

**Implementación de un evaporador de película descendente al vacío para la asignatura de
laboratorio de procesos de la escuela de ingeniería química**

Laura Geraldine Torres Villamizar

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Química

Director:

Carlos Jesús Muvdi Nova

Ing. Químico, M. Sc., Ph. D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

A **Dios**, por su gracia y su fidelidad.

A **Sonia y Edgar**, mis padres, por creer en mí, por luchar conmigo y hacerse partícipes de cada etapa de este proceso.

A **David**, por su apoyo incondicional y su comprensión.

Al profesor **Carlos Muvdi**, por sus enseñanzas, su ejemplo, su dedicación y su paciencia.

A la **Universidad Industrial de Santander**, por la formación integral que me ofreció a partir de la autonomía, tolerancia y participación que fomento en mí.

A cada uno de los profesores, administrativos y técnicos de la **Escuela de Ingeniería Química**, gracias por enseñarme a valorar la diversidad, las oportunidades y el tiempo vivido durante esta etapa.

A la empresa **INAL INDUSTRIAS ACUÑA LTDA**, por la colaboración para el desarrollo de este proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Plan de Trabajo Desarrollado.....	18
2.1 Fase I: Planteamiento del diseño conceptual basado en la evaluación del estado del piloto donado.....	19
2.2 Fase II: Diseño de piezas y partes del evaporador de película, y su sistema de control, para el estudio de las variables de operación del proceso.	19
2.3 Fase III: Implementación de los componentes necesarios al evaporador de película asegurando su correcto funcionamiento.....	21
2.4 Fase IV: Diseño de las prácticas de laboratorio y protocolos para la puesta en marcha, operación y apagado del equipo.....	22
3. Resultados	23
3.1 Presentación del diseño conceptual del piloto de evaporación de película.	23
3.2 Diseño de piezas y partes del evaporador de película.....	27
3.3. Diseño del sistema de control	32
3.4 Implementación piloto de evaporación de película descendente al vacío.	37

4. Conclusiones	44
5. Recomendaciones	45
Referencias Bibliográficas	46
Apéndices.....	49

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Diagrama metodológico.....	18
<i>Figura 2.</i> Diagrama conceptual de evaporador de película descendente al vacío.	24
<i>Figura 3.</i> Esquema del piloto de evaporación de película descendente. a) Vista general del piloto de evaporación de película descendente al vacío. b) Vista superior del piloto. c) Vista inferior de perfil derecho del piloto. d) Vista inferior de perfil izquierdo del piloto.	25
<i>Figura 4.</i> Diagrama general renderizado del piloto de evaporación.	27
<i>Figura 5.</i> Acoples a la tubería de evaporación. a. Acople de conexión entre la tubería de evaporación y el separador. b. Plato distribuidor del alimento.	29
<i>Figura 6.</i> Configuración del diseño del separador.....	30
<i>Figura 7.</i> Diseño de tanque de alimentación y tapa del tanque.	31
<i>Figura 8.</i> Sensores de temperatura a) Sensor de temperatura TMP36. b) Termo pozo adaptado a la tubería del piloto. c) Termocupla tipo K. d) Circuito de conexión de sensores al Arduino UNO.	32
<i>Figura 9.</i> Sensor de presión. a) Sensor de presión electrónico MPX5700dp fabricado por Freescale. b) Vacuómetro ubicado en el separador para tener una comparación del dato electrónico. c) Circuito para conectar el Sensor MPX5700dp al Arduino UNO.....	33
<i>Figura 10.</i> Elementos finales de control. a) Relés de estado sólido. b) Válvula solenoide electrónica.	34

Figura 11. Microcontrolador Arduino UNO. a) Microcontrolador Arduino UNO. b) Circuito de conexión del Microcontrolador..... 35

Figura 12. Interfaz Equipo – Usuario..... 36

Figura 13. a. Estructura del piloto de evaporación b. Caja de equipos eléctricos y electrónicos del piloto c. Interior caja de equipos eléctricos y electrónicos, conexiones de bombas. 38

Figura 14. Gráficas de comportamiento de la temperatura vs tiempo en la operación del piloto. a. Temperatura de alimentación vs tiempo. b. Temperatura de precalentamiento vs tiempo. c. Temperatura de concentrado vs tiempo. d. Temperatura de vapor vivo vs tiempo. e. Temperatura de vapor en el evaporador vs tiempo f. Temperatura de vapor agotado vs tiempo. 42

Figura 15. Presión del sistema vs tiempo..... 43

Figura 16. Gráfica concentración vs tiempo. 43

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Equipos, piezas y partes que necesitan financiación para la implementación del piloto.</i>	25
Tabla 2. <i>Características de las bombas del piloto de evaporación.</i>	28
Tabla 3. <i>Presupuesto general para la implementación del piloto.</i>	37
Tabla 4. <i>Eventualidades durante la implementación.</i>	39
Tabla 5. <i>Rangos de operación para las variables y parámetros operados en el piloto.</i>	40

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Presupuesto detallado del piloto de evaporación.....	49
Apéndice B. Presentación del piloto de evaporación.....	51
Apéndice C. Protocolos de funcionamiento del piloto.	53
Apéndice D. Hoja de toma de datos.....	57
Apéndice E. Esquemático de práctica para desarrollar en el piloto.....	59

Resumen

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN EVAPORADOR DE PELÍCULA DESCENDENTE AL VACÍO PARA LA ASIGNATURA DE LABORATORIO DE PROCESOS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA *

AUTORES: LAURA GERALDINE TORRES VILLAMIZAR**

PALABRAS CLAVE: EVAPORACIÓN, PILOTO, LABORATORIO DE PROCESO, DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN, CONTROL, PRÁCTICAS.

DESCRIPCION:

Este trabajo consiste en la implementación de un evaporador de película descendente al vacío para el desarrollo de prácticas en las asignaturas de Laboratorio de procesos y proyectos de investigación de la Escuela de Ingeniería Química y la Universidad industrial de Santander.

Se implemento un piloto de evaporación configurado para trabajar en modo Batch y vacío, construido totalmente en acero inoxidable que trabaja con capacidad máxima de 60L, caudal de 9 L/min, temperaturas de precalentamiento hasta 95°C, temperaturas de evaporación de hasta 300°C, presiones de vacío hasta -660 mmHg y cuenta con alimentación de vapor vivo de caldera de 30psi. Adicionalmente, tiene un sistema de control y una interfaz equipo - usuario que permite controlar y manipular de manera práctica las variables de temperatura de precalentamiento y la presión del sistema.

El piloto busca desarrollar prácticas de laboratorio de 30 minutos de duración y ahorro de agua en el desarrollo de las mismas con soluciones como lo son agua- azúcar, agua- panela y leche. El desarrollo de las prácticas busca cumplir un objetivo, que puede ser el análisis de la influencia del sistema de precalentamiento o el análisis de la influencia en la presión del sistema.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Ingeniero Químico

Abstract

TITLE: IMPLEMENTATION OF A FILM EVAPORATOR DESCENDANT TO THE VACUUM FOR THE COURSE OF PROCESS LABORATORY OF THE SCHOOL OF CHEMICAL ENGINEERING*

AUTHORS: LAURA GERALDINE TORRES VILLAMIZAR**

KEYWORDS: EVAPORATION, PILOT, LABORATORY OF PROCESS, DESIGN, IMPLEMENTATION, CONTROL, PRACTICES.

DESCRIPTION:

This work consists of the implementation of a vacuum descending film evaporator for the development of practices in the Laboratory of processes and research projects of the School of Chemical Engineering and the Industrial University of Santander.

An evaporation pilot was installed, configured to work in Batch and vacuum mode, totally built in stainless steel that works with maximum capacity of 60L, flow of 9 L / min, preheating temperatures up to 95°C, evaporation temperatures of up to 300°C, pressures of vacuum up to -660 mmHg and has 30psi boiler live steam feed. Additionally, it has a control system and a user-equipment interface that allows practically controlling and manipulating the variables of preheating temperature and system pressure.

The pilot seeks to develop laboratory practices of 30 minutes duration and water savings in the development of the same with solutions such as water- sugar, water- panela and milk. The development of the practices seeks to fulfill an objective, which can be the analysis of the influence of the preheating system or the analysis of the influence on the pressure of the system.

* Degree work

** Faculty of Physical – Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Chemical Engineer

Introducción

La industria alimentaria, es la encargada de transformar los productos procedentes de la agricultura y la ganadería. Entre su concepto de transformación se incluyen las fases de transporte, recepción, almacenamiento, procesamiento, conservación y servicio de alimentos (Barbosa *et al.*, 2002). El proceso de evaporación se involucra en esta industria ya que permite reducir la actividad de agua mediante el aumento del contenido en sólidos solubles como ayuda a la conservación de alimentos (Chen *et al.*, 1997).

El proceso de evaporación es ampliamente usado en la industria láctea (leche condensada), en la industria de zumos de fruta y en la fabricación de jaleas, mermeladas, entre otras conservas azucaradas (Barbosa *et al.*, 2002). Siendo entonces la evaporación una operación unitaria en la que ocurre la concentración de una solución mediante ebullición de un solvente (McCabe *et al.*, 2005). Se tiene diferentes configuraciones o equipos que pueden realizar esta operación unitaria, entre ellos, el evaporador de película descendente.

La evaporación de película descendente es utilizada para aumentar la concentración de los sólidos en productos, generalmente, con baja estabilidad térmica aplicada ampliamente en la industria de alimentos (Ovalo *et al.*, 2006) para aumentar la estabilidad y conservación de los productos, y para reducir costos de almacenamiento, embalaje y transporte de productos finales (Brennan, 1980).

En los evaporadores de película descendente la alimentación es introducida por la parte superior del equipo, la cual debe ser precalentada a la temperatura de ebullición del primer efecto, mediante

intercambiadores de calor según el diseño del equipo (Mendieta *et al.*, 2013). Se produce una distribución homogénea del producto dentro de los tubos en la parte superior del evaporador, generando una película descendente de iguales características en la totalidad de los tubos (Muñoz *et al.*, 2014). Tanto el vapor como el producto alimentado se desplazan en la misma dirección por lo que la salida de ambos se da por la parte inferior de los tubos.

Entre las ventajas de implementación de la evaporación de película se encuentran características como: la alta eficiencia, economía y rendimiento al operar con bajas diferencias de temperatura entre la película que cae y el medio de calentamiento, la alta flexibilidad operativa de manejar líquidos viscosos, la adaptación a condiciones de servicio variables de acuerdo a la solución a concentrar, la transferencia de calor óptima que se obtiene y mejores coeficientes de transferencia de calor (Prada *et al.*, 2015). Además, estos evaporadores, implementados con sistemas de control, mejoran en un 36% la eficiencia global del mismo, garantizando que se mantenga la calidad de productos obtenidos sin que puedan sufrir deterioro parcial o total de sus propiedades (Chávez *et al.*, 2015). Finalmente, los equipos utilizados son de limpieza sencilla y rápida.

Igualmente, la evaporación constituye el núcleo del proceso de transformación de muchos productos, pues de ella depende la eficiencia energética y la efectividad en las etapas posteriores, para generar un producto alimentario con los estándares de calidad que exige la misma industria (BMA, 2016).

Smith (1988) plantea que para el desarrollo de la evaporación de película se deben tener en cuenta parámetros y variables de operación como lo son:

- La concentración, ya que a medida que ocurre el proceso, la solución cambia sus propiedades físicas como la densidad y la viscosidad, entonces se puede llegar a operar con

un calentamiento que no es el adecuado para las nuevas propiedades del mismo líquido que estaba siendo alimentado.

- Las temperaturas de precalentamiento y evaporación, que puede afectar las características composicionales y organolépticas de los productos alimentarios. Es importante estudiar la naturaleza del compuesto, el tiempo de residencia y la temperatura de operación, que también puede afectar el material del equipo.
- Durante el proceso se pueden presentar incrustaciones sobre las superficies de calentamiento (tubería de evaporación y precalentamiento). En estos casos, la conducción de calor se ve afectada ya que el coeficiente global de transferencia de calor disminuye progresivamente hasta que la operación se ve interrumpida. Dejar avanzar este problema, significa una limpieza difícil y costosa.

Teniendo en cuenta la importancia de este tipo de operaciones, un prototipo de evaporador de película descendente de 4 m de altura, que cuenta con sección de precalentamiento con resistencias y evaporación, fue cedido a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander por los Ingenieros Mecánicos Iván Caballero, Gustavo Palacio y Karen Acosta (Caballero *et al.*, 2016). Este piloto buscaba remplazar el proceso de evaporación que ocurre en un trapiche tradicional para la concentración de jugo de caña. Aunque el diseño cumplió con ser más eficiente que el proceso efectuado en un trapiche convencional, el principal problema que presentó el equipo fue: el funcionamiento a presión atmosférica que ocasionaba degradación térmica del alimento, ya que durante el precalentamiento se aumentaba la temperatura al punto en que el jugo de caña se secaba durante su paso por los tubos de evaporación.

En base a lo anterior, este trabajo busca implementar un piloto académico recuperando el trabajo realizado por los estudiantes de Ingeniería Mecánica, basado en una potencialización y el estudio

de variables como lo son la temperatura y la presión del proceso. El piloto de laboratorio desarrollará prácticas de concentración de soluciones de leche, panela y azúcar, mediante evaporación de película descendente aplicando vacío, y ofrecerá a la comunidad universitaria un equipo para la formación práctica de esta operación unitaria, muy usada a nivel industrial, pero poco conocida en Colombia. Además, permitirá su uso en el marco de actividades de desarrollo e investigación de docentes y estudiantes de la Universidad Industrial de Santander.

Potencializar el piloto requirió de un estudio de la operación unitaria, el diseño de piezas, el uso de normas técnicas (ASME) para la selección de materiales y, la presentación de un presupuesto para la inversión en equipos necesarios, tales como: la bomba de vacío, bomba de alimentación, válvulas, tanque de almacenamiento, elementos de control y otros accesorios. Es importante señalar que este proyecto contó con el financiamiento de la Escuela de Ingeniería Química UIS, bajo la presentación de la propuesta de diseño conceptual e inversión requerida.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Implementar un evaporador de película descendente al vacío a escala piloto de laboratorio para el desarrollo de prácticas en la asignatura Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química.

1.2 Objetivos Específicos

- Plantear el diseño conceptual del piloto basado en la evaluación del estado del equipo donado.
- Diseñar las piezas y partes del evaporador de película, y su sistema de control, para el estudio de las variables de operación del proceso.
- Implementar los componentes necesarios al evaporador de película asegurando su correcto funcionamiento.
- Diseñar las prácticas de laboratorio y protocolos para la puesta en marcha, operación y apagado del equipo.

2. Plan de Trabajo Desarrollado

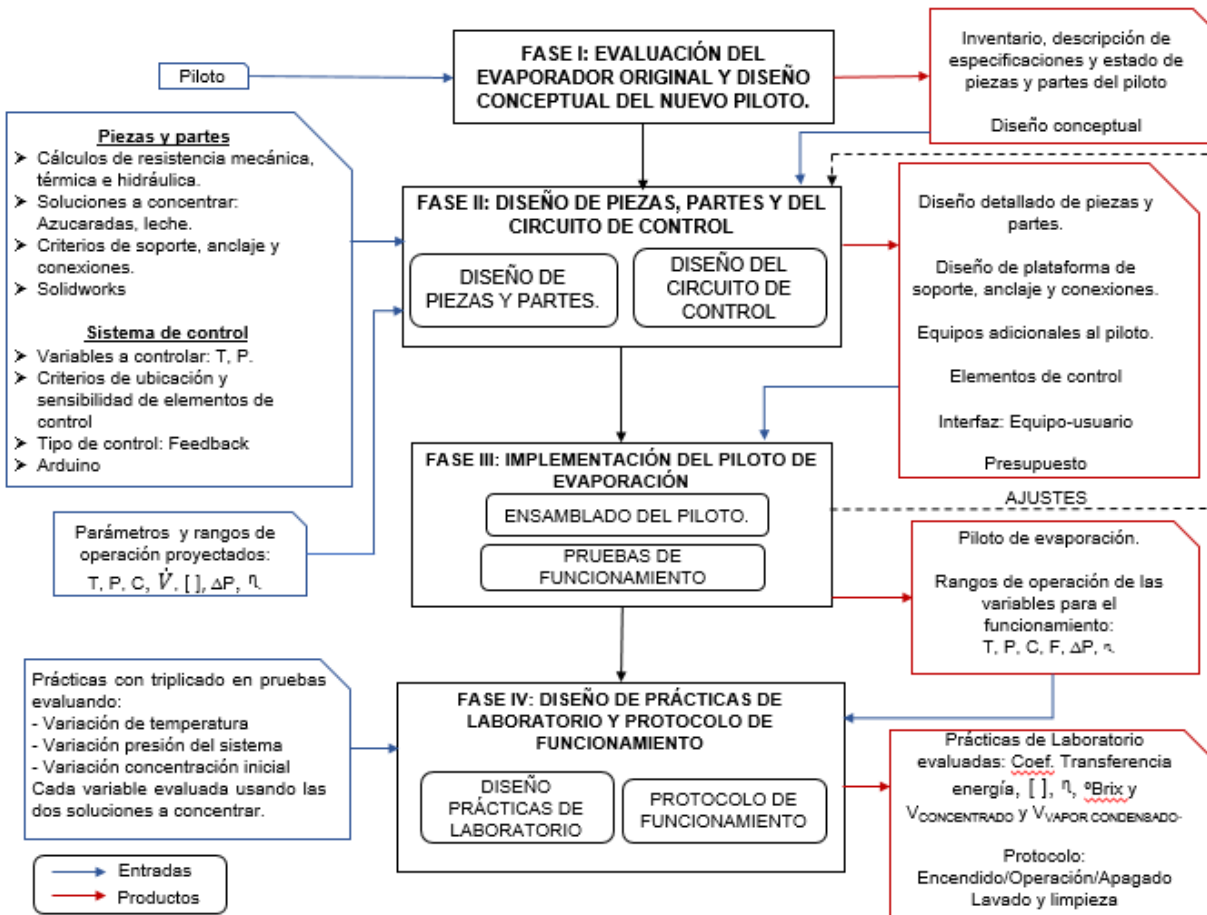


Figura 1. Diagrama metodológico.

2.1 Fase I: Planteamiento del diseño conceptual basado en la evaluación del estado del piloto donado.

En esta fase se realizó el estudio del estado de piezas y partes del piloto de evaporación donado a la Escuela de Ingeniería Química y, en base a la evaluación de las piezas, se planteó el diseño conceptual del nuevo piloto a implementar.

Para esta fase del proyecto se realizaron actividades de desmontaje del piloto, evaluación, descripción, codificación, registro fotográfico, limpieza y embalaje de las piezas y partes del evaporador. Las actividades anteriormente descritas se realizaron con el objetivo de obtener un inventario de aquello que se rescató del piloto primario, a tener en cuenta para el presupuesto y los requerimientos para el nuevo piloto.

2.2 Fase II: Diseño de piezas y partes del evaporador de película, y su sistema de control, para el estudio de las variables de operación del proceso.

En esta fase se realizó el diseño detallado del nuevo piloto de evaporación de película descendente. Esta fase se dividió en dos sub-fases: diseño de piezas y partes, y diseño de circuito de control. Dichas etapas se ejecutaron de manera simultánea debido a que se complementan entre sí.

En la etapa diseño de piezas y partes, inicialmente fue necesario determinar la disposición estructural y física que tendría el nuevo piloto. Para ello, se requirieron diseños del nuevo piloto, donde se tuvieron en cuenta criterios como: accesibilidad, seguridad, ubicación y flexibilidad de las fuentes de energía eléctrica y de vapor en el laboratorio; determinando así la ubicación del piloto dentro del laboratorio de procesos. En ese sentido, se evaluó la alternativa de modificar la

estructura o concebir una nueva, con mejor sistema de soporte, anclaje, conexión, accesibilidad y seguridad, ajustando la idea al presupuesto (limitado a 20 millones).

Por otro lado, se definieron los parámetros y rangos requeridos de operación del piloto, esto es: temperaturas, presión, caudal, solución a concentrar, concentración a alcanzar y la selección de la bomba de vacío y alimentación. A partir de esta información, se seleccionó la bomba de vacío requerida en el sistema y algunas piezas y partes que componen el evaporador. Por otro lado, basados en heurísticas de la norma ASME calculadas por Caballero *et al.*, 2016, se seleccionaron materiales y espesores de partes como: tanque de almacenamiento, separador y tuberías de conexión, donde de acuerdo a las disposiciones de presupuesto y al diseño conceptual, se escogió la opción que mejor se ajustara a los requerimientos.

En la etapa del diseño de circuito de control se definieron las variables a controlar, las cuales son: presión y temperatura de precalentamiento. Para ello, se requirió el uso de sensores de presión y temperatura, los cuales fueron seleccionados a partir de los parámetros y rangos de operación ya definidos. Por otro lado, se evaluó la posición y cantidad de los elementos de control de acuerdo a las mediciones necesarias, con el fin de garantizar la película de fluido durante la evaporación (Bird, 2002).

Posteriormente, con el fin de definir el micro-controlador a utilizar, se implementó Arduino debido a su fácil obtención, disponibilidad y su código abierto. Además, se seleccionó un tipo de control *Feedback*, el cual es una alternativa sencilla de implementar y que responde con eficacia al control de variables como la T y P (Bakker *et al.*, 2004). Esta estrategia de Arduino, más el control tipo *Feedback*, se escogieron por su ajuste a presupuestos limitados y porque ya se ha usado antes obteniendo buenos resultados (Muñoz *et al.*, 2014; Bayona, 2017). Al final de esta etapa se obtuvo el sistema de control del piloto y su respectiva interfaz equipo-usuario.

Finalmente, con ayuda de SolidWorks se creó el montaje detallado en *Computer Assisted Desing* en sus siglas *CAD*, donde se observa el piloto completo y sus piezas. Además, se elaboraron los planos, especificando el tipo de material (previamente seleccionado) y las dimensiones para la manufactura de las piezas y partes que no se puedan seleccionar de ningún catálogo. Posteriormente, se realizaron cotizaciones para generar un presupuesto de construcción del piloto teniendo en cuenta un sobre costo no superior al 15% por reprocesos e imprevistos. Por último, se evaluó con detalle la propuesta de la nueva estructura mencionada anteriormente.

2.3 Fase III: Implementación de los componentes necesarios al evaporador de película asegurando su correcto funcionamiento.

Aprobado el presupuesto se procedió a la manufactura de las piezas. Los planos de las piezas y partes fueron entregados al fabricante más idóneo, en este caso fue INAL LTDA. El fabricante se escogió según los siguientes factores: características de la pieza (material de la pieza), el proceso de manufactura a seguir (tecnología, capacitación y experiencia en el proceso) y el precio ofertado. Por otro lado, se inició la compra, según especificaciones y procedimientos de compra de la UIS, de los distintos equipos y partes de obtención comercial, como lo fueron: bomba de vacío, bomba centrífuga de alimentación, termocuplas, presostatos y la estructura metálica del piloto.

Posteriormente, se procedió al ensamblaje y montaje de los equipos y sistema de control (nuevo piloto), respetando las distancias y acomodaciones (ubicaciones de las fuentes de energía y espacio disponible) que se tenían en el laboratorio, tal y como se estableció en la etapa de diseño conceptual.

Con el piloto construido se comenzaron las pruebas técnicas de funcionamiento. En estas primeras pruebas se utilizó agua como alimento, con el objetivo de verificar el estado (presencia de fugas), parámetros de operación, formación de película y funcionamiento de interfaces en el piloto y de ser necesario realizar ajustes. Las primeras pruebas realizadas con agua fueron muy importantes para la verificación de los rangos de operación del piloto establecidos en el diseño conceptual: temperatura, presión, caudal (con el fin de garantizar una película uniforme) en las que podrá operar el piloto, esto para cada sustancia y el volumen máximo de carga al piloto. Seguidamente, se ajustaron las pruebas pero ahora con las soluciones a utilizar, verificando nuevamente la formación de la película y realizando ajustes para garantizarla.

2.4 Fase IV: Diseño de las prácticas de laboratorio y protocolos para la puesta en marcha, operación y apagado del equipo.

Concluidas las pruebas de funcionamiento, se documentó el protocolo de encendido, apagado, funcionamiento, limpieza y mantenimiento del piloto. Como también el de funcionamiento de la interfaz-usuario-equipo. Por último, se plantearon prácticas de laboratorio que por cuestiones de confidencialidad se entregarán al evaluador asignado con los resultados de las pruebas realizadas. El esquemático para el desarrollo y análisis de las prácticas se encuentra en el anexo (5). Además se plantearon los criterios a evaluar, como lo son: coeficientes de transferencia, evolución de los °Brix, comportamiento de las variables de proceso (temperatura y presión) y del factor de concentración volumétrica en el tiempo, que permitirán evaluar a nivel de laboratorio esta operación unitaria.

3. Resultados

3.1 Presentación del diseño conceptual del piloto de evaporación de película.

El diseño conceptual de evaporación de película se muestra en la Figura 2, el cual está conformado por tres secciones principales: sistema de precalentamiento, evaporación y separación. Inicialmente se tiene un tanque de almacenamiento (1) conectado a la bomba de alimentación (2), la cual envía la solución al sistema de precalentamiento (por resistencia) (4) y de evaporación (5). Este sistema de precalentamiento se encuentra aislado para garantizar la seguridad de la operación. El fluido precalentado ingresa al sistema de evaporación compuesto por tres tubos de acero inoxidable internos. La película se garantiza utilizando un plato distribuidor al inicio de la sección de evaporación. Por la carcasa de la tubería es alimentado desde la parte superior (6), vapor de agua de una línea de la caldera disponible en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química. Este vapor sale por la parte inferior de la tubería de evaporación a través de una trampa de vapor (7) y es recolectado en un tanque que permite medir la cantidad de condensado de vapor para cerrar el balance de masa. De otro lado, el concentrado después de salir del evaporador pasa a través de un separador (9) que está conectado al tanque de alimentación. Una bomba de vacío (13) asegura la presión en todo el sistema garantizando temperaturas de ebullición menores, con el objetivo de disminuir el impacto del proceso en las propiedades organolépticas y fisicoquímicas de la solución tratada.

El piloto opera en modo Batch, teniendo en cuenta que será implementado para desarrollar prácticas de laboratorio en la asignatura Laboratorio de Procesos del Programa de pregrado de la Escuela de Ingeniería Química. Estas prácticas deben ser desarrolladas en un tiempo corto de 30 min de duración máximo y además garantizando un ahorro de agua en el tiempo. Este ahorro de agua ocurre en la operación de la bomba de vacío (de anillo de agua) la cual cuenta con un tanque de almacenamiento (14) en el que se recircula el agua y ocurre el enfriamiento de la misma para poder ser reutilizada. El piloto permitirá la operación a distintas condiciones de presión y temperatura.

La bomba de vacío (de anillo de líquido) para su funcionamiento cuenta con un tanque de almacenamiento de agua que permite la alimentación de agua a la bomba y además la retroalimentación de la misma para el enfriamiento y posterior uso nuevamente.

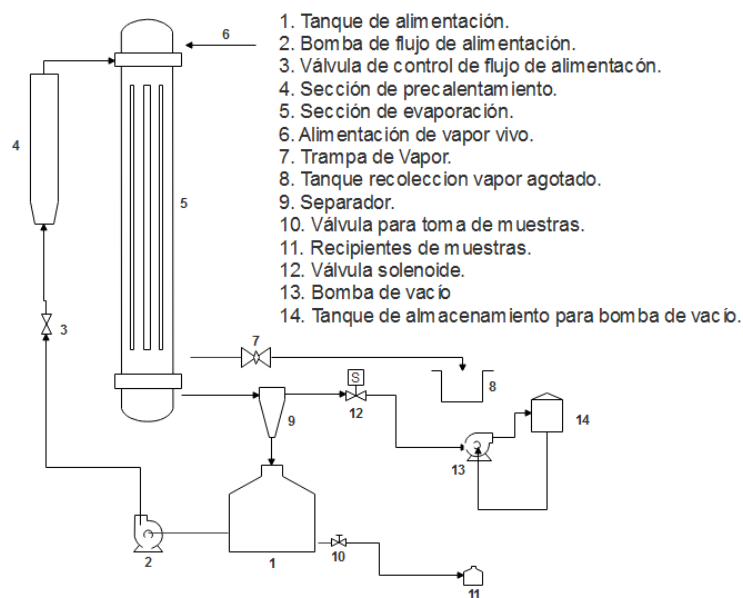


Figura 2. Diagrama conceptual de evaporador de película descendente al vacío.

En la Figura 3 se observa un renderizado del diseño conceptual para el piloto de evaporación, se encuentra en esta figura el sistema de precalentamiento, de evaporación, las dos bombas, el tanque de alimentación o almacenamiento y el separador.

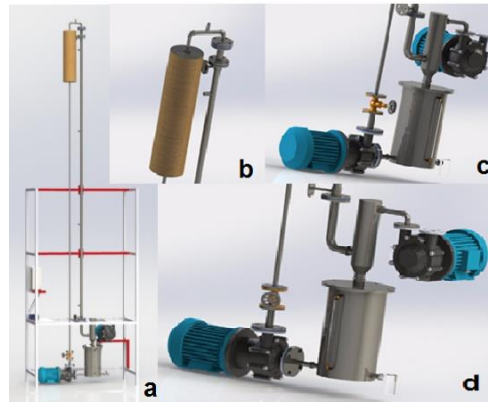


Figura 3. Esquema del piloto de evaporación de película descendente. a) Vista general del piloto de evaporación de película descendente al vacío. b) Vista superior del piloto. c) Vista inferior de perfil derecho del piloto. d) Vista inferior de perfil izquierdo del piloto.

A continuación, se presenta una tabla en la que se registra los equipos, piezas y partes que se diseñaron a detalle o fueron seleccionadas para compra según lo disponible en el mercado.

Tabla 1.

Equipos, piezas y partes que necesitan financiación para la implementación del piloto.

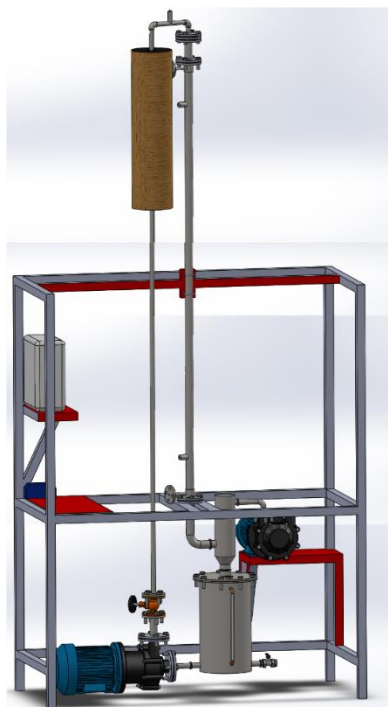
EQUIPOS, PIEZAS Y PARTES FALTANTES AL PILOTO				
Equipo, pieza o parte	Compra		Reparación	Modificación
	Dinero	Especie		
EQUIPO				
Tanque de alimentación	X			
Separador	X			
Tanque de almacenamiento agua	X			

EQUIPOS, PIEZAS Y PARTES FALTANTES AL PILOTO

Equipo, pieza o parte	Compra		Reparación	Modificación
	Dinero	Especie		
Bomba Centrífuga	X			
Bomba de vacío	X			
MONTAJES U ACCESORIOS				
Aislamiento tubo de precalentamiento	X			
Anclaje			X	X
Base para instalar computador		X		
Caldera línea de vapor	X			
Trampa de salida de vapor	X			
SOFTWARE Y HARDWARE				
Arduino UNO	X			
Modulo adaptador Arduino UNO	X			
Sensores de temperatura	X			
Sensores de presión	X			
Sensor de flujo	X			
Sensor de nivel	X			
Computador		X		
MATERIALES Y ACCESORIOS				
Abrazaderas	X			
Soldadura	X			
Tornillos	X			
Codo	X			
Válvulas	X			

3.2 Diseño de piezas y partes del evaporador de película.

En la Figura 4 se muestra el diagrama completo del piloto diseñado, el cual trabaja en vacío. El alimento ingresa por la parte superior del evaporador impulsado por una bomba centrífuga; una válvula de globo permite fijar el caudal de operación indicado a través de un flujómetro digital. El flujo desciende por la tubería de evaporación que cuenta con tres tubos internos de 4m de largo, de diámetro externo de 0,2” y espesor de 1/16”. A la salida de la sección de evaporación, la solución pasa a través del separador y el líquido concentrado es recuperado en el tanque de alimentación para ser retroalimentado. El vapor generado sigue a la bomba de anillo líquido (se utilizará agua), en donde se condensa. En la misma figura se presentan las características principales de las piezas más importantes del equipo; es a resaltar la utilización de acero inoxidable 304, posibilitando su uso en aplicaciones alimentarias.



	Tanque de alimentación	Separador	Válvula de globo
Material	Acero Inoxidable de 2,5 mm	Acero Inoxidable de 2,5 mm	Acero Inoxidable
Longitud(mm)	458,5	400	140
Diámetro(mm)	315	100	25,4
Conexión	Tipo clamp 2”	Tipo clamp 2”	Roca Hembra NPT 1,5 “
Capacidad (L)	60	25	--

Figura 4. Diagrama general renderizado del piloto de evaporación.

En la Tabla 2 se presentan las características de las bombas seleccionadas para la operación del piloto de evaporación. Es importante tener en cuenta que la bomba de alimentación cuenta con impulsor semi-abierto que permite el trabajo con fluidos de media y baja viscosidad. La bomba de anillo líquido fue seleccionada porque permite manejar mezcla de gases que contienen vapores condensables, en este caso es agua evaporada durante el proceso. Esta bomba de vacío, cuenta con un rodete o impulsor que gira gracias a la fuerza centrífuga formando un anillo líquido concéntrico en la periferia de la cubierta protectora (BIMEK, 2017), que es la que realiza la compresión. Cuando el gas entra, es encerrado entre las paletas del rodete y el anillo líquido. Cuando el rodete gira, el anillo líquido comprime el gas y lo impulsa hacia la salida del anillo, que no solo actúa como sello, sino que también absorbe el calor de compresión, fricción y condensación.

Tabla 2.

Características de las bombas del piloto de evaporación.

	Material impulsor	Voltaje (V)	Potencia (W)	Cabeza o vacío máximo	Marca
Bomba Centrifuga	Acero	220	550	Cabeza: 20m	NGA – PRO
Bomba de anillo líquido	Acero	220	1110	Vacío: - 3 Kpa (22 inHg)	BIMEK
	Inoxidable				

- Sección de precalentamiento de la alimentación

La sección de precalentamiento tiene 1,8m de altura, 1” de diámetro y un espesor de 0,35mm, que permite elevar la temperatura del alimento. Este sistema cuenta con aislamiento térmico a base de espuma de poliuretano ($U=0,023 \text{ W/m}^2\text{K}$); material escogido en base a una comparación entre materiales disponibles en el mercado como lo son espuma celulósica ($U=0,065 \text{ W/m}^2\text{K}$), espuma

de polietileno ($U=0,036 \text{ W/m}^*\text{K}$) y corcho ($U=0,039 \text{ W/m}^*\text{K}$). La espuma seleccionada se encuentra finalmente recubierta de una lámina de acero inoxidable que alarga la vida útil de la misma. La unión entre la tubería de precalentamiento y la tubería de evaporación se da a través de una unión tipo clamp alargada. Cabe resaltar que esta tubería fue reutilizada del piloto donado, ya que el material y longitud de la tubería era adecuado para el funcionamiento. La sección de precalentamiento cuenta con dos resistencias eléctricas longitudinales conectadas en paralelo con las siguientes características: 2000W, 220 V, 20 A y 2m de longitud. Las resistencias están sujetas a la tubería con cable metálico resistente al calor y abrazaderas.

- Tubería de evaporación

La tubería de evaporación está compuesta por un tubo de acero inoxidable de 4,3m de altura y diámetro exterior de 1,5” o 0,0381m, tres tubos internos de 4m de largos, de diámetro externo de 0,2” y espesor de 1/16”, y un plato distribuidor. La Figura 5a presenta un acople de acero inoxidable que permite la conexión entre la tubería de evaporación y el separador (tipo clamp). El plato distribuidor (Figura 5b) cuenta con acoples de sello hermético con empaques de neopreno.

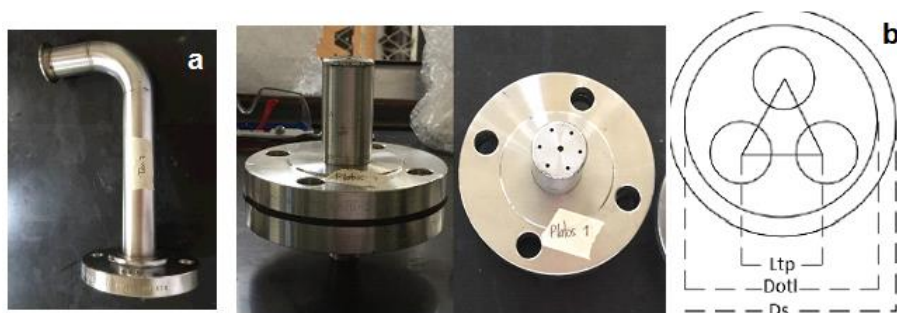


Figura 5. Acoples a la tubería de evaporación. a. Acople de conexión entre la tubería de evaporación y el separador. b. Plato distribuidor del alimento.

Por la tubería externa de acero inoxidable es alimentado vapor como fluido de calentamiento; este vapor es abastecido desde a caldera disponible en el Laboratorio de Procesos de la Escuela de Ingeniería Química. La línea de vapor seleccionada fue la de 30psi (temperatura de saturación de 121,28°C), que aporta el calor para la evaporación del alimento.

Los acoples clamp de 2" que se encuentran en el piloto son 4, ubicados a nivel del ingreso y salida del alimento, y la entrada y salida de vapor; esta última conectada adicionalmente a una trampa de vapor, que garantiza la condensación del vapor agotado (por seguridad del proceso).

- Separador líquido-vapor

El separador presentado en la Figura 6, encargado de separar el líquido concentrado del vapor generado, tiene una longitud de 400mm y un diámetro externo de 100 mm. Está conectado, de un lado, a la tubería de evaporación y al tanque de alimentación a través de una conexión tipo clamp de 2", y del otro, a la bomba de vacío a través de una conexión tipo clamp de 1,5". Adicionalmente, tiene conectado en la parte superior un vacuómetro que permite verificar la lectura suministrada por el sensor de presión electrónico a través de la interfaz.

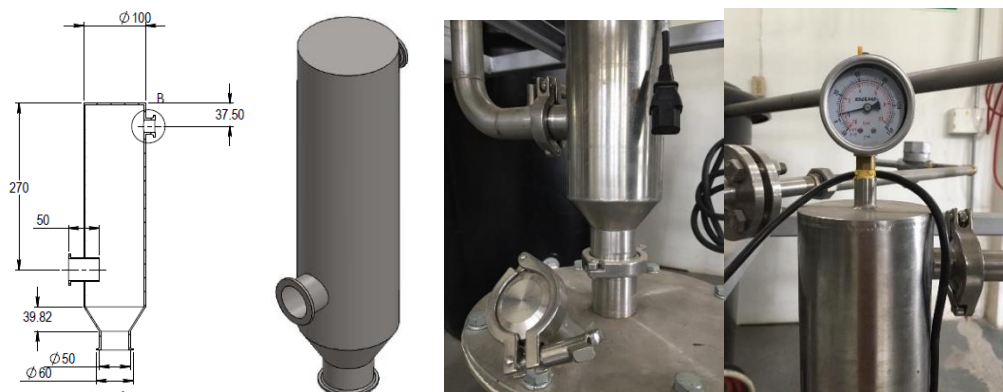


Figura 6. Configuración del diseño del separador.

- Tanque de alimentación

El tanque de alimentación que se observa en la Figura 7 está construido en acero inoxidable con una longitud de 458,5 mm, un diámetro externo de 315 mm y cuenta con tres acoples. El primero que asegura la unión entre el separador y este tanque, se da con una conexión tipo clamp de 2", cuenta también con una conexión tipo clamp de 1" a la tubería de alimentación que pasa primero por la bomba centrífuga de alimentación y adicional cuenta con una salida de muestra en la parte inferior de 0,75" que tiene instalada una válvula de bola. Además, cuenta con un visor que permite observar el nivel de la solución durante el proceso. Este tanque se encuentra sellado herméticamente con acoples de empaque de neopreno. La tapa del tanque cuenta con una entrada tipo boquilla embudo para facilitar la alimentación del producto. El sellado entre el tanque y la tapa se da a través de 9 tornillos tipo rosca.

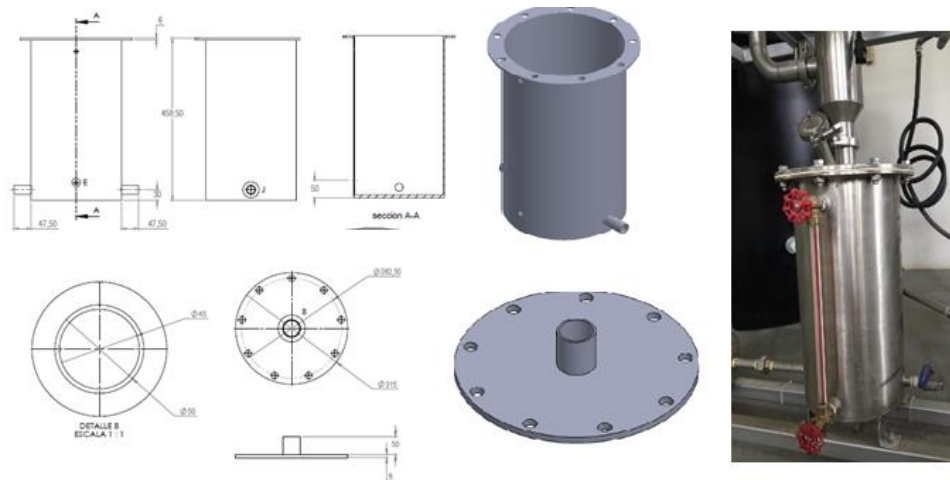


Figura 7. Diseño de tanque de alimentación y tapa del tanque.

3.3. Diseño del sistema de control

- Especificaciones del sistema de control

El diseño del sistema de control se basa en las variables a controlar: temperatura de precalentamiento y presión. El sistema de control, está compuesto por dos módulos Arduino UNO, sensores de indicación y registro, y los elementos finales de control.

Los sensores seleccionados para la medición de la temperatura en el piloto (a excepción del cuerpo del evaporador) fueron los TMP36 (Figura 8a). Estos son sensores de fácil obtención en el mercado y muy económicos, miden temperatura en un rango de $-50 - 125^{\circ}\text{C}$, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ de incertidumbre y su alimentación es de 5V. En la Figura 8b se observa el termopozo adaptado en el cuerpo del piloto para la ubicación de los sensores. Finalmente, en la Figura 8d se observa el circuito utilizado para la conexión del sensor con el Arduino UNO (según recomendación del proveedor). Para el cuerpo del evaporador se utilizaron unas termocuplas tipo K con rosca (Figura 8c). Debido a que la temperatura en la carcasa del evaporador puede superar los 150°C por el vapor vivo alimentado, estas termocuplas tienen un rango de 20 a 1000°C pero fueron calibradas hasta 250°C basados en la temperatura del vapor vivo de la línea de 30psi.

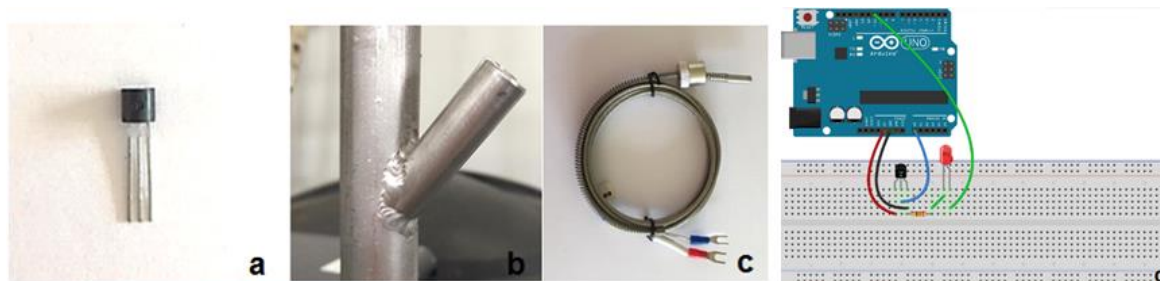


Figura 8. Sensores de temperatura a) Sensor de temperatura TMP36. b) Termo pozo adaptado a la tubería del piloto. c) Termocupla tipo K. d) Circuito de conexión de sensores al Arduino UNO.

El sensor de presión se presenta en la Figura 9a, es un piezorresistivo MPX5700dp transductor con un rango de 0 a 700 kPa de presión diferencial, ($P_{vacío} = P_{atm} - P_{abs}$). El sensor cuenta con un rango de temperatura de trabajo entre 0 y 115 °C, y cuenta con compensación por temperatura de manera que un cambio considerable en la variable de medición no generaría un daño en el mismo. En la Figura 9c se observa el circuito de conexión al Arduino UNO que garantiza la correcta lectura en la interfaz equipo-usuario.

Tanto los sensores de temperatura como de vacío tuvieron que ser calibrados con un instrumento de referencia. Para el caso de los sensores de temperatura Tipo K fue necesario realizarlo con una mufla, debido a las altas temperaturas. Para los sensores TMP36 se realizó con termómetros de mercurio y para el sensor de presión MPX5700dp se realizó la calibración con un vacuómetro que está instalado en el piloto de evaporación en la parte superior del separador como se observa en la Figura 9b.

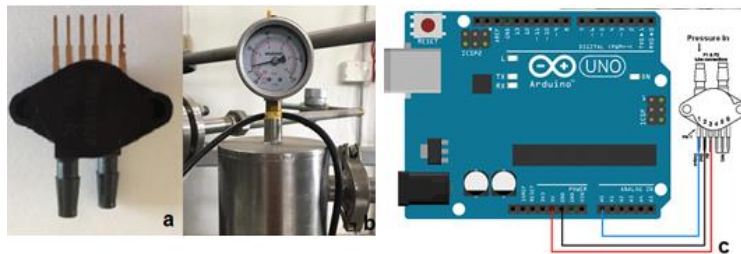


Figura 9. Sensor de presión. a) Sensor de presión electrónico MPX5700dp fabricado por Freescale. b) Vacuómetro ubicado en el separador para tener una comparación del dato electrónico. c) Circuito para conectar el Sensor MPX5700dp al Arduino UNO.

Los sensores de temperatura TMP36 y de presión MPX5700dp son sensores que trabajan con ecuación lineal. Para las termocuplas tipo K fue necesario utilizar un polinomio de grado 7, ya que la energía generada por la misma no se ajusta a una función lineal de temperatura.

Como elementos finales de control se cuentan con dos relés de estado sólido y una electroválvula solenoide. Los relés de estado sólido seleccionados cuentan con un voltaje de alimentación entre 3VDC – 32 VDC y un voltaje de funcionamiento entre 24VAC – 380 VAC y puede trabajar con corriente de 3V, 5V o 12V; es completamente compatible con Arduino UNO. Su tamaño es relativamente pequeño de 6cmx4,5cmx2,5cm con corriente alterna de salida, opera con facilidad altos voltajes y puede trabajar con temperaturas de hasta 120°C a 40V, aunque es recomendable trabajar con el 70% de su corriente debido a que calentamientos excesivos que pueden dañar la vida útil del relé.

Los relés de estado sólido están conectados e instalados en la caja de control del piloto como se observa en la Figura 10a y están dispuestos de manera que pueden estar conectados al Arduino UNO y a cada uno de sus elementos finales de control. Uno de los relés de estado sólido está conectado al circuito de resistencia descrito en la tubería de precalentamiento del piloto. El otro relé está conectado a la electroválvula solenoide mostrada en la Figura 10b. Esta válvula funciona con apertura o cierre total (funcionamiento on/off) y se basa en impulsos electromagnéticos de un solenoide que en este caso funciona con corriente alterna que entrega el relé de estado sólido.



Figura 10. Elementos finales de control. a) Relés de estado sólido. b) Válvula solenoide electrónica.

El módulo de control se dió desde Arduino UNO que se observa en la Figura 11a, Arduino UNO es una placa de microcontrolador de código abierto basada en el microcontrolador Microchip ATmega328P. La placa como controlador consta de un conjunto de pines de entrada y salida, 6 analógicas como 14 digitales, que permite ser expandida a través de otros circuitos. La programación de la placa se da a través de un entorno digital integrado al Arduino que se encuentra disponible para ser descargado gratuitamente en: <https://www.arduino.cc/en/main/software>, a través de la conexión por cable USB que trae la placa. La placa necesita un voltaje de entrada de 7 a 20 V y tiene un voltaje de funcionamiento de 5V. Trabaja con corriente directa y necesita de una protección de corriente para evitar daños; esta protección se da a través de un fusible.

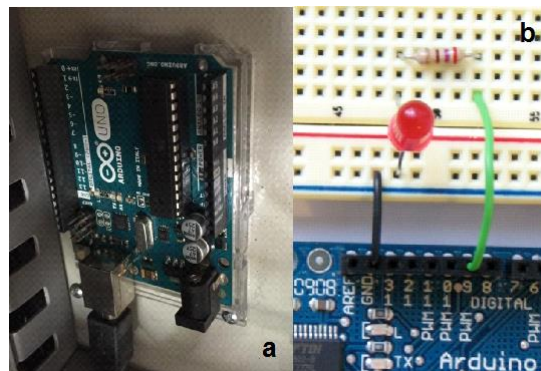


Figura 11. Microcontrolador Arduino UNO. a) Microcontrolador Arduino UNO. b) Circuito de conexión del Microcontrolador.

- Interfaz Equipo-Usuario

La interfaz del piloto es un entorno gráfico y visual que busca interactuar con los componentes del sistema de control de forma sencilla y práctica para el usuario. Puede ser utilizada en cualquier sistema operativo de Windows, Mac o Linux pues está ensamblada en Microsoft Excel. Como se observa en la Figura 12, la interfaz gestiona todo el control a partir de la computadora, conectando

el microcontrolador Arduino UNO a través del puerto USB. Es importante señalar que la interfaz fue programada y diseñada en Microsoft Excel, ya que éste cuenta con la herramienta propia de Office conocida como Macro, que permite tener comunicación directa con el Arduino UNO y la programación del mismo.

La interfaz gráfica muestra los valores en tiempo real de las seis temperaturas y la presión de vacío; además, cuenta con 4 funciones adicionales las cuales se detallan a continuación: *Búsqueda*: Manual de funcionamiento del equipo y de la interfaz gráfica. *Ajustes*: Ajuste Set Point de las variables medidas de acuerdo al alimento de la prueba en el piloto. *Gráfica*: Gráficas de los datos recolectados. *Registro*: Permite recuperar los datos obtenidos durante la prueba.

- Presupuesto presentado para financiación del piloto

Basados lo anterior, la Tabla 3 presenta el presupuesto general de las piezas, partes y equipos que necesitaron ser reemplazados para implementar el piloto (en el Anexo 1 se presenta el presupuesto detallado).



Figura 12. Interfaz Equipo – Usuario.

Tabla 3.

Presupuesto general para la implementación del piloto.

Equipo/accesorio	Precio sin IVA
EQUIPOS	
Tanque de alimentación, Separador, Tanque de almacenamiento agua, Bomba centrífuga y Bomba de anillo líquido.	\$ 10,994,000
MONTAJES Y ACCESORIOS	
Aislamiento Sección de precalentamiento	\$ 124,000
Línea de Vapor	\$ 2,450,000
Anclaje	
SOFTWARE Y HARDWARE	
Arduino y Sensores	\$ 656,000
MATERIALES Y ACCESORIOS	
Materiales	\$ 1,715,300
TOTAL	\$ 15,939,300

El presupuesto anterior, fue presentado a la dirección de Escuela de Ingeniería Química y fue aprobado, cabe anotar que el precio que se presenta esta generado sin IVA.

3.4 Implementación piloto de evaporación de película descendente al vacío.

El piloto fue construido por la empresa Industria Acuña INAL, basado en el diseño de las piezas y partes, y el proceso de compra de los elementos de control y de las bombas fue a través de la misma empresa. Durante el proceso de construcción se realizó un acompañamiento con el fin de realizar algunos ajustes sobre el diseño del piloto inicial y de esta manera facilitar la construcción y mejorar la operación del equipo.

Los cambios más relevantes se dieron a nivel de la estructura del piloto y del sistema de control. La estructura del piloto tuvo que ser ajustada, ya que el nuevo piloto debía sostener dos bombas, una de vacío y otra centrífuga, el tanque y el separador anclados a él. Igualmente, se hacía necesario añadir altura a la estructura del piloto de evaporación para poder realizar el anclaje al centro de la tubería de evaporación utilizando abrazaderas metálicas a lo largo de la misma. La nueva estructura que se observa en la Figura 13a tiene 3 m de altura, 1,20 m de ancho y de largo 0,8m. Es una estructura segura, que tiene mesa para la ubicación del computador necesario para operar la Interfaz Equipo – Usuario y que además tiene adaptada una caja, como se observa en la Figura 13b, en la que se encuentran organizados todos los elementos electrónicos y eléctricos del piloto.



Figura 13. a. Estructura del piloto de evaporación b. Caja de equipos eléctricos y electrónicos del piloto c. Interior caja de equipos eléctricos y electrónicos, conexiones de bombas.

En el sistema de control fue necesario implementar un transformador de corriente ya que los elementos de control como el Arduino y los relés de estado sólido necesitaban 14 V, al contrario de las bombas que necesitaban 240 V para su funcionamiento.

En la Tabla 4 se presentan las eventualidades que se presentaron durante las pruebas de implementación que se dieron con agua.

Tabla 4.

Eventualidades durante la implementación.

Hecho sucedido	Solución
Los sensores de temperatura TMP36 debían ser instalados en un termopozo, pero como algunos estaban a una altura considerable no era fácil garantizar que estuvieran bien ubicados.	Se redujo el diámetro del termopozo en material de acero inoxidable.
Elevaciones de corriente no previstas que ocasionaron el daño del sistema eléctrico del computador y de las pantallas de visualización.	Se implementó un transformador de corriente que garantizó la distribución correcta de corriente para cada una de las unidades instaladas en el piloto.
El sistema de control no permitía la comunicación entre las pantallas de visualización y la interfaz equipo- usuario.	Fue necesario ampliar los pines del microcontrolador Arduino para poder tener lectura de las temperaturas a través de las pantallas.
Los sensores de temperatura tipo K necesitaron alargamiento del cable de conexión que en primera medida fueron realizados con cinta aislante.	Los alargamientos fueron mejorados con termo encogibles y los cables fueron separados por una rosca de poliuretano.

Durante la implementación y las pruebas de ajuste, utilizando como fluido agua, se pudo mejorar la conexión entre los sensores y la interfaz equipo- usuario. Además, se realizaron los ajustes necesarios para adaptar los cambios de corriente que necesita el piloto para el funcionamiento, este ajuste se dio a través de un adaptador de corriente instalado y de pines que

actúan como moduladores y protectores de corriente para los elementos finales de control y para las pantallas de visualización. Las eventualidades que se presentaron durante a implementación del piloto ocasionaron un aumento de sobrecostos que fueron del 15%.

Adicionalmente, se realizó un ajuste del tanque de reservorio de agua para el funcionamiento de la bomba de anillo líquido. El tanque está ubicado en la parte posterior del piloto teniendo una capacidad de 1000L, que permiten el enfriamiento del agua que sale del proceso de succión de la bomba de vacío, para ser reutilizada para la operación de la bomba. Se hace necesario el mantenimiento de este volumen de agua añadiendo solución de hipoclorito de sodio al 5% de concentración cada 5 o 7 días. Se pudo además verificar que con el desarrollo de 3 prácticas seguidas (tiempo de uso del piloto 90min) no se tiene un aumento de la temperatura importante que afecte el funcionamiento de la bomba.

Finalmente, durante la implementación se verificó el buen funcionamiento de la línea de vapor seleccionada. La trampa de vapor funcionó de manera correcta condensando el vapor y permitiendo recuperarlo a la salida de la misma a través de una manguera de evacuación.

En la siguiente tabla se presentan las variables y parámetros operados y los rangos de operación verificados para las mismas.

Tabla 5.

Rangos de operación para las variables y parámetros operados en el piloto.

Variable	Mínimo	Máximo
Temperatura de precalentamiento (°C)	Tamb (25)	95
Temperatura de vapor alimentado (°C)	---	128,15
Presión de Vacío (mmHg)	-1	-660
Caudal (L/min)	2	12
Volumen alimentado (L)	1	45

La temperatura de precalentamiento se asegura a través de resistencias eléctricas instaladas, y se mide utilizando un sensor TMP36. La temperatura de vapor alimentado no puede ser modificada y la presión de vacío depende de las especificaciones propias de la bomba. El caudal se fija con una válvula ubicada a la salida de la bomba de alimentación y un flujómetro permite su lectura. Es importante aclarar que las pruebas de implementación se trabajaron siempre con 30 L de agua.

Después de verificar el correcto funcionamiento del piloto y realizar los ajustes necesarios que se comentan en este capítulo, se desarrollaron pruebas experimentales con una solución de agua – azúcar a 5°Brix de concentración inicial.

En la Figura 14 se presentan las gráficas del comportamiento de las temperaturas registradas en el tiempo de la prueba anteriormente nombrada. En las gráficas se puede observar el comportamiento estable después de los 5min de operación en la mayoría de las variables, lo que garantiza que el piloto opere dentro de los rangos establecidos. Una vez se estabiliza la temperatura en el evaporador, Figura 14b, el sistema de precalentamiento se apaga de forma automática durante el resto de la prueba. En relación a la temperatura de concentrado, Figura 14c, ésta se mantiene dentro del rango de 60 a 70 °C, lo que ayuda a prevenir incrustaciones o ensuciamiento de la tubería de evaporación. La gráfica que se visualiza en la Figura 14d presenta cambios un poco abruptos, y aunque su diferencia es de 2°C, puede ser ocasionado por caídas de presión leves en la línea de vapor de la caldera, ya que no es el único equipo conectado y en funcionamiento dentro del laboratorio. Esto puede ser controlado con la implementación de un sistema de regulación del vapor.

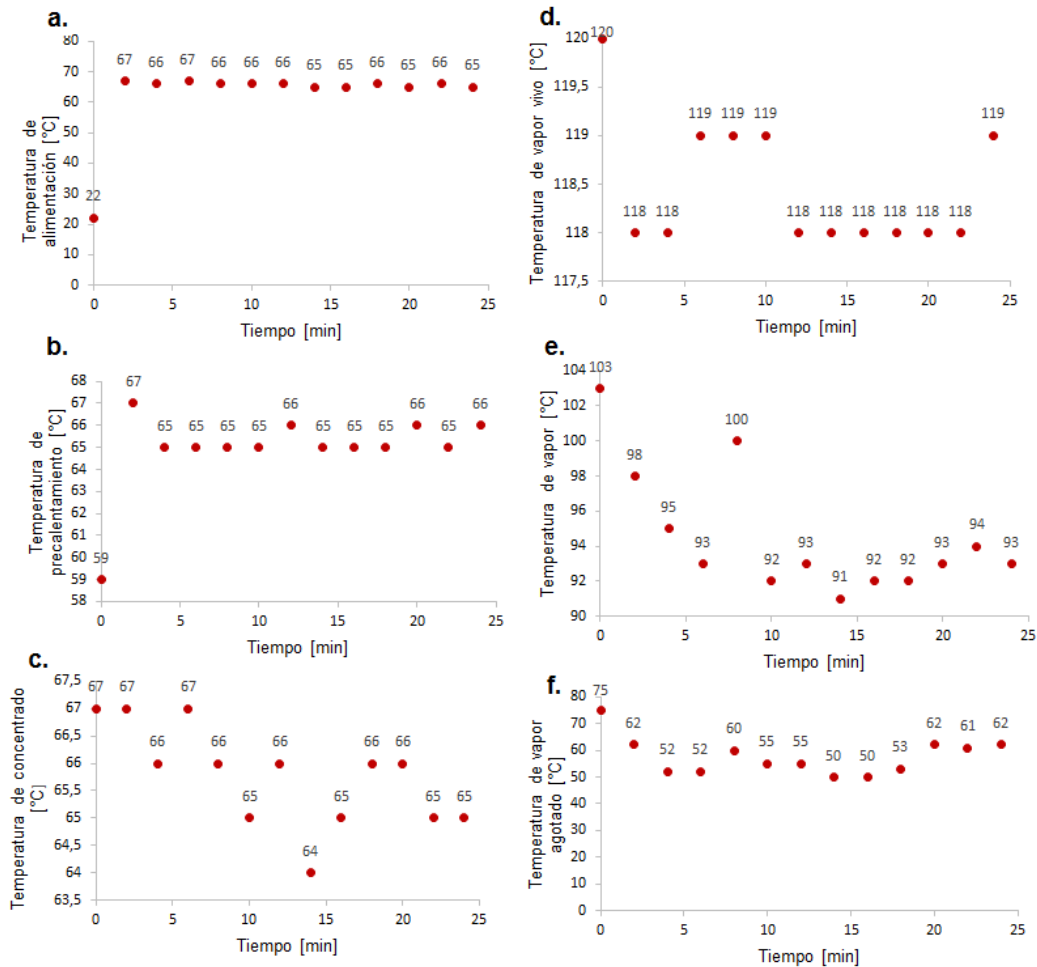


Figura 14. Gráficas de comportamiento de la temperatura vs tiempo en la operación del piloto. a. Temperatura de alimentación vs tiempo. b. Temperatura de precalentamiento vs tiempo. c. Temperatura de concentrado vs tiempo. d. Temperatura de vapor vivo vs tiempo. e. Temperatura de vapor en el evaporador vs tiempo. f. Temperatura de vapor agotado vs tiempo.

En la Figura 15 se presenta la gráfica de la presión del sistema vs tiempo. Es notable que la presión del sistema se mantiene constante, hay variaciones pero son de centésimas, ya que se cuenta con una bomba de vacío con suficiente capacidad y un lazo de control que como elemento final de control tiene una válvula solenoide que garantiza que la presión del sistema se mantenga regulada.

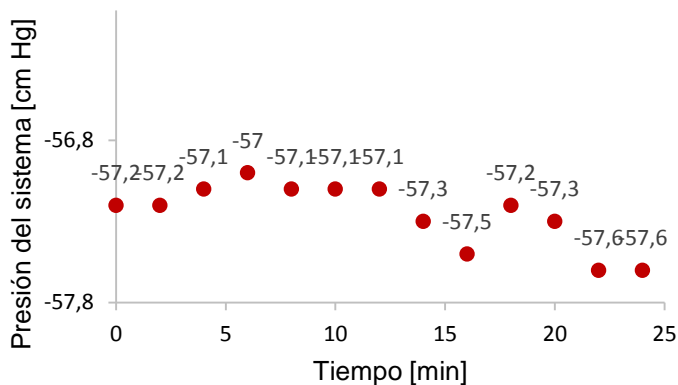


Figura 15. Presión del sistema vs tiempo.

En el estudio de la concentración del sistema, se puede observar en la Figura 16 que se presenta un aumento progresivo de la concentración durante los primeros 15 min, después de pasado este tiempo la concentración aumenta más rápidamente, debido a que el agua a evaporar es cada vez menor y durante la operación del piloto se garantizó el factor de concentración de 4 esperado. El comportamiento de la gráfica se puede aproximar a una función exponencial

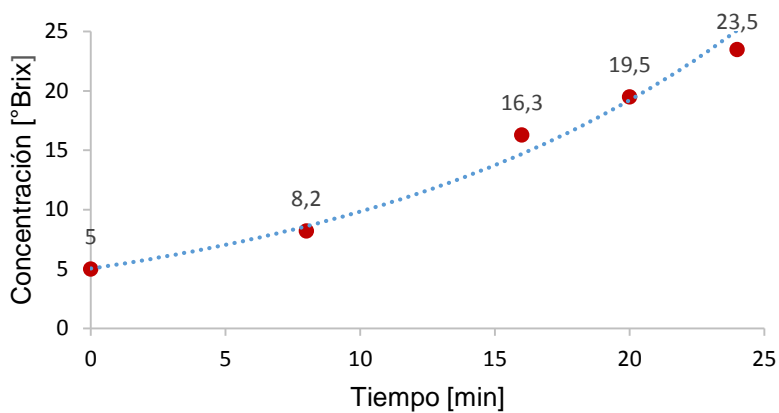


Figura 16. Gráfica concentración vs tiempo.

4. Conclusiones

Se planteó el diseño conceptual del piloto de evaporación configurado para trabajar en modo Batch para el desarrollo de prácticas en las asignaturas de Laboratorio de Procesos. El piloto operará en vacío garantizando temperaturas de ebullición menores para las soluciones alimentadas. Adicionalmente, el piloto permite tener un ahorro de agua en el tiempo al contar con un tanque de almacenamiento para el funcionamiento de la bomba de vacío. El evaporador busca acercar esta operación unitaria a través del estudio de variables de proceso como temperatura y presión.

Se diseñaron las piezas y partes del piloto, como también la selección de equipos como lo fueron la bomba centrífuga de alimentación y la bomba de vacío de anillo líquido. Este piloto fue diseñado para trabajar con capacidad máxima de 60L, caudal de 9 L/min y con temperaturas máximas de 300 °C y cuenta con alimentación de vapor vivo de caldera de 30psi (temperatura vapor máxima de 132°C). Adicionalmente, el sistema de microcontrolador e interfaz equipo- usuario permite controlar y manipular de manera práctica las variables de temperatura de precalentamiento y la presión del sistema. El piloto tuvo un costo de \$ 15`930.330 sin IVA, valor que fue totalmente financiado por la Escuela de Ingeniería Química UIS.

Se implementó el piloto de evaporación en vacío, el cual necesitó asegurabilidad en la parte eléctrica y electrónica. Es un piloto que trabaja con caudales de entre 1 a 12 L/min, temperaturas de precalentamiento hasta 95°C y presiones de vacío hasta -575 mmHg. Su nueva estructura brinda estabilidad al piloto y garantiza que la tubería de evaporación esté alineada verticalmente para

asegurar uniformidad en la película. Los cambios y adecuaciones que tuvo el piloto utilizaron 15% de sobre costo, sobre el presupuesto inicial.

Se diseñó el esquemático para el desarrollo de las prácticas, pudiéndose plantear hasta el momento 6 tipos de prácticas diferentes con un tiempo de operación de 30 min para cada una. Las soluciones propuestas a trabajar son agua- azúcar, agua- panela y leche. El desarrollo de las prácticas busca cumplir un objetivo, que puede ser el análisis de la influencia del sistema de precalentamiento o el análisis de la influencia en la presión del sistema. Las características anteriormente descritas lo convierten en un piloto útil y que puede ser implementado en la formación académica e investigativa.

5. Recomendaciones

Al piloto puede ser adaptado el sistema de regulación de presión, lo que permitirá trabajar a presiones de vapor menores. Esta mejora permitirá considerar esta variable dentro de las posibles prácticas a realizar en el Laboratorio; aumentando el número de prácticas posibles.

Referencias Bibliográficas

- Avalo, B., Varela, A. (2008). Modeling and simulation of a triple effect evaporator for the concentration of natural juices. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Vol. 31, N° 2, 151 - 158.
- ASME. (2011). American Society of Mechanical Engineers. Recuperado el 20 de agosto de 2010, disponible: <http://www.asme.org>
- Barbosa- Cánovas, G.V., Ma, L. Barletta. B. (2002). Manual de Laboratorio de Ingeniería de Alimentos. Capítulo 11. Editorial ACRIBIA S.A
- BMA. (2016). Evaporadores de película descendente. Recuperado el 13 de agosto de 2017, disponible en: <http://docplayer.es/51228448-Evaporadores-de-pelicula-descendente.html>
- Caballero, I., Palacio, G., Acosta, K. (2016). Diseño y construcción de un sistema de concentración de jugo de panela. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, Colombia.
- Chen H., R. S. Jebson. R. S. (1997). Factors affecting heat transfer in falling film evaporators. *Trans IChemE*, Vol 75, Part C.
- FAO (2016). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, 2016. ISBN 978-92-5-309374-8
- Giraldo, G.D., Santos, A., Cotrino, C. (2006). Estrategia de control predictivo sobre un modelo matemático de un evaporador. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. *Ingeniería e Investigación*, vol. 26, núm. 1, pp. 37-44.
- Glober William. (2004). Selecting evaporators for process applications. Disponible en: www.secmagazine.com

- Gourdon, M., Mura, E. (2016). Performance evaluation of falling film evaporators in the dairy industry. Division of Industrial Energy Systems and Technologies, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden.
- Glover, W. B., Hyde, W.L. (1997). Evaporación de Productos Difíciles de Procesar. Magazine Chemical Processing. LCI corporation.
- Haasbroek, A., Auret, L., Steyn, W.H. (2013). A comparison of control techniques for dairy falling film evaporators. 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems. The International Federation of Automatic Control.
- Malagié, G., Jensen, J.C., Grahamy, L. Smith. (s.f). Procesos en la industria alimentaria. Enciclopedia De Salud Y Seguridad En El Trabajo. Capítulo 1.
- McCabe, W.L. J.C. Smith. (2005). Operaciones unitarias en Ingeniería Química. McGraw-Hill, Neryork, pp. 533-538.
- Mendieta, O.A., Escalante, H. (2013). Análisis experimental de la evaporación del jugo de caña de azúcar en película sobre una placa plana. Corpoica Ciencia. Tecnológica. Agropecuaria. (2013) 14(2), pp.113-127.
- Muñoz, C., Solano, R. (2014). Construcción e implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bucaramanga, Colombia.
- Ovalle, C.O., Galván, E. Ramos, E. Castillo, F. (2013). Metodología para el diseño óptimo de evaporadores de película descendente. Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 4, núm. 3, julio-septiembre, pp. 49-61. ISSN: 0718-8706.
- Prada. F.L., García, B. H., Chávez, A. (2014). Efectos de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante y del uso de floculante y coadyuvante en la calidad de la miel y la panela. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, vol. 15, núm. 2, julio-diciembre, 2014, pp. 153-172 ISSN: 0122-8706.
- Prada L., García B. H., Chaves G. A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. Corporación Colombiana de Investigación

Agropecuaria (Corpoica). Ciencia y Tecnología Agropecuaria, vol. 16, núm. 1, enero-junio, pp. 7-23. ISSN: 0122-8706.

Roger G. H., Paul W. T., Scott R. R., Demetri P. P. (2015). Bioseparations science and engineering. Topics in chemical engineering. Second edition. New York, NY : Oxford University Press.

Vaquero Francisco (2016). Lógica difusa y sistemas de control. Capítulo I.

Apéndices

Apéndice A. Presupuesto detallado del piloto de evaporación.

Presupuesto piloto de evaporación de película descendente al vacío - UIS					
Equipo /accesorio	Material	Información adicional	Precio /unidad	Cantidad	Precio
EQUIPOS NECESARIOS					
Tanque de alimentación	Acero Inoxidable		\$780.000	1	\$ 780.000
Separador	Acero Inoxidable		\$1.470.000	1	\$1.470.000
Tanque de almacenamiento agua	PVC		\$295.000	1	\$295.000
Bomba Centrifuga	Impulsor en acero inoxidable	1/2 Hp	\$1.349.000	1	\$1.349.000
Bomba de vacío	-	1/2 Hp de Anillo liquido	\$7.100.000	1	\$7.100.000
MONTAJES U ACCESORIOS					
Aislamiento precalentamiento	Espuma poliuretano	k= 0.023 [W/m K]	\$124.000	1	\$124.000
Línea de vapor	-	Línea de vapor con regulador de 30psi	\$2.450.000	1	\$2.450.000
SOFTWARE Y HARDWARE					

Presupuesto piloto de evaporación de película descendente al vacío - UIS					
Equipo /accesorio	Material	Información adicional	Precio /unidad	Cantidad	Precio
Arduino	-	Kit Arduino uno + cable USB	\$85.000	2	\$170.000
Adaptador Arduino	-	-	\$5.000	2	\$10.000
Sensores de temperatura	-	Tipo K y TMP36	\$19.000	5	\$95.000
Sensores de presión	-	Sensor Mpx10dp	\$26.000	3	\$78.000
Manómetro		Vacuómetro	\$130.000	1	\$130.000
Sensor de flujo	-	Medidor de caudal vertical	\$128.000	1	\$128.000
Sensor de nivel	Acero Inoxidable	Medidor ubicado en el tanque	\$45.000	1	\$45.000
Computador		Solicitado a Planta Física de la UIS		1	\$ -
MATERIALES Y ACCESORIOS					
Abrazaderas	Acero Inoxidable	-	\$194.000	5	\$970.000
Tornillos	Acero Inoxidable	-	\$2.500	35	\$87.500
Codo	Acero Inoxidable	2 unidades	\$110.000	2	\$220.000
Válvula de globo	Acero Inoxidable		\$437.800	1	\$ 437.800
		TOTAL	\$14.250.500		\$15.939.300

Apéndice B. Presentación del piloto de evaporación.

El piloto cuenta con tres secciones, precalentamiento, evaporación y separación. En la Figura se presenta las entradas y salidas del piloto.

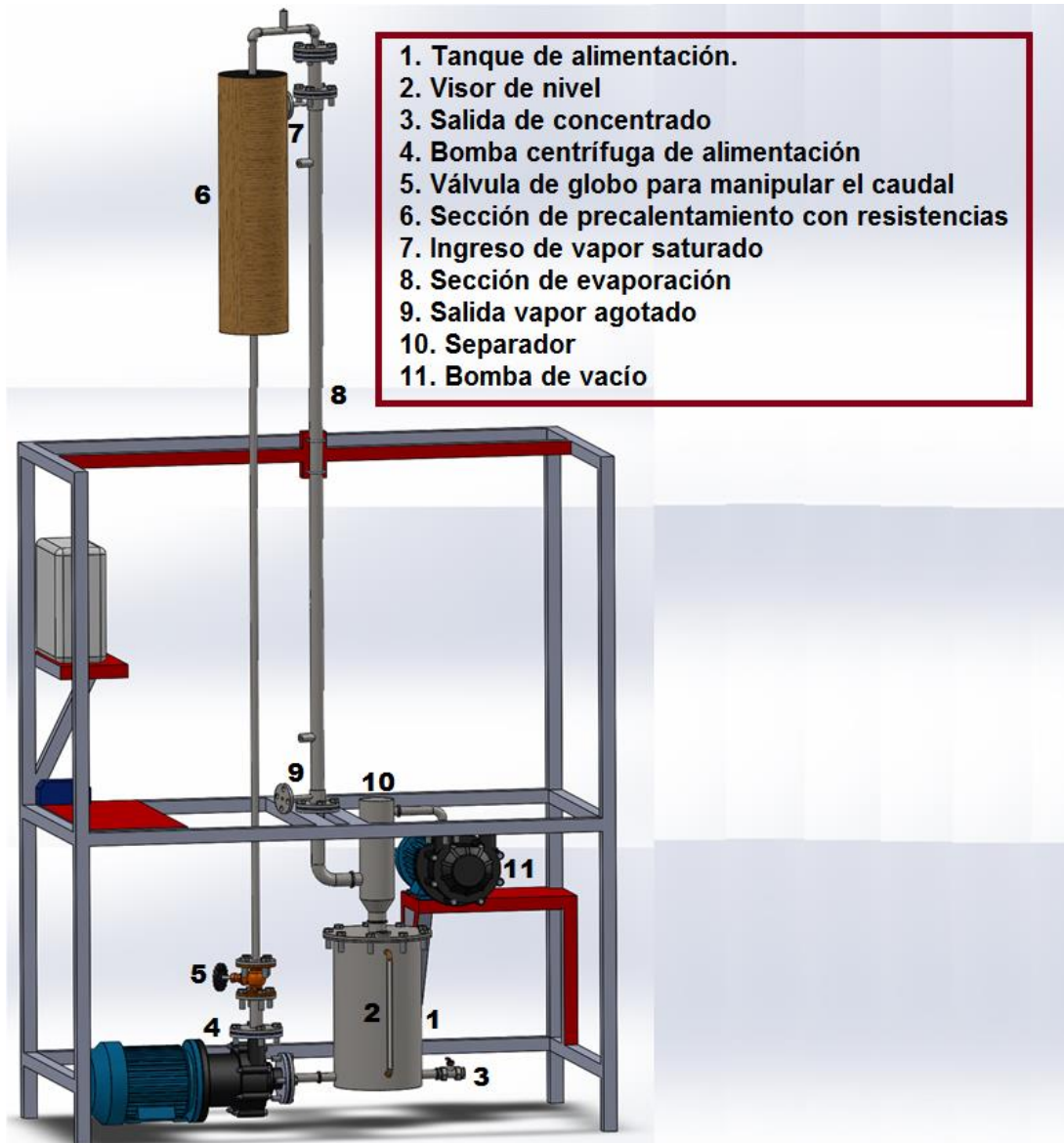


Figura anexo 2. Renderizado del piloto de evaporación con partes.

En la Figura que se presenta a continuación se presentan los sensores instalados en el piloto y su ubicación.

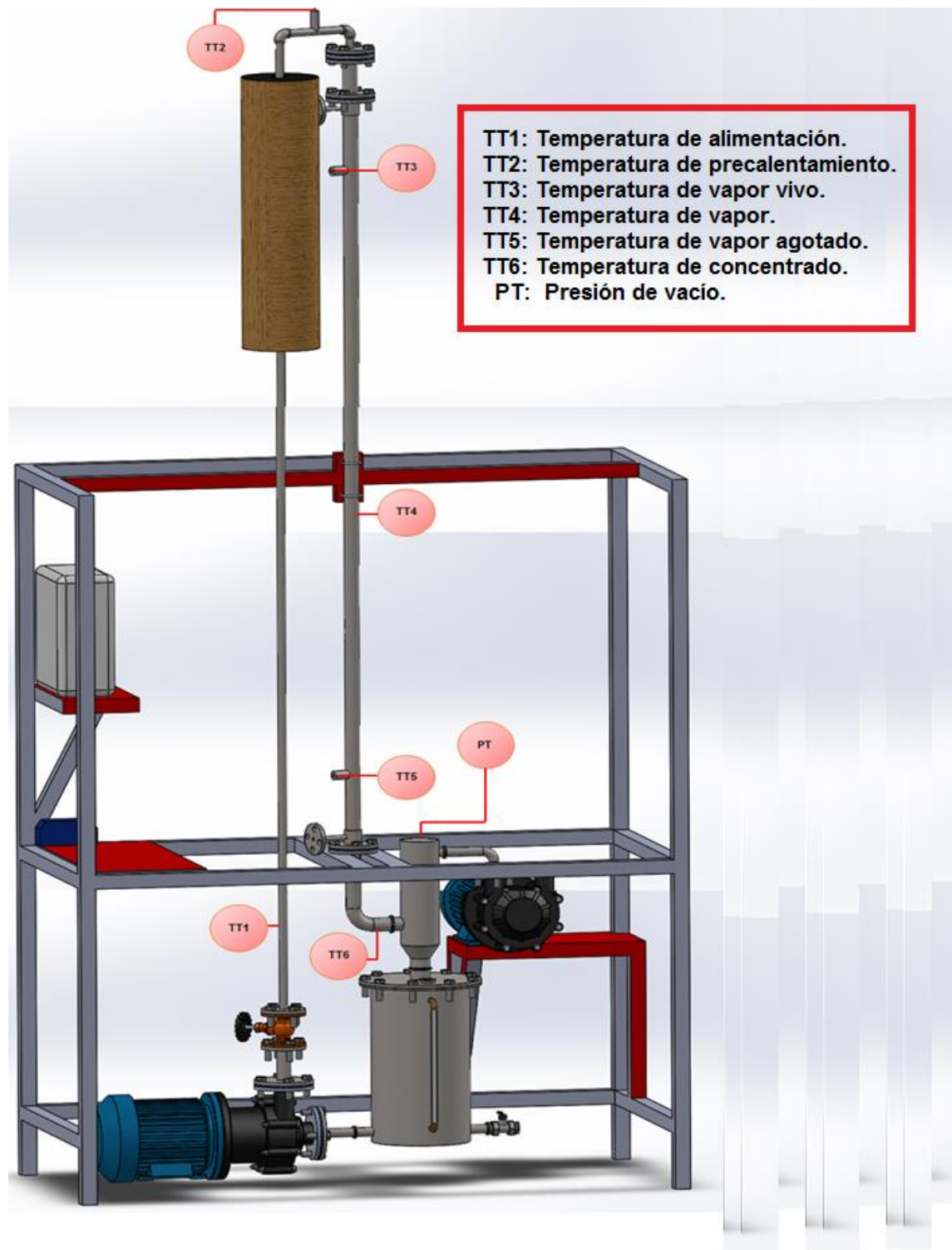


Figura anexo 3. Renderizado con ubicación de sensores en el piloto.

Apéndice C. Protocolos de funcionamiento del piloto.

Protocolo de funcionamiento

El protocolo de funcionamiento del piloto de evaporación consta del encendido, la operación, el apagado, la limpieza y el mantenimiento del mismo.

Encendido

Es importante aclarar que el encendido del equipo se debe dar con el acompañamiento del técnico de laboratorio garantizando el encendido de la caldera con el protocolo de encendido de la misma y con el tiempo de anterioridad necesario para su operación.

- Preparación de la solución a concentrar según especificadores de concentración de la solución inicialmente. Carga al tanque de alimentación.
- Activar la corriente de todo el sistema mediante el switch de on/off que se encuentra ubicado en la parte lateral izquierda de la caja de control.
- Se enciende el computador y se inicia la interfaz equipo – usuario disponible en el escritorio (Para el uso de la interfaz observe protocolo interfaz equipo-usuario).
- Garantice que las pantallas de visualización de la caja están encendidas y registrando alguna temperatura (en este momento debe ser la temperatura del ambiente).
- Abrir la válvula de paso de vapor al piloto.
- Encienda las bombas de Vacío y centrífuga de alimentación. Verifique que la bomba de vacío tenga su alimentación de agua contante al anillo y que la bomba centrífuga cuente con fluido para impulsar.

Operación

- Se verifican temperaturas de interfaz con las de las pantallas de visualización.
- Se verifica el sistema de precalentamiento funcionando a través de la lectura de la temperatura de precalentamiento.
- Se verifica presión de la interfaz con la del vacuómetro.
- Se verifica cambio en el nivel del tanque de manera constante.
- Para la toma de muestras, es necesario manipular las dos válvulas que se encuentran en el visor de nivel. Para la toma de una muestra se cierra la válvula de arriba y se abre la válvula de abajo para tomar la muestra de concentrado.
- Recolección de condensado de vapor se realiza durante la operación del piloto, se dispone de una manguera conectada a la trampa de vapor que permite recolectar el vapor condensado en baldes, que después deben ser dispuestos en una probeta de 1 L para medir el volumen de vapor condensado.
- Cuando el nivel del tanque marque aproximadamente 5 L es momento de parar la prueba, teniendo en cuenta que no se debe apagar el equipo ya que se debe realizar limpieza. Siguiendo el protocolo de limpieza.

Apagado

- Se cierra válvula de vapor.
- Se apaga la bomba de vacío.
- Se apaga la bomba de alimentación.
- Se guardan los datos recolectados por la interfaz en un documento nuevo de Excel.
- Se verifican las gráficas de la interfaz.

Protocolo de limpieza

- Es necesario después de extraer la solución concentrada del piloto. Cargar 35 L de agua para la limpieza del sistema.
- Este lavado se realiza a temperatura ambiente en el sistema de precalentamiento y sin alimentación de vapor. Se realiza por 10 minutos el lavado, dejando fluir el agua a través de todo el sistema. El calor ni de precalentamiento, ni de evaporación es utilizado en esta etapa.
- Se desmonta el tanque de alimentación y se libera el agua cargada y se realiza limpieza manual al tanque.
- Se verifica la calidad del agua (incrustaciones o residuos orgánicos).
- Se vuelve a montar el tanque.

Protocolo de mantenimiento

El piloto de evaporación al trabajar con productos orgánicos que pueden dejar residuos dentro de las tuberías, necesita limpieza regularmente para garantizar la inocuidad del piloto. Por esto se realizan las siguientes recomendaciones:

- Al tanque de almacenamiento del agua con la que funciona el anillo liquido de la bomba de vacío es recomendable agregar hipoclorito de sodio al 5,25% de concentración (concentración comercial) cada 5 días. Y cada mes debe ser cambiada.
- Cada 20 días el piloto realizar un lavado con mezcla de amoníaco y agua, se utiliza amoníaco porque es una base débil que elimina y limpia productos orgánicos de manera efectiva.

Se deja además para el laboratorio una caja adicional que cuenta con repuesto de cada uno de los sensores, cables de conexión y cada una de las fichas técnicas de las bombas, sensores y

elementos finales de control. Adicionalmente, se deja un manual que estará disponible para los estudiantes en el desarrollo de práctica y un libro con ejemplos de prácticas que se pueden realizar con el piloto para los docentes o los encargados de la evaluación de la práctica en la asignatura.

t [min]	Presión* [mmHg]	Temperatura** [°C]						Vapor condensado*** [L]	Concentración [°Brix]
		TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT6		
16									
18									
20									
22									
24									
26									

*La presión registrada en esta tabla debe ser la observada en el vacuómetro ubicado en el separador.

**Las temperaturas registradas en esta tabla deben ser las observadas en las pantallas de visualización de la caja de control del piloto.

*** Vapor condensado en cada intervalo de tiempo, no acumulado.

Notas sobre la prueba

Apéndice E. Esquemático de práctica para desarrollar en el piloto.

Introducción

La evaporación es una operación unitaria que tiene por objeto concentrar una solución formada por un soluto no volátil y un disolvente volátil. En la evaporación la concentración ocurre mediante ebullición del disolvente que en este es agua. En esta práctica se presenta un piloto de evaporación de película descendente que opera bajo vacío.

Objetivos

El desarrollo de una práctica de laboratorio buscará cumplir con uno de estos dos objetivos.

- Analizar la influencia de la presión en el sistema.
- Analizar la influencia del sistema de precalentamiento en la eficiencia del proceso.

Marco Teórico

La evaporación ocurre en la manufactura de una variedad de productos en la industria de procesos químicos: incluyendo químicos farmacéuticos, orgánicos como alimentos, inorgánicos, poliméricos y fertilizantes. La diferencia física entre la evaporación y el secado es que el producto de la primera operación es un líquido a veces viscoso y en la segunda operación es un sólido. En la industria alimentaria, la evaporación es ampliamente utilizada en la industria láctea para la concentración de leche o como una etapa de la elaboración de leche en polvo, en la industria de zumos de fruta y la fabricación de mermeladas, conservas y jaleas.

La evaporación de película descendente es una operación útil para aumentar la concentración de los sólidos en los productos, lo que permite que sea implementado en la industria de alimentos

para facilitar preservación de los mismos, para reducir costos de almacenaje, embalaje y transporte de productos finales (Brennan, 1980).

Temas de consulta

- Qué es la evaporación, factores que afectan la evaporación, tipos de evaporación.
- Especificaciones de un evaporador de película descendente. Ventajas de la evaporación de película descendente en relación a otros tipos de evaporación.
- Termodinámica de la evaporación teniendo en cuenta ecuaciones para calcular coeficientes de transferencia de calor.
- ¿Qué es la concentración y cómo se representa? ¿Qué es el factor de concentración volumétrica y cómo se calcula?

Bibliografía de consulta

- MacCabe. L, Smith. C, Harriott, P. 2012. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Séptima edición.
- Wylen. V. 2002. Fundamentos de termodinámica. Tablas y capítulo del libro.
- Barbosa. G.V. 2002. Manual de Laboratorio de Ingeniería de Alimentos. Capítulo 11.

Equipos y materiales necesarios

- Solute a concentrar (depende de la cantidad de solución, basándose en el cálculo de °Brix).

Ejemplo: 30 L de solución agua-azúcar de 5°Brix.

$$m_{sto} = 30 \text{ L sln} \left(\frac{1 \text{ kg}}{\text{L}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) * \left(\frac{5 \text{ g}}{100 \text{ g sln}} \right) = 1500 \text{ g} = 1.5 \text{ kg de azucar}$$

- Un cronómetro.
- Una probeta de 1L.
- Tres baldes.
- Un termómetro.

- Un refractómetro.
- Guantes de protección térmica.

Desarrollo Experimental

Basados en la presentación del piloto (anexo x) de este libro y en el conocimiento del mismo:

1. Se prepara la solución con agitación mecánica para garantizar homogeneidad.
2. Se cargan 30 L de solución al tanque de alimentación.
3. Se realiza encendido del piloto según protocolo de encendido.
4. Se verifican los *set point* de presión del sistema y de temperatura de precalentamiento.
5. Se fija el caudal de alimentación a través de la válvula de globo.
6. Se realiza recolección del vapor condensado a la salida de la trampa de vapor y se determina el volumen recolectado en intervalos de tiempo planteados en el formato de seguimiento de la práctica (Anexo 4). Se mide la temperatura del vapor condensado con un termómetro (esta tarea debe realizar con el uso de guantes de protección térmica).
7. Se toman muestras de concentrado se toman al tiempo 0, 8, 16, 20, 24 min y se registran en el formato de seguimiento de la práctica (Anexo 4).
8. Se hace registro de datos de las pantallas de visualización y el vacuómetro en el formato de seguimiento de la práctica.
9. Una vez terminada la práctica se realiza la recolección de datos obtenidos por la interfaz. Para esto es necesario guardar el registro en un documento nuevo de Excel.
10. La limpieza del piloto se realiza según protocolo de limpieza (Anexo 3).
11. Finalmente, se realiza el protocolo de apagado del equipo (Anexo 3).

Cálculos a realizar

- Calcular los coeficientes de transferencia de calor de la evaporación y del precalentamiento.

- Balance de masa de materia seca.
- Calor cedido por el vapor.
- Realizar gráficas de Concentración vs t, Factor de Concentración volumétrica Vs t, T precalentamiento vs t, P sistema vs t, Caudal de alimentación vs t, temperaturas del sistema vs t, V condensado acumulado vs t.

Preguntas de análisis

Basados en el análisis de los resultados obtenidos durante la práctica responde las siguientes preguntas:

- ¿Qué puede decir de la eficacia del equipo?
- ¿Qué puede decir de la eficiencia del equipo?
- ¿Cuál es el efecto del aspecto evaluado sobre el proceso de concentración?
(Precalentamiento o presión del sistema)
- ¿Cuál es la importancia de la presión en el sistema?