1			29	TRAMPA DE VAPOR	1		
9	TERMOCUPLA	1			30	SECCIÓN DE 13" + 14" + 7" FILTRO Y 2 VÁLVULA DE BOLA, 1T, 3CODO 90° 2 ABRAZADERAS TIPO CLAMP	1		
10	SECCIÓN RECTA 14" CONEXIÓN CLAMP 1" CON 2 ABRAZADERAS	1			31	BOMBA DOSIVAC 1/2" CAUDAL MAXIMO 720 L/H PRESIÓN FINAL 4KG/CM2	1	DD600	DOSIVAC
10	TRAMO DE ENTRADA EVAPORADOR 1 CON T Y VALVULA DE BOLA 1/2"	1			32	MOTOR TRIFASICO 0.5 KW	1		METALCOR TE
11	SECCIÓN RECTA 32" CONEXIÓN CLAMP 1" CON 2 ABRAZADERAS Y EVAPORADOR 1	1			33	TIRAMO DE SALIDA CON 4T DISPOSITIVO DESAIREADOR 1T CON 2 CONEXIÓN CLAMP, 2 ABRAZADERAS CLAMP, 1 VALVULA DE BOLA Y 1 VALVULA CHEQUE	1		
12	SECCIÓN RECTA 21" CON DOS VALVULA BOLA 1" Y T CON CONEXIÓN CLAMP EN T Y OTRO EXTREMO 1 ABRAZADERA	1			34	VALVULA DE ALIVIO	1	HNVA C12	HELBERT
13	SECCIÓN RECTA 21" CON DOS VALVULA BOLA 1" Y T CON CONEXIÓN CLAMP EN T Y OTRO EXTREMO 1 ABRAZADERA	1			35	SECCIÓN DE 21" + 44" CON 1T, 2 VÁLVULA BOLA, 3 CONEXIÓN CLAMP Y 3 ABRAZADERA CLAMP	1		
14	MANGUERA VERDE DE 1/2" CONEXIÓN ROSCADA	1			36	SECCIÓN RECTA DE 15" CON 2 CONEXIÓN CLAMP 1 ABRAZADERA CLAMP	1		
15	FILTRO Y 1/2"	1			37	SECCIÓN DE 34" + 5" CON 1T, 1 CODO 90°, 2 VALVULA BOLA, 3 CONEXIÓN CLAMP, 2 ABRAZADERA CLAMP	1		
16	BOMBA DOSIVAC 1/2" CAUDAL MAXIMO 720 L/H PRESIÓN FINAL 4KG/CM2	1	DD600	DOSIVAC	38	EVAPORADOR 2			
17	TRAMO DE SALIDA CON 2 T DISPOSITIVO DESAIREADOR 1T CON CONEXIÓN CLAMP	1	B71B2-E1B66	METALCOR TE		ALTURA 3 PIES DIAMETRO 20"			
18	VALVULA DE ALIVIO	1	HNVA C12	HELBERT		FRENTE CON MIRILLA DE 20" NIVEL DE SOLUCIÓN			
19	SECCIÓN DE TUBERÍA DE 10" + 8" CON VALVULA CHEQUE 1/2" , CODO 90° Y 3 ABRAZADERAS CLAMP, ENTRADA A INTERCAMBIADOR	1				2 VALVULAS DE COMPUESTA MANUAL DE 1/4"			
20	VALVULA DE COMPUESTA MANUAL	1				IZQUIERDA SUPERIOR ALIMENTACIÓN INSUMO			
21	SECCIÓN TUBERÍA 15" CON CODO 90° Y T CON COLA MARRANO 1/4"	1				IZQUIERDA INFERIOR ALIMENTACIÓN VAPOR			
22	SIN MANÓMETRO.	1				DERECHA SUPERIOR ALIMENTACIÓN INSUMO			
23	EVAPORADOR 1					DERECHA INFERIOR SALIDA VAPOR			
	ALTURA 3 PIES DIAMETRO 20"					ABAJOSALIDA PRODUCTO CON T Y 2 CONEXIÓN CLAMP 2 ABRAZADERAS			
	FRENTE CON MIRILLA DE 20" NIVEL DE SOLUCIÓN					ATRÁS TERMOPOZO DE 10"			
	IZQUIERDA SUPERIOR ALIMENTACIÓN INSUMO					TERMOCUPLA PARA TEMPERATURA DE FONDO			
	IZQUIERDA INFERIOR ALIMENTACIÓN VAPOR					PARTE SUPERIOR CON DOS MIRILLAS DE VIDRIO DE 4" CON TERMOPOZO DE 10" Y CONEXIÓN DE 1/4" PARA MANÓMETRO			
	DERECHA SUPERIOR ALIMENTACIÓN INSUMO					MANOVACUOMETRO VERTICAL WIKI CNX 1/4 CON COLAMARRANO Y CLICERNA CARATULA 2 1/2 RANGO -1 A 0 BAR			
	DERECHA INFERIOR SALIDA VAPOR					TERMOCUPLA PARA TEMPERATURA INTERNA DE VAPOR			
	ABAJOSALIDA PRODUCTO CON T Y 2 CONEXIÓN CLAMP					CODO 90° CON TERMOPOZO	1		
	ATRÁS TERMOPOZO DE 10"					RTD OPT100	1		
	TERMOCUPLA PARA TEMPERATURA DE FONDO					CONEXIÓN Y ABRAZADERA CLAMP	1		
	PARTE SUPERIOR CON DOS MIRILLAS DE VIDRIO DE 4" CON TERMOPOZO DE 10" Y CONEXIÓN DE 1/4" PARA MANÓMETRO				42	MANJERA NEGRA	1		
	TERMOCUPLA PARA TEMPERATURA INTERNA DE VAPOR				44	GABINETE 50 X 70 X 25	1		
					45	GABINETE DE 30 X 12 X 25	1		

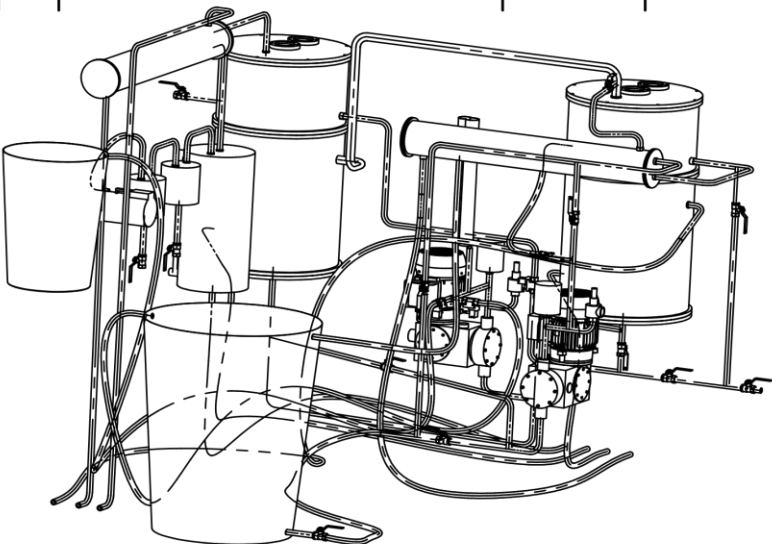
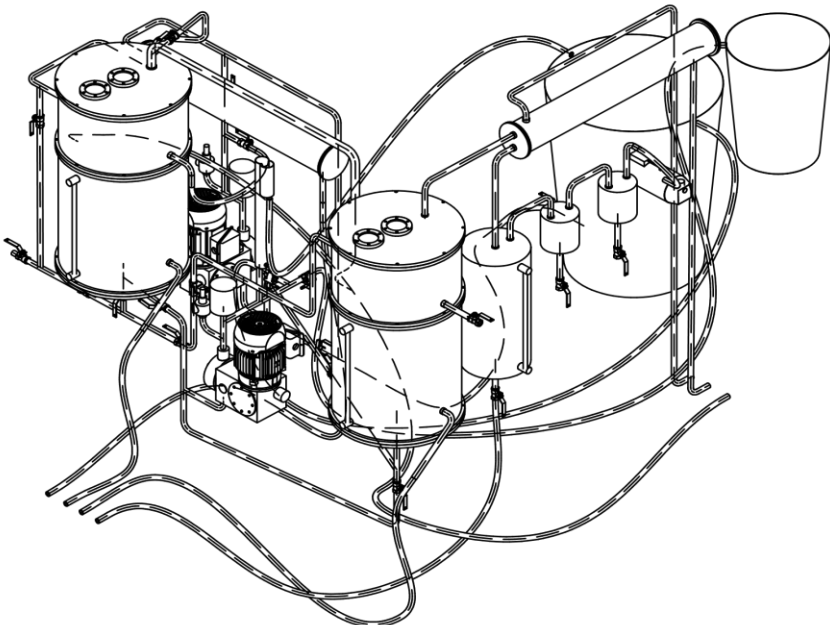
Anexo 2. Diagrama eléctrico multifilar del evaporador de doble efecto, sin considerar los módulos de entradas y salidas analógicas.



Anexo 3. Distribución de planta

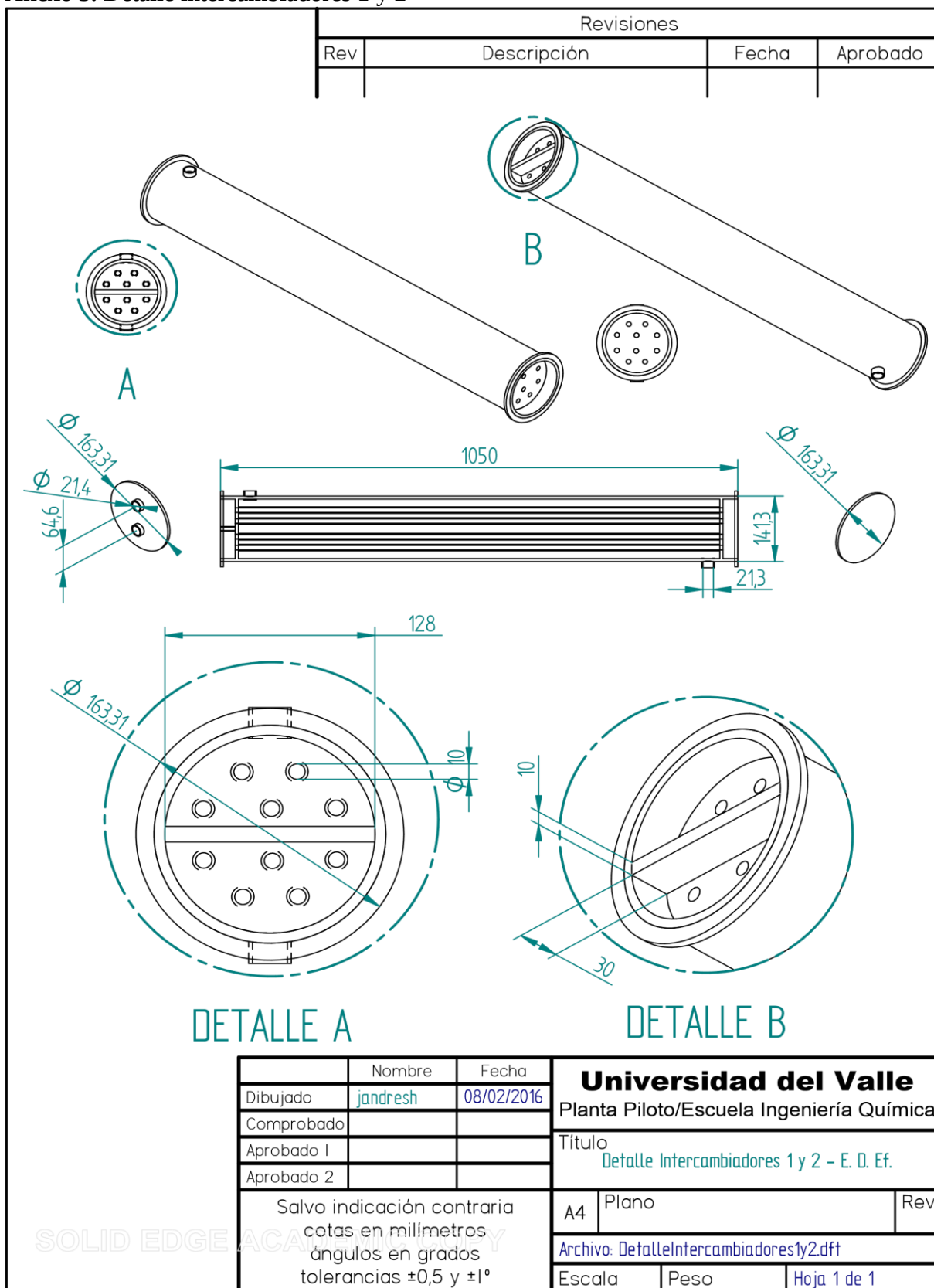


Anexo 4. Vistas isométrica y trasera del diseño mecánico

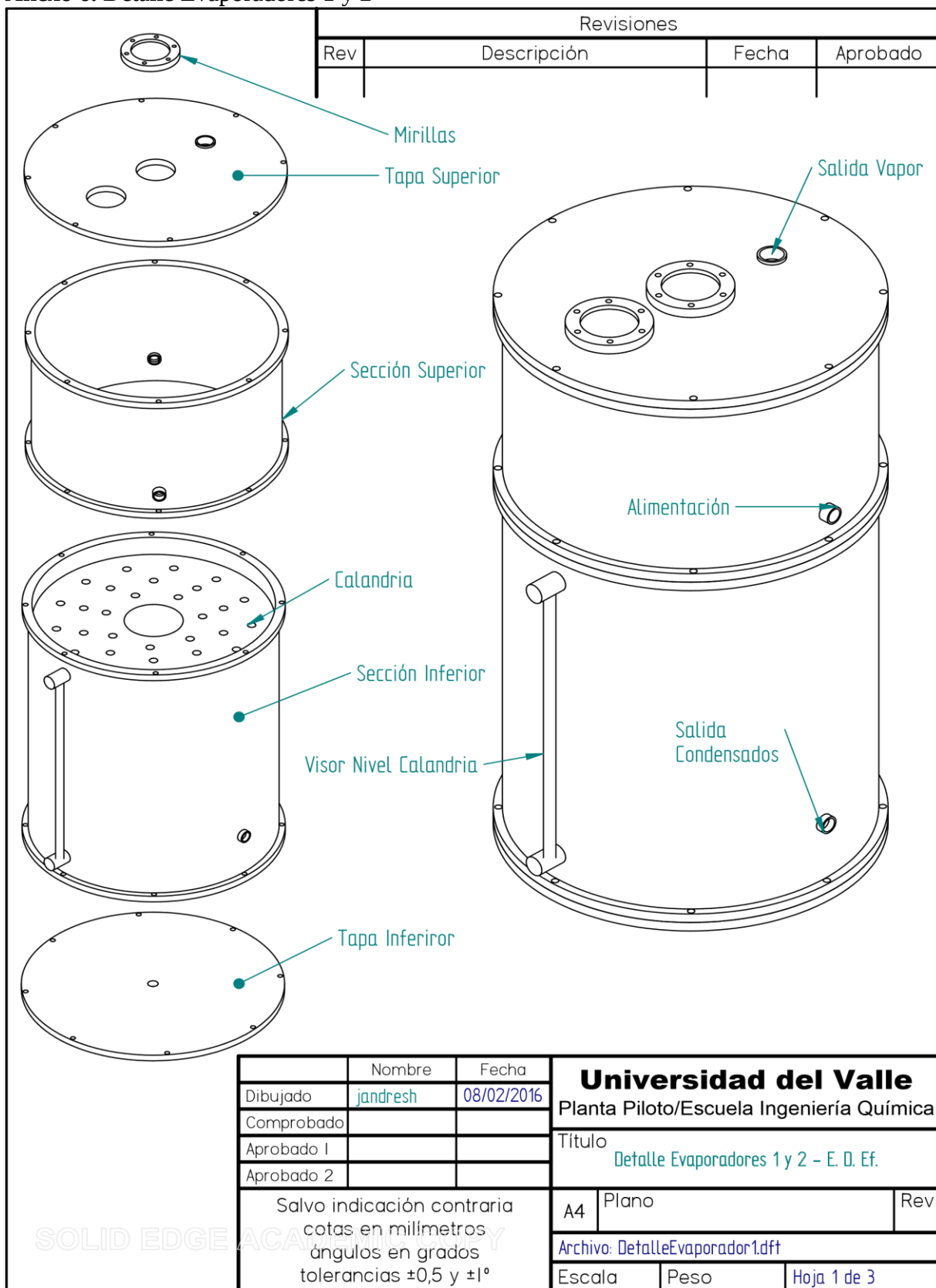
		Revisiones			
		Rev	Descripción	Fecha	Aprobado
Trasera					
					
Isométrica					

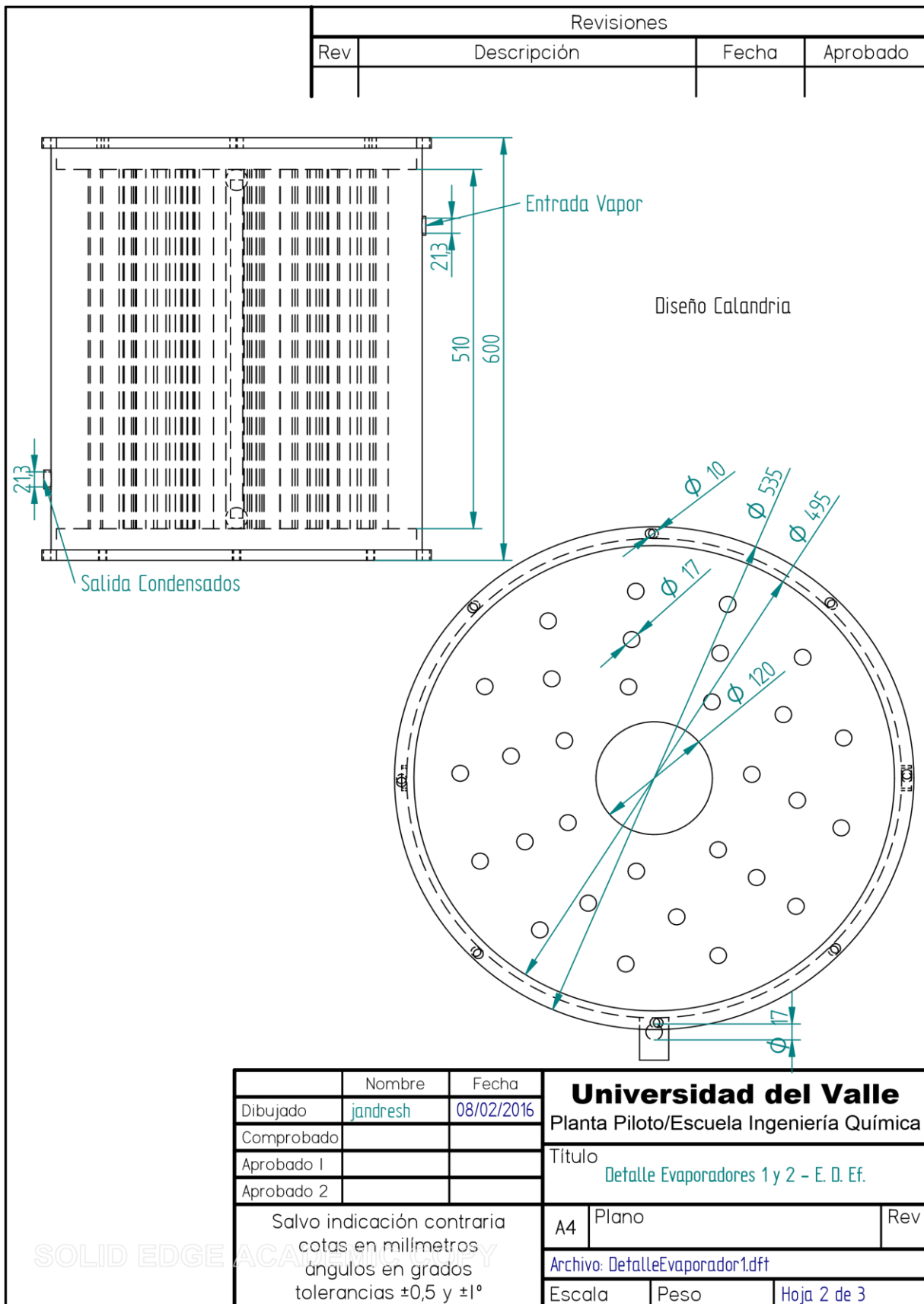
	Nombre	Fecha	Universidad del Valle	
Dibujado	jandresh	08/02/2016	Planta Piloto/Escuela Ingeniería Química	
Comprobado			Título	
Aprobado 1			Vistas Isométrica y Trasera - Evaporador Doble Efecto	
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano
Archivo: Isometrica.dft			Rev	
Escala			Peso	Hoja 1 de 1

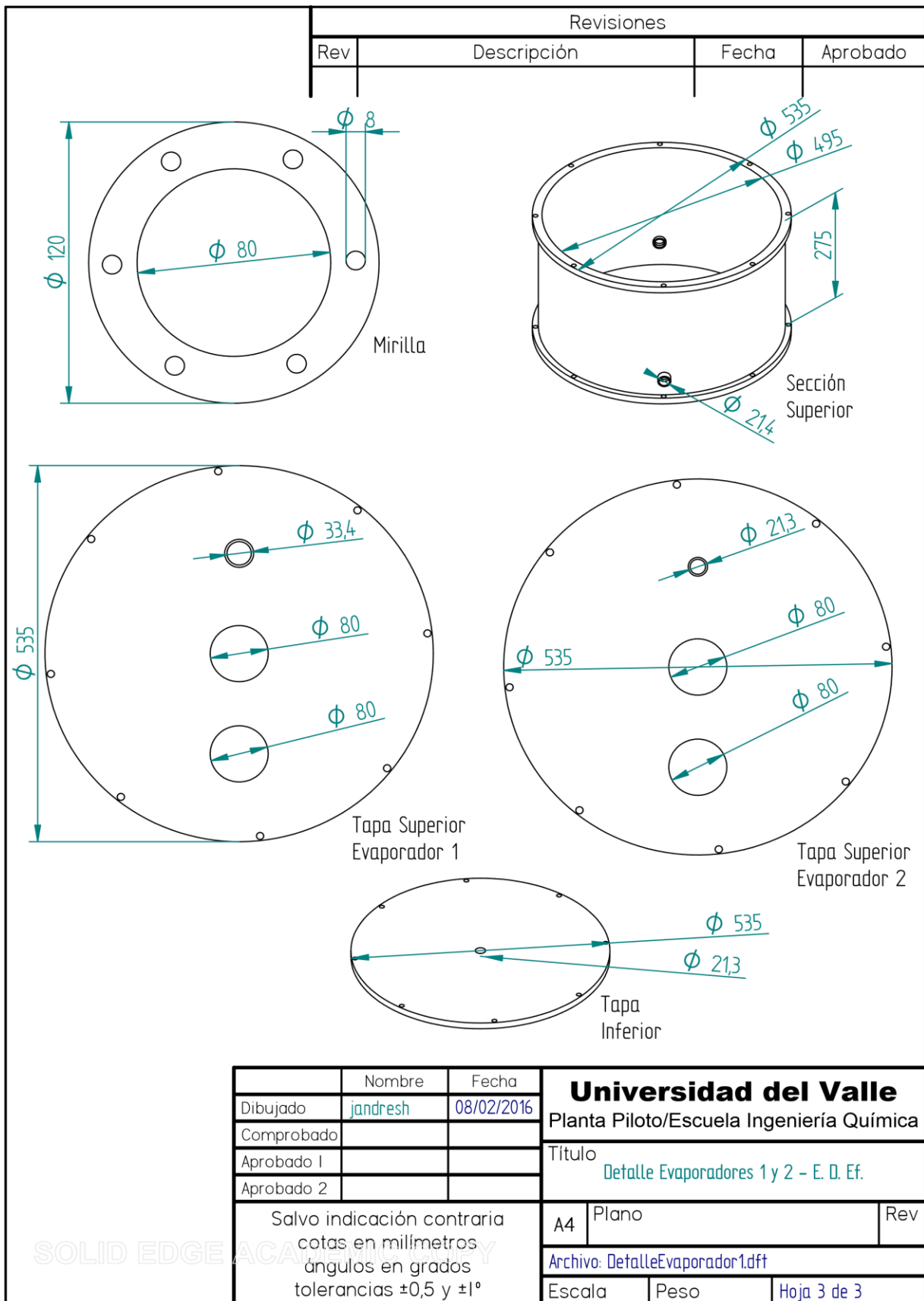
Anexo 5. Detalle intercambiadores 1 y 2



Anexo 6. Detalle Evaporadores 1 y 2

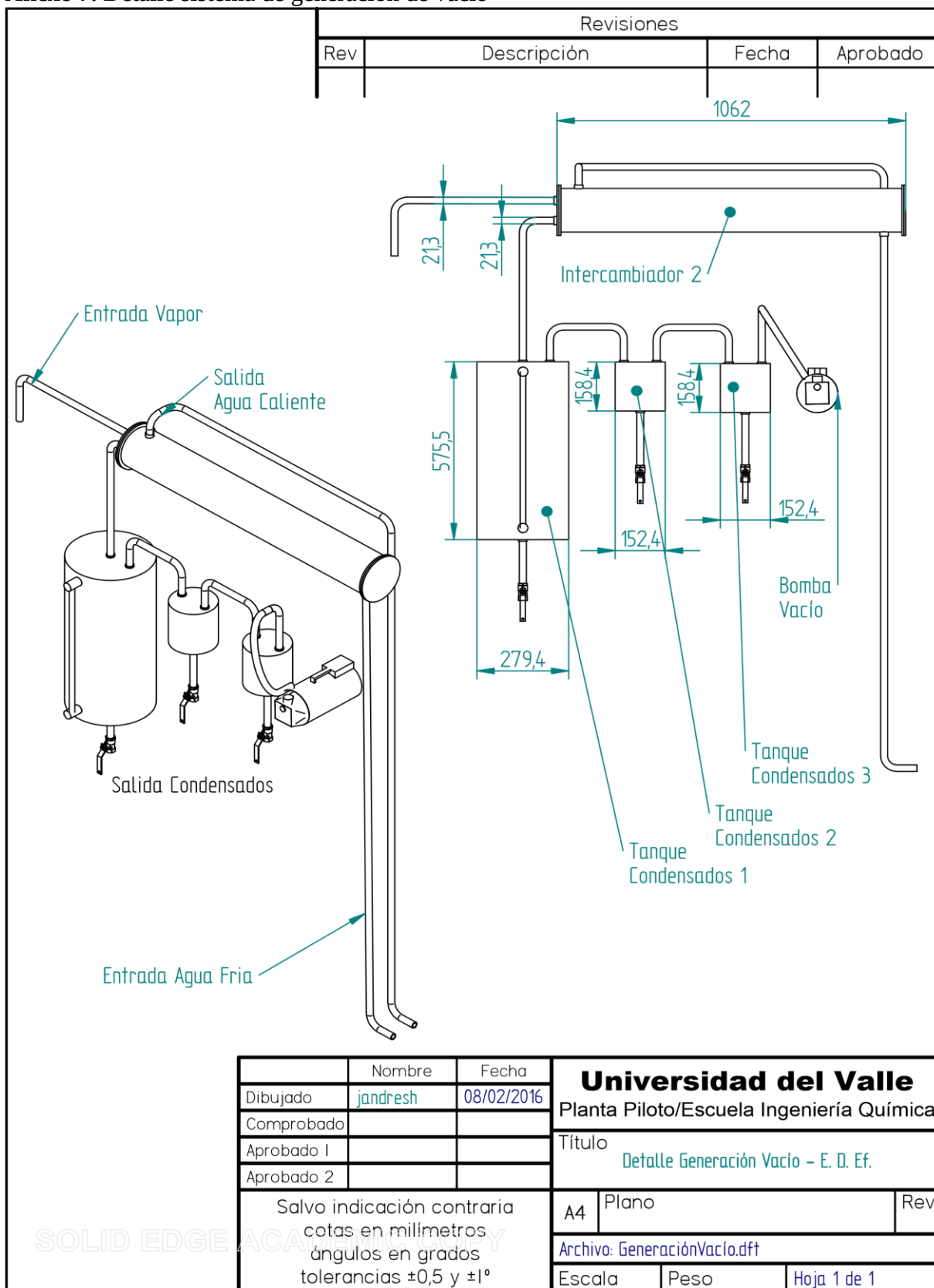






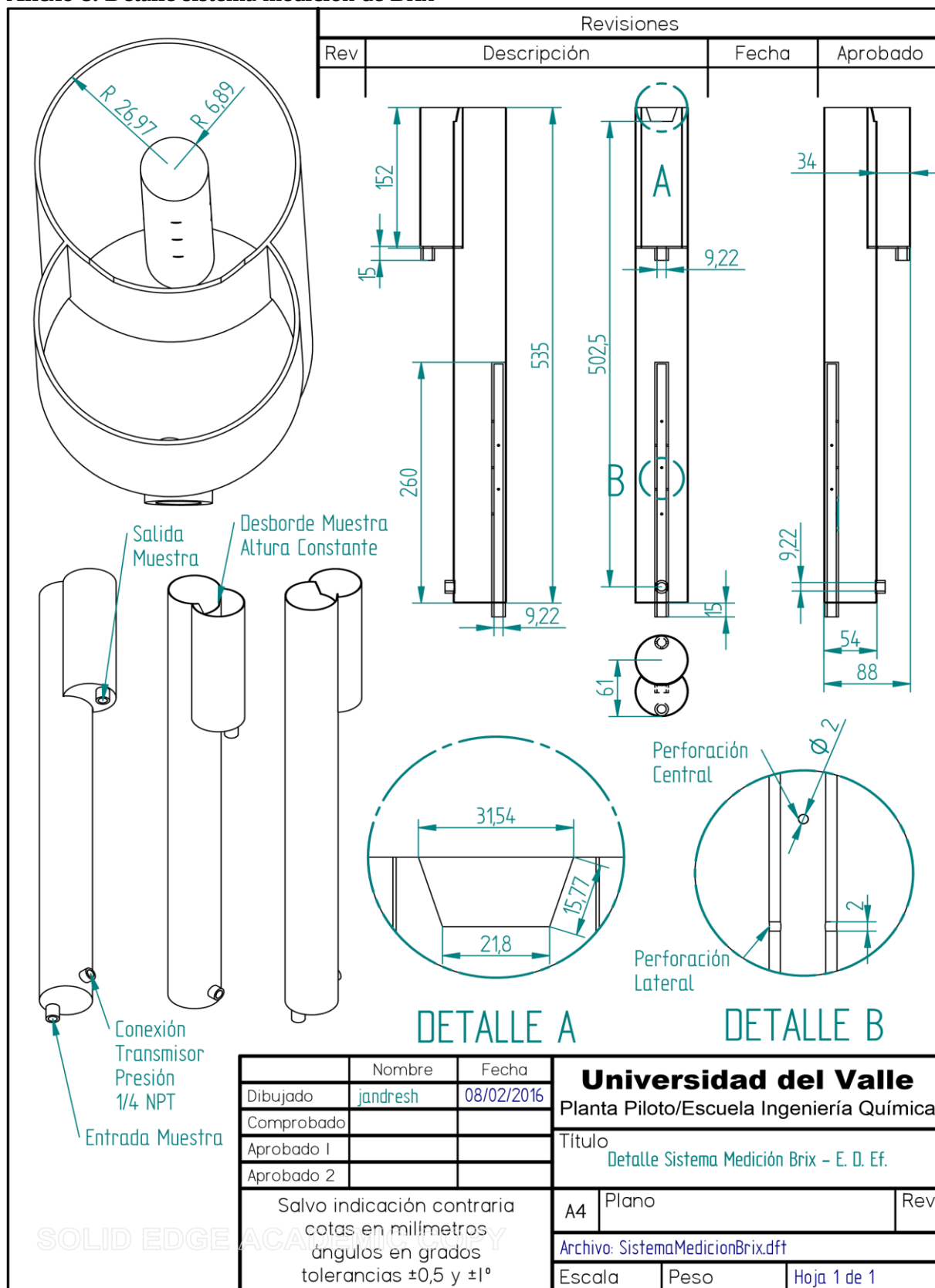
	Nombre	Fecha	Universidad del Valle Planta Piloto/Escuela Ingeniería Química	
Dibujado	jandresh	08/02/2016		
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Título Detalle Evaporadores 1 y 2 - E. D. Ef.	
			A4	Plano
			Archivo: DetalleEvaporador1.dft	
			Escala	Peso
			Hoja 3 de 3	

Anexo 7. Detalle sistema de generación de vacío



	Nombre	Fecha	Universidad del Valle Planta Piloto/Escuela Ingeniería Química Título Detalle Generación Vacío - E. D. Ef. A4 Plano Archivo: GeneraciónVacío.dft Escala Peso Hoja 1 de 1	
Dibujado	jandresh	08/02/2016		
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Rev	

Anexo 8. Detalle sistema medición de Brix



Anexo 8. Antes, durante y después de trabajos eléctricos.



Anexo 9. Soporte fotográfico de modificaciones mecánicas realizadas al sistema de evaporadores de doble efecto

Vista Global antes			
Vista global después			
Entrada y bypass bomba 1 antes			
Entrada y bypass bomba 1 después			
Bypass intercambiador 1 antes y después			

Entrada bomba 2 antes			
Entrada Bomba 2 después			
Entrada vapor intercambiador 1 antes y después			
Traslado válvula solenoides 1 antes y después			
Salida bomba 2 y sistema medición de brix			

Anexo 10. Configuración de instrumentación de campo

- Sistema de medición de Brix



- Sensores de nivel capacitivos



- Flotas de nivel



Anexo 11. Tablas de compensación de concentración en soluciones de azúcar por cambios en la temperatura

- Tabla suministrada por manual de refractómetro CM-800alpha (Atago, 2014)

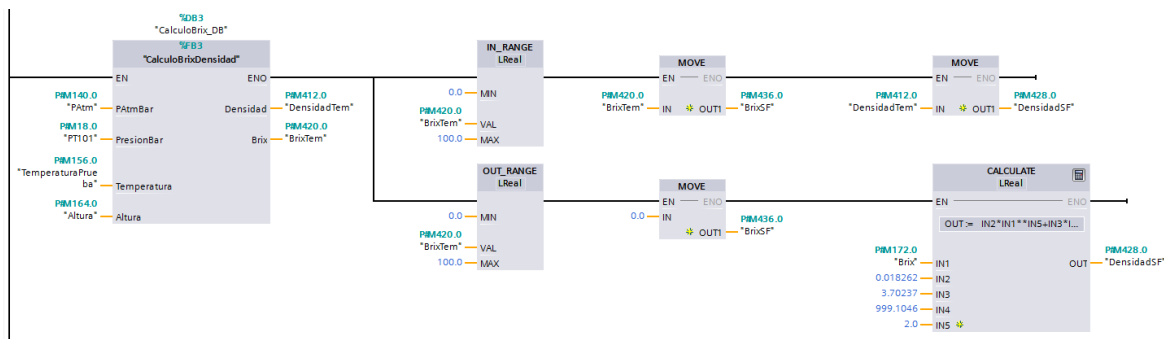
Temperatura (°C)	Sucrose (g/100g)																	
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
15	-0.29	-0.30	-0.32	-0.33	-0.34	-0.35	-0.36	-0.37	-0.37	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.37	-0.37
16	-0.24	-0.25	-0.26	-0.27	-0.28	-0.28	-0.29	-0.30	-0.30	-0.30	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.30	-0.30	-0.30
17	-0.18	-0.19	-0.20	-0.20	-0.21	-0.21	-0.22	-0.22	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	-0.22
18	-0.12	-0.13	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
19	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	+0.06	+0.07	+0.07	+0.07	+0.07	+0.07	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.07
22	+0.13	+0.14	+0.14	+0.14	+0.15	+0.15	+0.15	+0.15	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.16	+0.15	+0.15	+0.15
23	+0.20	+0.21	+0.21	+0.22	+0.22	+0.23	+0.23	+0.23	+0.23	+0.24	+0.24	+0.24	+0.24	+0.23	+0.23	+0.23	+0.23	+0.22
24	+0.27	+0.28	+0.29	+0.29	+0.30	+0.30	+0.31	+0.31	+0.31	+0.32	+0.32	+0.32	+0.32	+0.31	+0.31	+0.31	+0.30	+0.30
25	+0.34	+0.35	+0.36	+0.37	+0.38	+0.38	+0.39	+0.39	+0.40	+0.40	+0.40	+0.40	+0.40	+0.39	+0.39	+0.38	+0.38	+0.37
26	+0.42	+0.43	+0.44	+0.45	+0.46	+0.46	+0.47	+0.47	+0.48	+0.48	+0.48	+0.48	+0.48	+0.47	+0.47	+0.46	+0.46	+0.45
27	+0.50	+0.51	+0.52	+0.53	+0.54	+0.55	+0.55	+0.56	+0.56	+0.56	+0.56	+0.56	+0.56	+0.55	+0.55	+0.54	+0.53	+0.52
28	+0.58	+0.59	+0.60	+0.61	+0.62	+0.63	+0.64	+0.64	+0.64	+0.65	+0.65	+0.64	+0.64	+0.63	+0.63	+0.62	+0.61	+0.60
29	+0.66	+0.67	+0.68	+0.70	+0.71	+0.71	+0.72	+0.73	+0.73	+0.73	+0.73	+0.73	+0.72	+0.72	+0.71	+0.70	+0.69	+0.67
30	+0.74	+0.76	+0.77	+0.78	+0.79	+0.80	+0.81	+0.81	+0.82	+0.82	+0.81	+0.81	+0.80	+0.80	+0.79	+0.78	+0.76	+0.75
31	+0.83	+0.84	+0.85	+0.87	+0.88	+0.89	+0.89	+0.90	+0.90	+0.90	+0.90	+0.89	+0.89	+0.88	+0.87	+0.86	+0.84	+0.82
32	+0.92	+0.93	+0.94	+0.96	+0.97	+0.98	+0.98	+0.99	+0.99	+0.99	+0.99	+0.98	+0.97	+0.96	+0.95	+0.93	+0.92	+0.90
33	+1.01	+1.02	+1.03	+1.05	+1.06	+1.07	+1.07	+1.08	+1.08	+1.08	+1.07	+1.07	+1.06	+1.04	+1.03	+1.01	+1.00	+0.98
34	+1.10	+1.11	+1.13	+1.14	+1.15	+1.16	+1.16	+1.17	+1.17	+1.16	+1.16	+1.15	+1.14	+1.13	+1.11	+1.09	+1.07	+1.05
35	+1.19	+1.21	+1.22	+1.23	+1.24	+1.25	+1.25	+1.26	+1.26	+1.25	+1.25	+1.24	+1.23	+1.21	+1.19	+1.17	+1.15	+1.13
36	+1.29	+1.30	+1.31	+1.33	+1.34	+1.34	+1.35	+1.35	+1.35	+1.34	+1.34	+1.33	+1.31	+1.29	+1.28	+1.25	+1.23	+1.20
37	+1.39	+1.40	+1.41	+1.42	+1.43	+1.44	+1.44	+1.44	+1.44	+1.43	+1.43	+1.41	+1.40	+1.38	+1.36	+1.33	+1.31	+1.28
38	+1.49	+1.50	+1.51	+1.52	+1.53	+1.53	+1.54	+1.54	+1.53	+1.53	+1.52	+1.52	+1.48	+1.46	+1.44	+1.42	+1.39	+1.36
39	+1.59	+1.60	+1.61	+1.62	+1.63	+1.63	+1.63	+1.63	+1.63	+1.62	+1.61	+1.59	+1.57	+1.55	+1.52	+1.50	+1.47	+1.43
40	+1.69	+1.70	+1.71	+1.72	+1.73	+1.73	+1.73	+1.73	+1.72	+1.71	+1.70	+1.68	+1.66	+1.63	+1.61	+1.58	+1.54	+1.51

- Tabla generada a partir de la Ec. 5.

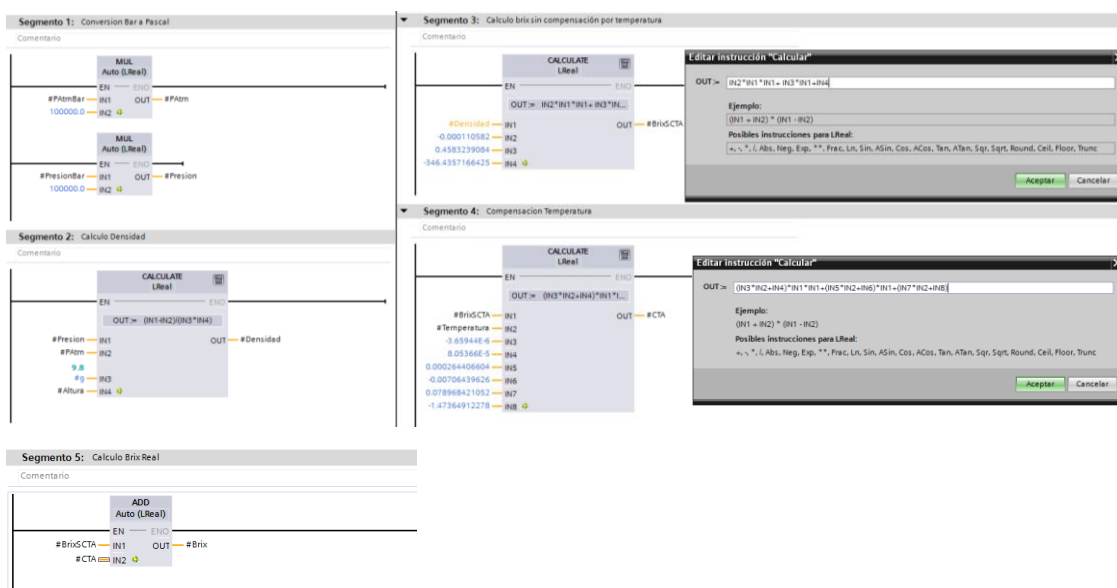
Temp\Brix	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
15	-0.29	-0.30	-0.32	-0.33	-0.34	-0.35	-0.36	-0.37	-0.37	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.37	-0.37
16	-0.21	-0.22	-0.24	-0.25	-0.26	-0.27	-0.28	-0.28	-0.29	-0.29	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.29
17	-0.13	-0.14	-0.16	-0.17	-0.18	-0.18	-0.19	-0.20	-0.20	-0.21	-0.21	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22
18	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.09	-0.10	-0.11	-0.11	-0.12	-0.13	-0.13	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14
19	0.03	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.07	-0.07
20	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
21	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08
22	0.26	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16	0.16
23	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.32	0.31	0.30	0.30	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23
24	0.42	0.42	0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.32	0.31
25	0.50	0.50	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.40	0.39	0.38
26	0.58	0.58	0.58	0.57	0.57	0.57	0.56	0.55	0.55	0.54	0.53	0.52	0.52	0.51	0.49	0.48	0.47	0.46
27	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.62	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55	0.53
28	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.73	0.73	0.72	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61
29	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72	0.70	0.68
30	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.88	0.88	0.87	0.85	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78	0.76
31	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.92	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83
32	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.06	1.06	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91
33	1.13	1.14	1.14	1.15	1.15	1.15	1.15	1.14	1.13	1.13	1.11	1.10	1.09	1.07	1.05	1.03	1.01	0.98
34	1.21	1.22	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.18	1.17	1.15	1.13	1.11	1.08	1.06
35	1.29	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.31	1.31	1.30	1.29	1.28	1.27	1.25	1.23	1.21	1.19	1.16	1.13
36	1.37	1.38	1.39	1.39	1.40	1.40	1.40	1.39	1.39	1.38	1.36	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.24	1.21
37	1.45	1.46	1.47	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.47	1.46	1.45	1.43	1.41	1.39	1.37	1.34	1.31	1.28
38	1.53	1.54	1.55	1.56	1.56	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.51	1.50	1.47	1.45	1.42	1.39	1.36
39	1.61	1.62	1.63	1.64	1.65	1.65	1.65	1.64	1.64	1.63	1.61	1.60	1.58	1.55	1.53	1.50	1.47	1.43
40	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73	1.73	1.73	1.73	1.72	1.71	1.70	1.68	1.66	1.64	1.61	1.58	1.54	1.51

Anexo 12. Diagramas KOP de cálculos del sistema de medición de Brix

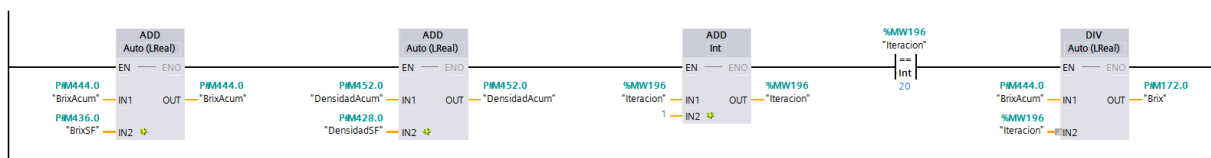
- Llamado del bloque de funciones para cálculos del sistema de medición de brix:



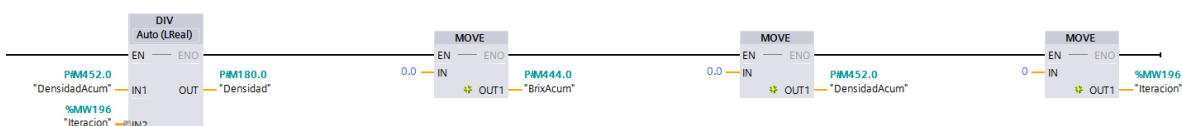
- Bloque de funciones CalculoBrixDensidad:



- Filtrado de señal de Brix:

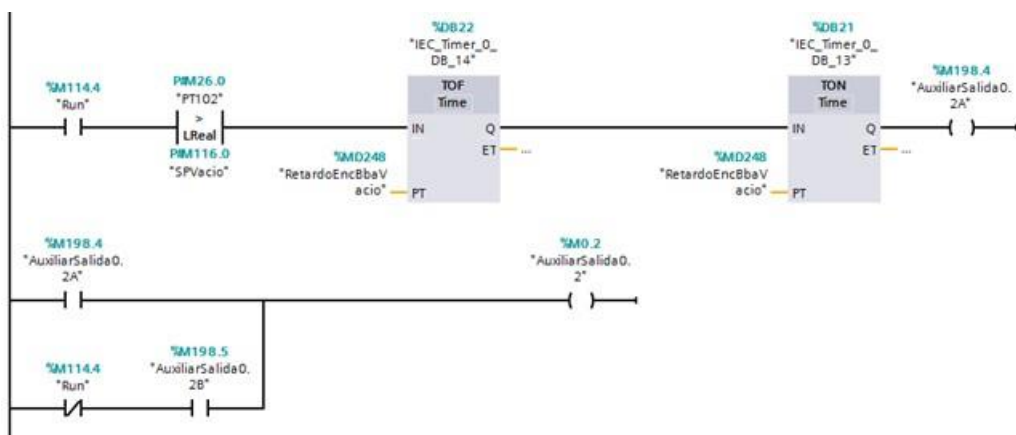


Continúa

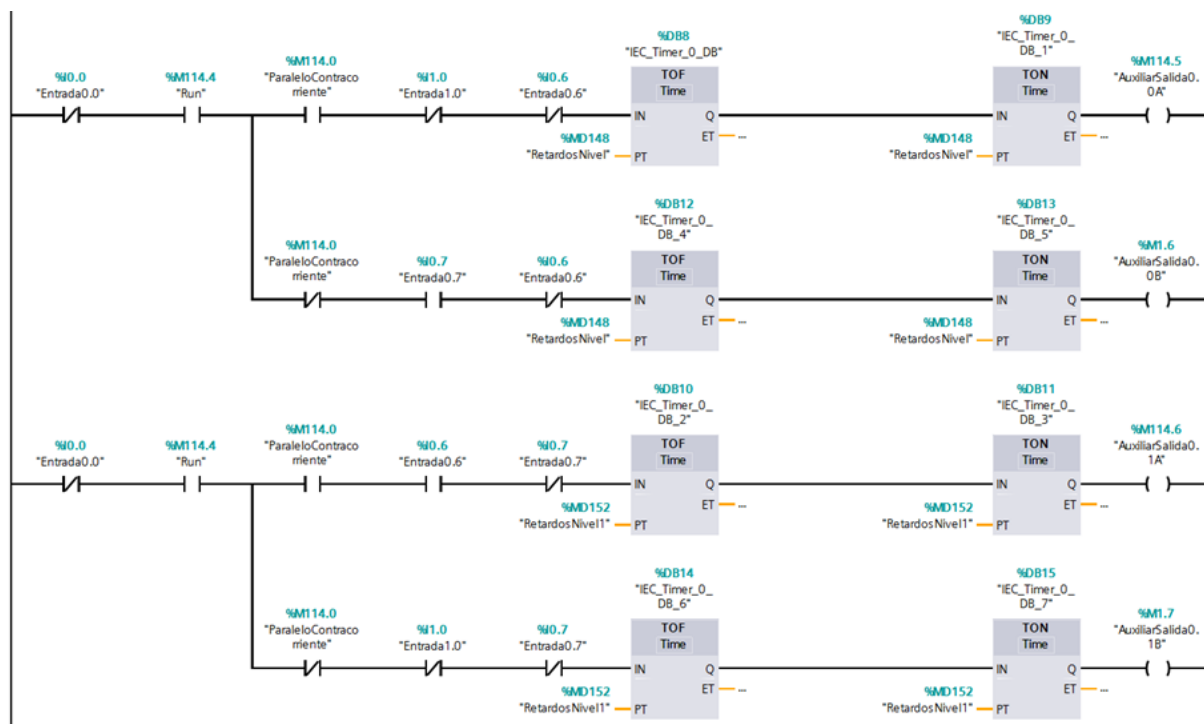


Anexo 13. Diagramas KOP de los lazos de control configurados

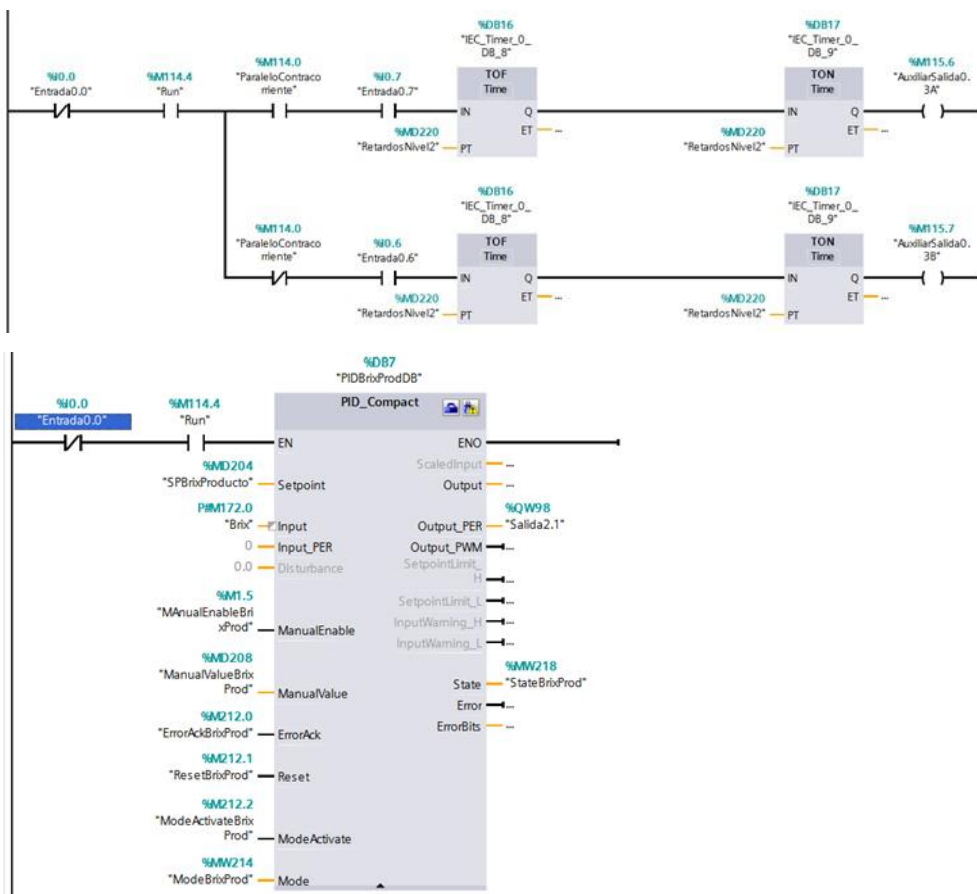
PC1 - Generación de vacío



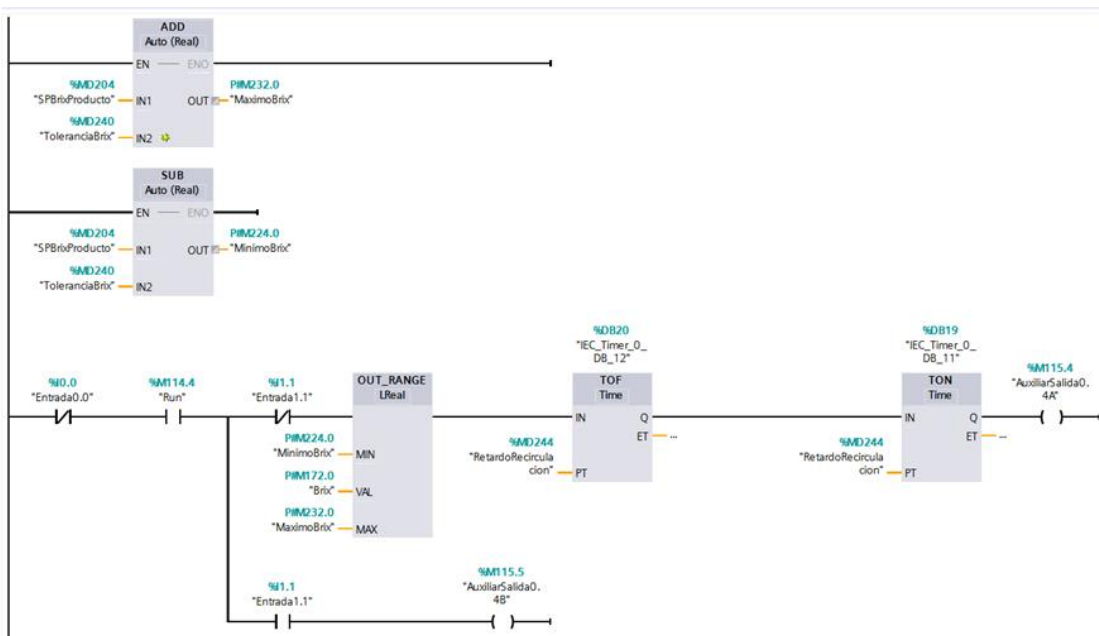
LC1, LC2 - Niveles evaporador 1 y 2



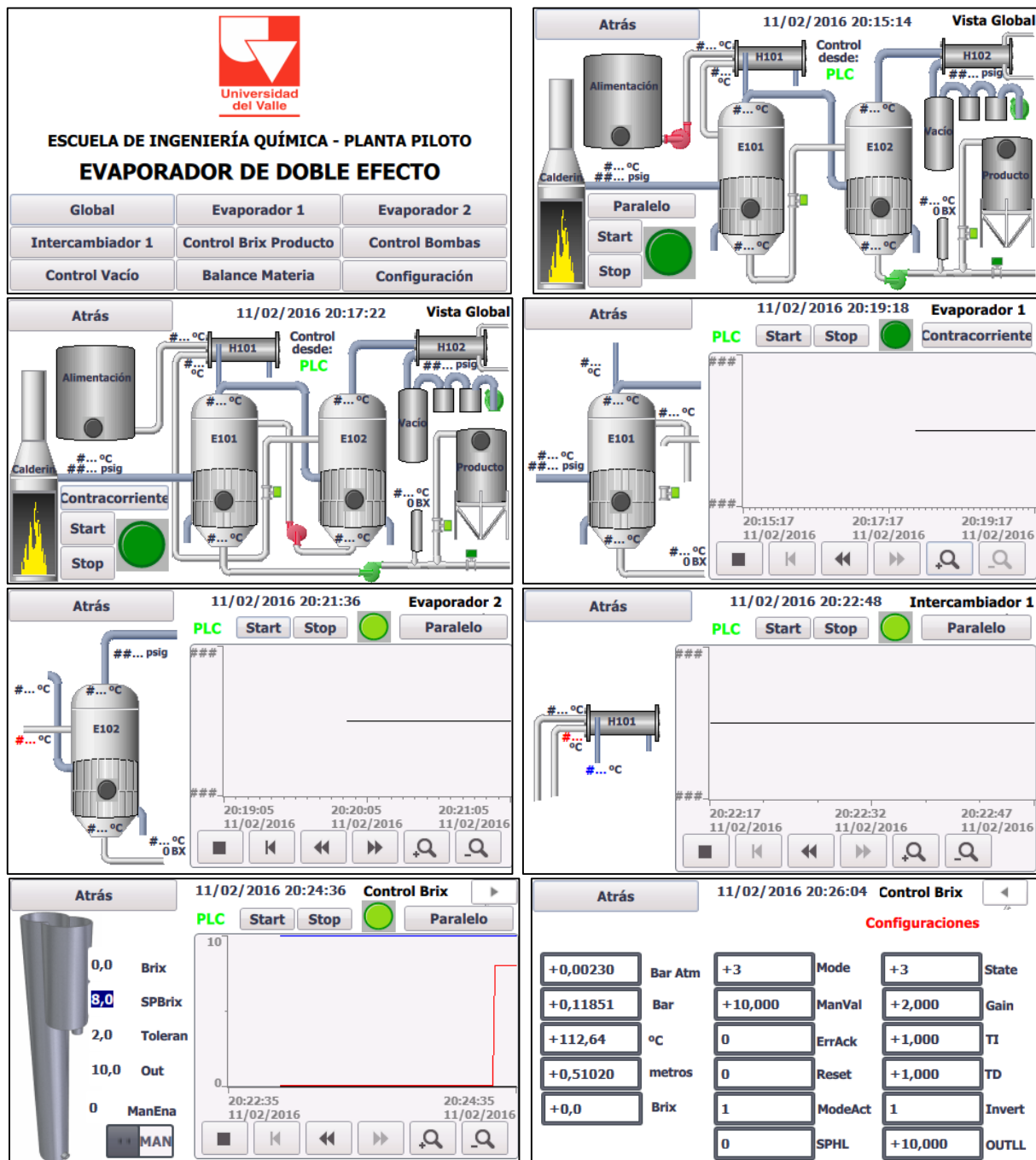
AC1 - Brix de salida

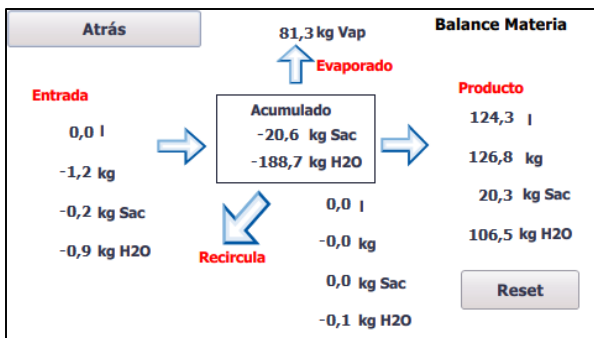


RC1 – Recirculación



Anexo 14. Imágenes de las ventanas desarrolladas en la interfaz HMI para operación automática del sistema de evaporación





CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Atrás

Diagnóstico de sist...

Información del pr...

Administración de u...

Información de sist...

Tareas varias

Prueba Señales

Datalogger

Hora Sistema

P&IDs

Atrás

Vista general de diagnóstico \ Vista del búfer de diagnóstico

...	Fecha	Hora	Evento
1	08/04/2012	7:07:03	Estado operativo siguiente tras tran...
2	08/04/2012	7:07:03	Estado operativo siguiente tras tran...
3	08/04/2012	7:07:03	Nueva información de arranque - E...
4	08/04/2012	7:07:03	Estado operativo siguiente tras tran...
5	08/04/2012	7:07:00	Conexión (POWER ON) - La CPU cz...
6	02/04/2012	4:50:21	Desconexión (POWER OFF) - La CF...
7	01/04/2012	22:42:57	Estado operativo siguiente tras tran...

Inicio **←** **→** **Refresh**

Atrás

Nombre del proyecto: TGJANDRESH2016

Creado: 07/01/2016 9:54:31

Autor: jandresh

Descripción: (no configurado)

Atrás

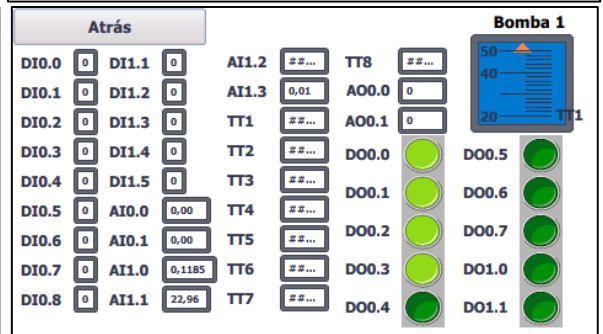
Usuario

Inicio de sesión

Usuario:

Contraseña:

Cancelar **Aceptar**



Atrás

Datalogger

Start Datalog

Stop Datalog

Salir de runtime

Verifique que la memoria USB se haya introducido antes de iniciar el sistema HMI. Si no se cumple esta condición, por favor inserte una USB, oprima el botón Salir de runtime para reiniciar el sistema HMI, oprima el boton start y regrese a esta pantalla.

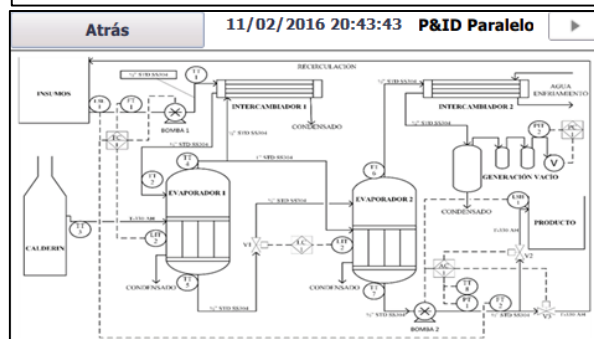
Atrás

Fecha y hora

Hora sistema (UTC) 12/02/2016 1:39:51

Hora Local UTC - 5 11/02/2016 20:39:51

Seleccionar Hora 11/02/2016 16:14:00



11/02/2016 16:14:00

q w e r t y u i o p

a s d f g h j k l

z x c v b n m

Del Esc 123 Help