

**CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO LABORATORIO DE
EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE**

CARLOS JULIÁN MUÑOZ QUIROGA

RICHARD JOSÉ SOLANO GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2014

**CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO LABORATORIO DE
EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE**

CARLOS JULIÁN MUÑOZ QUIROGA

RICHARD JOSÉ SOLANO GÓMEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Director:

Prof. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA

Ing. Químico, M. Sc., Ph. D.

Codirector:

OMAR ANDRÉS BENAVIDES PRADA

Ing. Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2014

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Dios, por bendecirnos con esta experiencia.

Nuestros **familiares y amigos** por su comprensión y apoyo incondicional.

Colciencias y a la empresa **PROMITEC SANTANDER S.A.** por su colaboración.

A la **Universidad Industrial de Santander** por brindarnos una formación integral.

Al profesor **Carlos Muvdi** por sus valiosas enseñanzas y colaboración.

Al **laboratorio CICTA** en Guatiguará por acogernos de buena manera y permitirnos hacer parte de su grupo de trabajo.

A las empresas **Maquinados & montajes S.A.**, **Octoplus S.A.** y todos los demás proveedores que nos ayudaron durante el desarrollo del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. METODOLOGÍA	18
1.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO LABORATORIO DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE.....	19
1.2. IMPLEMENTACIÓN DEL PILOTO DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE ...	20
2. RESULTADOS Y ANALISIS	21
2.1. PRESENTACIÓN DEL PILOTO DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE.....	21
2.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL INTEGRAL	26
2.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO	33
2.4. IMPLEMENTACIÓN DEL PILOTO DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA DESCENDENTE ...	35
3. CONCLUSIONES	39
4. RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama metodológico.....	18
Figura 2. Esquema del piloto de evaporacion de pelicula descendente	21
Figura 3. Planos e imágenes del sistema evaporador	23
Figura 4. Plano e imagen del sistema de distribucion	24
Figura 5. Planos e imágenes del ciclón y el condensador.....	25
Figura 6. Plano e imagen del sistema de calentamiento del aire	26
Figura 7. Ubicación de los sensores del piloto de evaporación.....	27
Figura 8. Módulo EFm-JM60, sensores y EFC conectado a plataforma Octobot..	28
Figura 9. Módulo EFm-JM60 conectado a la tarjeta de visualización.....	30
Figura 10. Sensores de temperatura y presión	30
Figura 11. Electrovalvula y relé de estado solido.....	33
Figura 12. Interfaz grafica de usuario.....	33
Figura 13. Iconos de las funciones de la interfaz	35
Figura 14. Boquilla rediseñada complemento de la boquilla inicial.....	35
Figura 15. Comportamiento de la película al vacío y con gas de arrastre	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de tanques y accesorios del piloto de evaporación	22
Tabla 2. Características de los equipos usados en el piloto de evaporación	22
Tabla 3. Capacidades de los relés de estado sólido	32
Tabla 4. Datos y resultados de las pruebas de evaporación al vacío	36
Tabla 5. Datos y resultados de las pruebas de evaporación con gas de arrastre.	37

RESUMEN

TITULO: CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PILOTO LABORATORIO DE EVAPORACIÓN DE PELICULA DESCENDENTE*

AUTORES: CARLOS JULIÁN MUÑOZ QUIROGA; RICHARD JOSÉ SOLANO GÓMEZ**

PALABRAS CLAVE: EVAPORACIÓN, PILOTO LABORATORIO, IMPLEMENTACION, SISTEMA DE CONTROL, JARABES DE GLUCOSA, INTERFAZ GRAFICA DE USUARIO

DESCRIPCION:

En el siguiente trabajo se presenta de forma detallada la construcción y la implementación de un piloto laboratorio de evaporación de película descendente para evaluar la etapa de concentración de los hidrolizados de almidón.

Este piloto está construido esencialmente en acero inoxidable y puede trabajar las técnicas de evaporación al vacío o con gas de arrastre. Está diseñado para trabajar con temperaturas del tubo de evaporación hasta los 350 °C, presiones de vacío hasta los 100 mbar, temperaturas del aire hasta los 150 °C y temperaturas de precalentamiento hasta los 80 °C. El equipo también cuenta con un sistema de control digital (diseñado en el marco de este proyecto) que puede ser operado por computadora o por medio de un tablero de control. El sistema de control está formado por 5 lazos de control por retroalimentación para regular las temperaturas del tubo de evaporación, temperatura de alimentación, temperatura del aire y presión de vacío. Para el control por computadora se diseñó una interfaz gráfica en NetBeans cuya función principal es la de mostrar en tiempo real los valores de las variables a controlar.

Adicionalmente, el piloto está acompañado de los manuales de operación y mantenimiento, en donde se muestra de forma sencilla una descripción del equipo y una guía para su uso. Estos manuales hacen del piloto de evaporación y su sistema de control una herramienta muy útil para la formación académica y la investigación.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías físico-químicas. Escuela de ingeniería química. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, ingeniero químico. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada, ingeniero químico

ABSTRACT

TITLE: CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION OF A LABORATORY PILOT FALLING FILM EVAPORATOR*

AUTHORS: CARLOS JULIÁN MUÑOZ QUIROGA; RICHARD JOSÉ SOLANO GÓMEZ**

KEYWORDS: EVAPORATION, LABORATORY PILOT, IMPLEMENTATION, CONTROL SYSTEM, GLUCOSE SYRUP, GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI).

DESCRIPTION:

The following paper presents the detailed construction and implementation of a laboratory pilot falling film evaporation to evaluate the stage of concentration of starch hydrolysates.

This pilot is essentially constructed in stainless steel and can work the techniques of vacuum evaporation or gas carrier. It was designed to work with evaporation tube temperatures up to 350 °C, vacuum pressures to 100 mbar, air temperatures up to 150 °C and preheating temperature up to 80 °C. The pilot also has a digital control system (designed in the framework of this project) which can be operated by computer or through a control panel. The control system consists of five feedback control loops to regulate the evaporation tube temperature, food temperature, air temperature and vacuum pressure. For the computer control, it was designed a GUI in NetBeans whose main function is to show in real time the values of the control variables.

In addition, the pilot is accompanied by the operation and maintenance manuals, where it is shown a description of the equipment and a guide for use. These manuals make the pilot of evaporation and its control system very useful for academic, training and research activities.

*Degree work

**Faculty of physical-chemical engineering. School of chemical engineering. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, chemical engineer. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada, chemical engineer

INTRODUCCIÓN

En la industria de alimentos, los jarabes de glucosa son productos de gran valor comercial que pueden ser utilizados para la obtención de jarabes de fructosa. Son soluciones concentradas de sacáridos nutritivos, obtenidos a partir de la hidrólisis ácida o enzimática del almidón (Ruiz, 2009). Para la obtención de los jarabes es necesario realizar un proceso de clarificación y posterior concentración, con el fin de mejorar sus propiedades, preservarlo y facilitar su transporte. Este trabajo se centra en la etapa de concentración. Ésta se realiza por medio de la evaporación, generalmente en evaporadores al vacío (Rodríguez & Sandoval, 2011).

La evaporación es una operación unitaria empleada para eliminar el agua de los alimentos líquidos diluidos, para obtener productos con mayor concentración y adicionalmente otorgarle las propiedades sensoriales deseadas (color, sabor, textura). La eliminación de agua de los alimentos proporciona estabilidad microbiológica y ayuda a reducir los costos de transporte y almacenamiento. (Singh & Heldman, 2008).

En la evaporación, además de la temperatura y la presión, es necesario analizar otros factores que pueden afectar la operación de concentración (Geankoplis, 1998). Entre ellos se pueden mencionar:

Concentración del líquido: La alimentación en el evaporador, por lo general, es bastante diluida, por lo tanto, su viscosidad al inicio del proceso es similar a la del agua. A medida que ocurre la evaporación, la solución se concentra y su viscosidad puede elevarse notablemente, causando una marcada disminución del coeficiente de transferencia de calor (Geankoplis, 1998).

Efectos térmicos: Los alimentos y materiales biológicos son sensibles al calor. La degradación térmica produce efectos como la caramelización y la desnaturalización de las proteínas, además se pueden presentar pérdidas en el

aroma o fragancias (Berk, 2009). Debido a esto, se usa la evaporación al vacío, ya que reduce las temperaturas de operación y evita una disminución en la calidad del producto.

Deposición de material: Algunas soluciones depositan material sobre las superficies de calentamiento. En estos casos, el coeficiente global disminuye progresivamente hasta que llega un momento en que es preciso interrumpir la operación y limpiar estas superficies (McAbe *et al.*, 1991).

Material de construcción: La mayoría de los evaporadores que deben cumplir normas de higiene (industria alimentos) se fabrican en acero inoxidable 304 o 316. Sin embargo, en procesos donde se usan disoluciones que pueden atacar a los metales ferrosos y producir corrosión, se utilizan materiales especiales o aleaciones de estos, tales como titanio, cobre, níquel, monel o grafito (APV, 2008).

La etapa de concentración (evaporación), por lo general, representa altos costos energéticos para las empresas. En la industria azucarera, por ejemplo, concentrar soluciones requiere una gran parte de la energía total para la producción (Huseyin & Mustafa, 2012). En la búsqueda de reducir este consumo se presentan las técnicas de evaporación de película (descendente y ascendente). Este proyecto se centra en los evaporadores de película descendente, que se caracterizan por disminuir el tiempo de residencia de las soluciones a concentrar y, junto con la operación en vacío, reducen la degradación térmica y el consumo energético. Estos evaporadores han sido implementados con éxito en la industria lechera y azucarera, logrando mejorar la concentración de las soluciones, mostrando un alto coeficiente de transferencia de calor y bajos tiempos de residencia (Chen & Jebson, 1997; Jorge *et al.*, 2010).

En un evaporador de película descendente el líquido entra por la parte superior, y fluye por acción de la gravedad al interior de los tubos calentados generalmente con vapor de agua (McAbe *et al.*, 1991). El principal problema de estos evaporadores

radica en la distribución del líquido como película uniforme, que fluye hacia abajo en el tubo. Esto se soluciona mediante el uso de distribuidores especializados o boquillas rociadoras. Así mismo, dichos evaporadores trabajan bien con líquidos viscosos y tiempos de residencia entre 20 o 30 s, los cuales son mucho más bajos respecto a los 3 o 4 min en un flujo ascendente (**Singh & Heldman, 2008**).

Los avances logrados hasta el momento en el proceso de evaporación, gracias al estudio de las técnicas de película, han sido significativos. Una muestra de ello es el desarrollo de modelos y correlaciones más precisas, que permiten mejorar la eficiencia del proceso gracias al análisis del coeficiente de transferencia de calor. **Chen & Jebson, (1997)** realizaron un estudio experimental de la transferencia de calor en la evaporación en película descendente, mostrando como es influenciada por factores como la temperatura y la longitud del tubo. Diseñaron un evaporador con un tubo de acero inoxidable de 2 m de largo, 32 mm de diámetro externo y 1,6 mm de espesor. Dentro de éste se encuentra otro tubo de acero inoxidable de 0,75 m de largo y 20 mm de diámetro que distribuye la alimentación para formar la película. Sus resultados demostraron un aumento del coeficiente de transferencia con el aumento de la temperatura de evaporación y el número de Reynolds (flujo turbulento), y una disminución de éste con el aumento de la longitud del tubo evaporador y la viscosidad.

El sistema de distribución de líquido es uno de los componentes principales en los evaporadores de película descendente. Éste permite formar la delgada capa de líquido que fluye de manera uniforme sobre los tubos. Los siguientes trabajos resaltan la importancia de una buena distribución para un mejor rendimiento de estos evaporadores. **Morison et al., (2006)** generan una relación adimensional para el cálculo del flujo mínimo de humectación utilizando un evaporador formado por 19 tubos de 1 m de largo y 48 mm de diámetro interno en acero inoxidable, trabajando con fluidos como el agua, glicerol y alcohol. Probaron 4 distribuidores en forma de disco con varios orificios, organizados de forma diferente. Sus

resultados también muestran una fuerte influencia de la tensión superficial y la geometría del evaporador en la distribución de líquido. **Huseyin et al., (2011)** llevaron a cabo estudio sobre la transferencia de calor usando soluciones de azúcar entre los 3 y 20 °Bx en un piloto de evaporación de película descendente que consta de un tubo de acero inoxidable de 3 m de longitud y 1,5 mm de espesor. Alrededor del tubo evaporador se hicieron una serie de ranuras triangulares logrando mejorar la distribución de la película. Sus estudios generaron un modelo matemático para calcular el espesor de película el cual fue probado exitosamente.

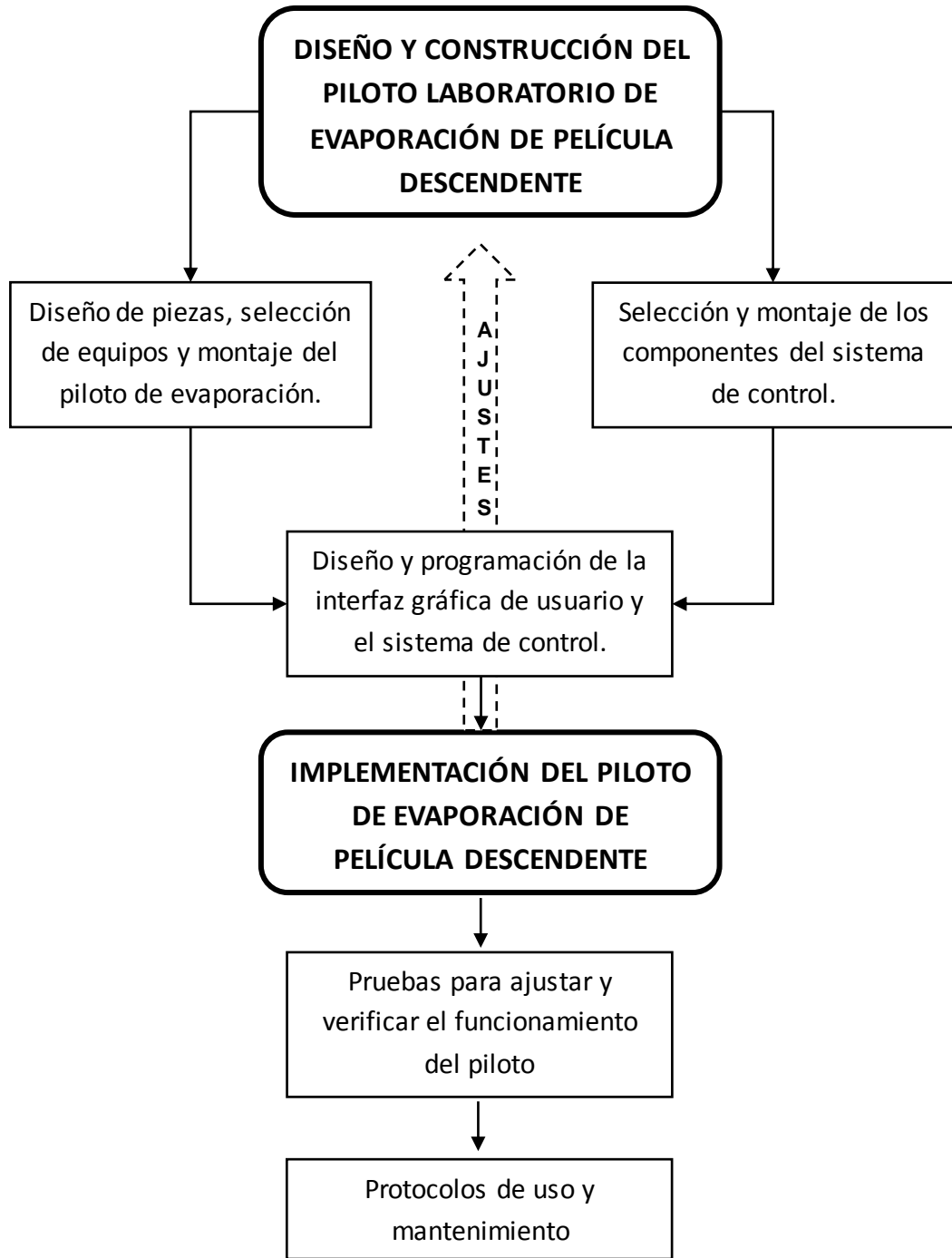
Propiedades físicas como la viscosidad también han sido objeto de estudio debido a que pueden afectar de manera significativa la distribución y la estabilidad del líquido. Los trabajos de **Weise & Scholl, (2009)** investigaron la dinámica de los fluidos y la transferencia de calor en un evaporador de película descendente aumentando la viscosidad de líquidos como ciclohexanol y monoetilenglicol. El evaporador utilizado fue un tubo de vidrio de 1,255 m de largo y 4,3 cm de diámetro, el material permitió observar la distribución y la evolución de la película durante el proceso. El sistema de distribución estuvo compuesto por ranuras rectangulares en la circunferencia del tubo evaporador. Sus resultados muestran que aún a diferentes configuraciones de flujo (laminar o turbulento) no se presentaron daños en la película o zonas secas debido a su sistema de distribución, también que es posible la ebullición nucleada sin causar inestabilidad en la película.

A partir de lo mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo fue implementar un piloto de evaporación de película descendente que permita trabajar las técnicas de vacío y gas de arrastre, para evaluar la etapa de concentración de los hidrolizados de almidón. Este piloto cuenta con un sistema de control que garantiza la estabilidad del proceso y permite la medición y seguimiento de las variables más significativas. De acuerdo a lo consultado este sería el único piloto de este tipo en el país y podrá ser usado para la formación académica y la investigación. Nuestro estudio se encuentra enmarcado dentro del

proyecto Colciencias titulado “Aumento de la productividad de concentrados de jarabes de glucosa obtenidos a partir de hidrolizados de almidón de yuca por métodos no convencionales de concentración” cofinanciado por la Universidad industrial de Santander y la empresa PROMITEC SANTANDER S.A.S.

1. METODOLOGÍA

Figura 1. Diagrama metodológico.



1.1. Diseño y construcción del piloto laboratorio de evaporación de película descendente

En esta etapa se realizó el diseño de las piezas del piloto de evaporación. Se seleccionó acero inoxidable tipo sanitario para la elaboración de las piezas porque es un material comercial, comúnmente empleado en evaporadores de este tipo por su buena resistencia mecánica, a la corrosión y a las altas temperaturas. Además, se llevó a cabo la selección de los elementos auxiliares tales como bomba de vacío, bomba de alimentación, válvulas, tuberías, ventilador, entre otros; necesarios para trabajar las dos técnicas de evaporación: al vacío y con gas de arrastre.

Durante esta etapa se hizo la selección y diseño de todos los componentes del sistema de control. Se escogió la estrategia de control feedback por su simplicidad y fácil manejo. Se desarrolló un sistema de control con dos opciones de operación, por computadora o por medio de un tablero de control.

Se diseñó la interfaz gráfica de usuario en el IDE (entorno de desarrollo integrado) NetBeans, el cual fue creado principalmente para el lenguaje de programación java. La escogencia de NetBeans se debe a que la ejecución de las aplicaciones creadas en este entorno requieren menos recursos del computador comparadas con aplicaciones desarrolladas en softwares como LabVIEW o MATLAB.

Las variables a controlar para la técnica al vacío son: la temperatura del tubo de evaporación y la presión de vacío. Estas variables fueron escogidas porque son dos de las más influyentes en los procesos de evaporación (**Chen & Jebson, 1997; Ali Abid & Vasseur, 2007; Berk, 2009**), además son de fácil medición.

La operación con gas de arrastre es un proceso nuevo del cual no se tienen referencias. Es similar al proceso de secado con aire utilizado en algunos alimentos, en donde las temperaturas giran en torno a los 70-90 °C y las velocidades están entre los 2-4 m/s (**Akpinar, 2006; Nguyen & Price 2007; Corzo et al.,**

2008). Basados en estos trabajos, se seleccionaron la temperatura y la velocidad del aire como las variables a controlar y se implementó un sistema de control automático para la primera.

Debido al corto tiempo de residencia del fluido a concentrar en el sistema evaporador (del orden de pocos segundos), es necesario su precalentamiento. Por esto, en ambas técnicas se controló la temperatura de la alimentación.

El piloto de evaporación de película se diseñó para trabajar temperaturas del tubo de evaporación hasta los 350 °C, presiones de vacío hasta los 100 mbar, temperaturas del aire hasta los 150 °C y temperaturas de precalentamiento hasta los 80 °C.

1.2. Implementación del piloto de evaporación de película descendente

En esta etapa se realizaron pruebas de las dos técnicas mencionadas usando jarabes de glucosa con concentraciones iniciales del 20 y 40% p/p para observar el funcionamiento del equipo y realizar los ajustes necesarios. La concentración al 20% p/p es un valor bajo, ideal para iniciar las pruebas y la del 40% p/p se debe a la necesidad de observar los efectos de una solución viscosa sobre el piloto.

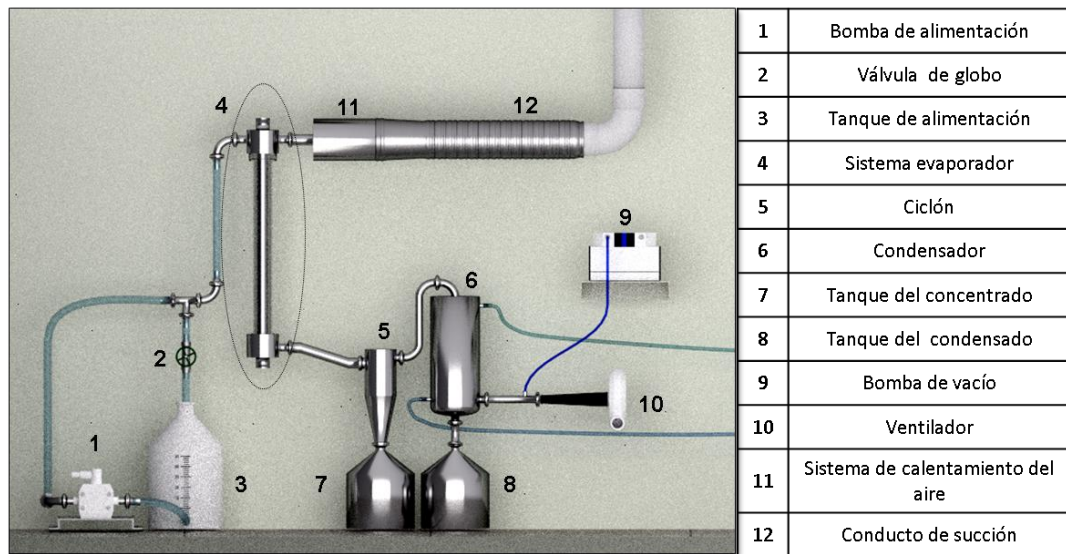
Durante las pruebas al vacío, se buscó evaluar el comportamiento del piloto de evaporación utilizando diferentes temperaturas del tubo de evaporación (entre 200 y 350 °C) y presiones de vacío (a 100 y 200 mbar). Para la técnica de gas de arrastre fueron evaluadas distintas temperaturas del aire (entre 100 y 140 °C) y velocidades de éste (entre 3 y 5 m/s). La temperatura de alimentación se fijó de acuerdo a la temperatura de ebullición del agua a la presión de trabajo. El caudal fue regulado de forma manual, buscando un valor mínimo que garantizara una película uniforme en toda la superficie del tubo de evaporación.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1. Presentación del piloto de evaporación de película descendente

En la Figura 2 se muestra el diagrama completo del piloto de evaporación de película descendente diseñado, el cual puede trabajar las configuraciones al vacío y con gas de arrastre. Para la configuración con vacío, el alimento ingresa por la parte superior del sistema evaporador (4) impulsado por el diferencial de presión creado por la bomba de vacío y el caudal es regulado con la válvula de globo (2). El fluido desciende formando una delgada película por la superficie del tubo de acero, perdiendo agua y concentrándose durante el recorrido. El líquido concentrado y el vapor generado pasan al ciclón (5) donde son separados. El concentrado es recuperado en un tanque de acero inoxidable (7). El vapor sigue al condensador, para ser recuperado en otro tanque de acero inoxidable (8).

Figura 2. Esquema del piloto de evaporación de película descendente



Para la técnica con gas de arrastre, al igual que con el vacío, la alimentación entra por la parte superior, esta vez impulsada por la bomba de alimentación (1). El gas de arrastre es tomado del ambiente utilizando un ventilador (10) que lo aspira a través del conducto de succión (12). Este aire es calentado por medio del sistema

de calentamiento **(11)** antes de entrar al sistema evaporador por la parte superior derecha. El aire calienta el fluido generando vapor y arrastrándolo. El líquido concentrado y la mezcla aire-vapor pasa al ciclón para ser separados. Posteriormente el aire es enfriado en el condensador y después retirado al ambiente.

A continuación se explicarán con más detalle las piezas más complejas del piloto, las demás se encuentra resumidas en la Tabla 1. Los equipos utilizados en el piloto son detallados en la Tabla 2.

Tabla 1. Características de los tanques y accesorios del piloto de evaporación.

	Material	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Conexión	Capacidad (L)
Tanque de alimentación	Polipropileno	670	350	—	50
Tanque de concentrado	Acero inoxidable	420	300	Tipo clamp, 2"	25
Tanque de condensado	Acero inoxidable	420	300	Tipo clamp, 1,5"	25
Válvula de globo	Acero inoxidable	140	25,4	Rosca hembra NPT, 1"	—

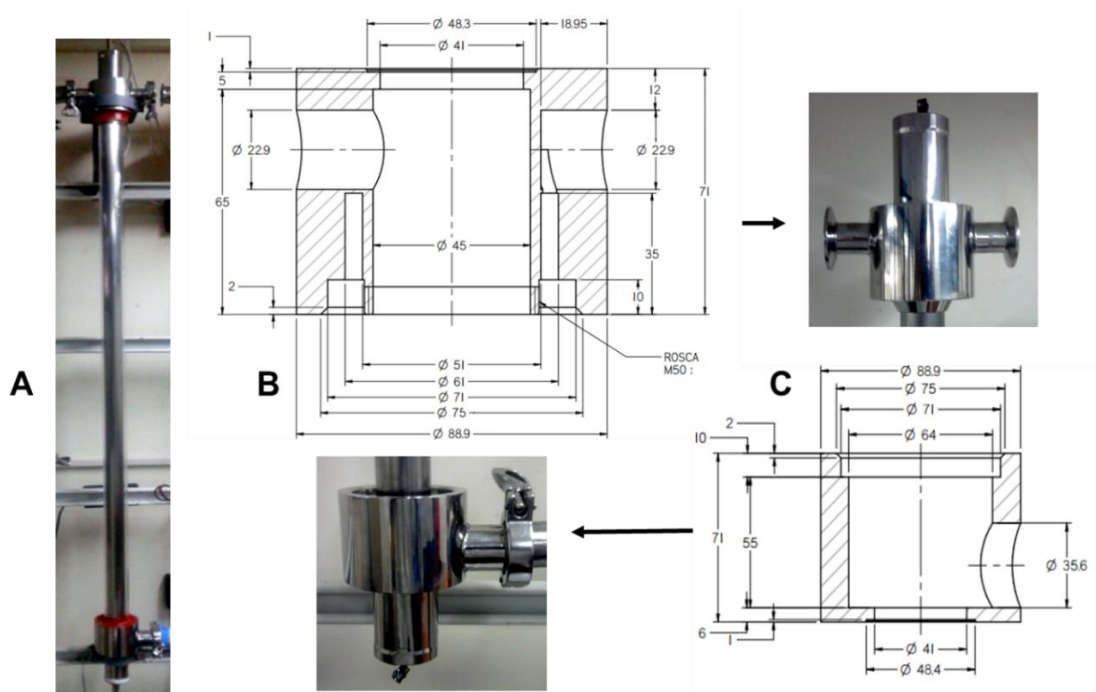
Tabla 2. Características de los equipos usados en el piloto de evaporación.

Equipo	Potencia (w)	Voltaje (V)	Marca
Bomba de alimentación	746	220	Tuthill
Bomba de vacío	750	110	Sanitas
Ventilador	600	110	Makita
Baño termostatado	1200	110	Lauda

Sistema evaporador

El sistema evaporador (ver Figura 3A) está compuesto por un tubo de acero inoxidable de 1438 mm de largo y 38,1 mm de diámetro, un tubo de acrílico transparente de 1200 mm de largo, 50 mm de diámetro y 3 mm de espesor y dos acoples de acero inoxidable ubicados en los extremos cuyas dimensiones y forma son detalladas más adelante. El tubo de acero es enroscado y colocado de forma vertical en los acoples, el tubo de acrílico es ubicado de forma concéntrica al tubo de acero y ajustado a los acoples (sellado herméticamente con empaques de neopreno y silicona roja). Esta configuración permite observar la evaporación de la película durante el proceso.

Figura 3. Planos e imágenes del sistema evaporador (medidas en mm) **A)** sistema evaporador **B)** acople superior **C)** acople inferior.

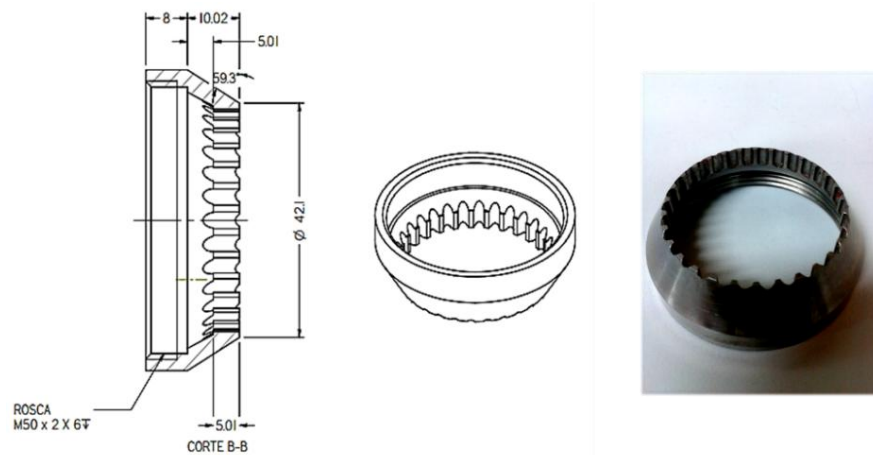


El acople superior (ver Figura 3B) es un cilindro de acero inoxidable con 2 conexiones tipo clamp de 1 1/2" diseñado para trabajar con las dos configuraciones del piloto de evaporación (al vacío y con gas de arrastre). La parte

izquierda de la pieza superior está conectada al sistema de alimentación del piloto. La parte derecha está conectada al sistema para gas de arrastre, desde esta parte se calienta y alimenta el aire tomado del ambiente. Durante el uso de la técnica al vacío esta conexión permanece sellada herméticamente con un disco de acero inoxidable. La pieza inferior (ver figura 3C) es un cilindro de acero inoxidable con una conexión tipo clamp de 1 1/2" por medio de la cual es conectado al ciclón.

El sistema de distribución de película es una boquilla de acero inoxidable enroscada en el acople superior. Está formada por una serie de ranuras semicirculares de 3 mm de diámetro, bien ceñidas al tubo de acero del sistema evaporador. Fue diseñada basada en los trabajos de **Huseyin et al., (2011)**, **Weise & Scholl, (2009)**, en donde creaban ranuras en la circunferencia del tubo evaporador probando una mejora en la distribución de la película. Ésta es detallada en la Figura 4.

Figura 4. Plano e imagen del sistema de distribución



El sistema evaporador consta igualmente de un sistema de calentamiento. Éste está formado por 2 resistencias eléctricas de 1600 W cada una ubicadas dentro del tubo de acero y alimentadas a 220 V, generando 2 zonas de calentamiento para un mejor control de temperatura.

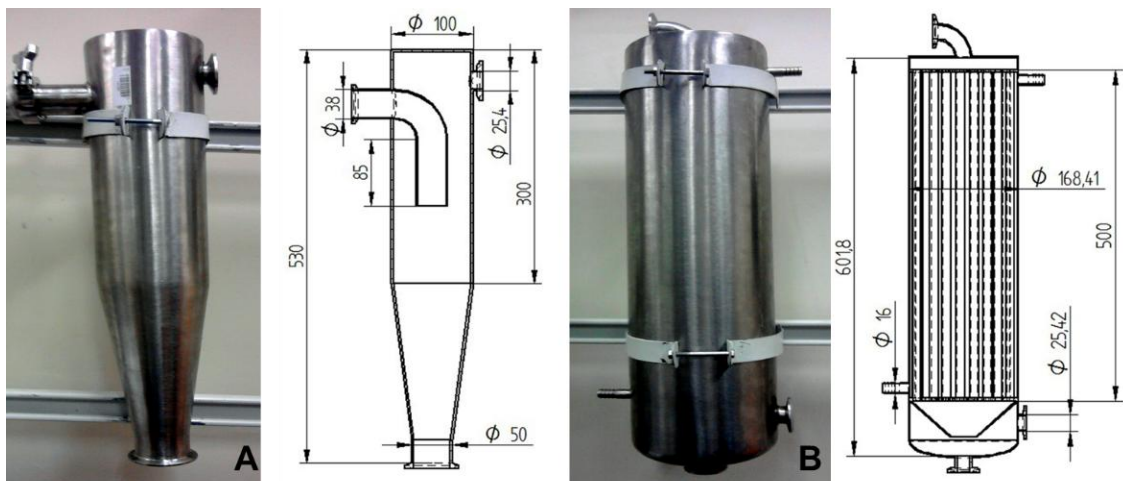
Ciclón

El ciclón (ver Figura 5A) se encarga de separar el líquido concentrado del vapor retirado o de la mezcla vapor-aire según el caso (al vacío o con gas de arrastre, respectivamente). El ciclón tiene una longitud de 530 mm y un diámetro de 100 mm. Posee 2 conexiones tipo clamp de 1 1/2" (para la conexión con el acople inferior y con el condensador) y una conexión tipo clamp de 2" (tanque de concentrado).

Condensador

El condensador (ver Figura 5B) es un intercambiador de tubo y carcasa construido en acero inoxidable. El condensador tiene 55 tubos de 500 mm de longitud y 168 mm de diámetro organizados en una placa de 164 mm de diámetro y 4 mm de espesor, cuenta con 3 conectores tipo clamp de 1 1/2" (tanque de condensado, ciclón y unión recta). Se alimenta con agua proveniente de un baño termostatado.

Figura 5. Imágenes y planos de **A)** ciclón y **B)** condensador.



Sistema de calentamiento de aire

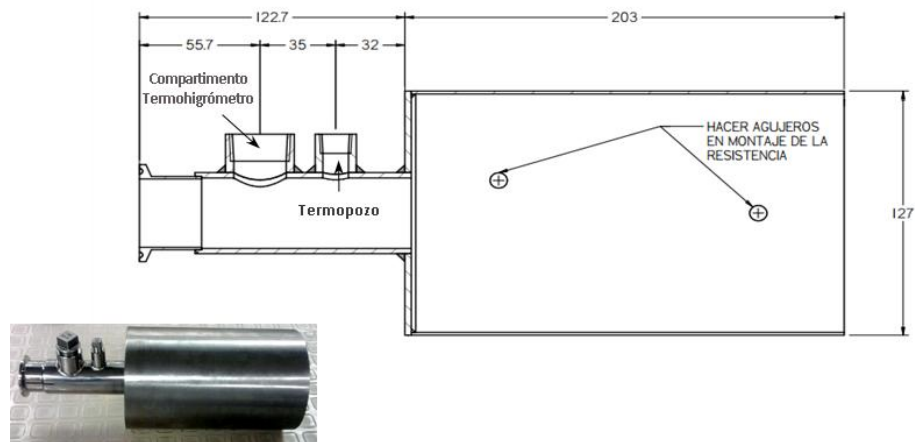
El sistema de calentamiento diseñado consiste en un recipiente cilíndrico en acero inoxidable (ver en la Figura 6) con una conexión tipo clamp de 1 1/2" y una

resistencia de 2000 W (alimentada a 110 V) en forma de espiral dentro del recipiente. Se ubicó un termopozo a la salida del recipiente de calentamiento para facilitar la medición de la temperatura y un compartimento para ubicar un termohigrómetro móvil para realizar la medición de la humedad de entrada del aire caliente.

Este sistema está conectado al conducto de succión de aire conformado por una sección en PVC de 4" de diámetro y un ducto flexible de aluminio de 1 m de largo y 6" de diámetro.

Finalmente, la temperatura del tanque de alimentación se regula mediante un sistema de calentamiento con resistencia eléctrica de 4000 W alimentada a 220 V.

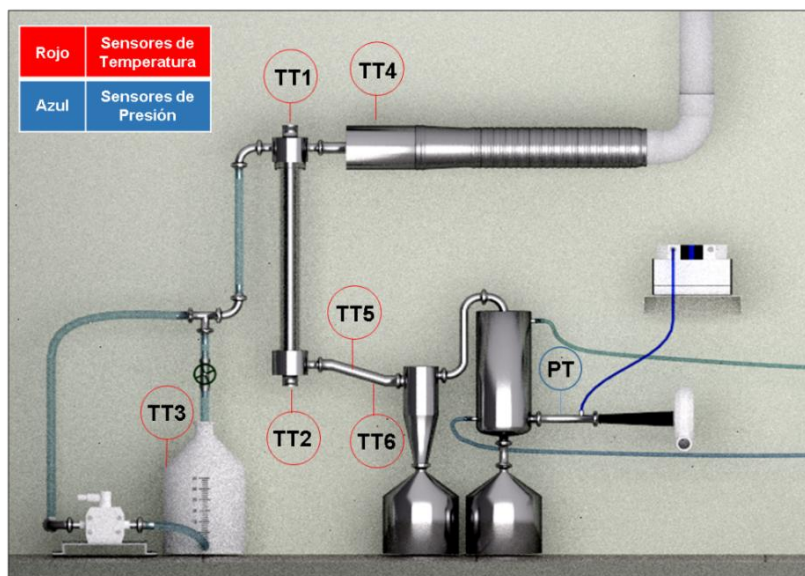
Figura 6. Plano e imagen del sistema de calentamiento de aire (medidas en mm).



2.2. Diseño del sistema de control integral

En la Figura 7 se muestra la ubicación de los sensores implementados en el piloto de evaporación de película. Como se mencionó en la sección 2.1 las variables a controlar son: las temperaturas del tubo evaporador (**1 y 2**), la temperatura de la alimentación (**3**), la temperatura del gas de arrastre (**4**) y la presión de vacío. Adicionalmente se mide la temperatura del concentrado (**5**) y la del vapor o la mezcla aire-vapor retirado (**6**).

Figura 7. Ubicación de los sensores del piloto de evaporación



El sistema de control integral, diseñado y desarrollado en el marco de este proyecto, está compuesto por dos módulos auto programables EFm-JM60 (fabricado por Octoplus S.A), 6 sensores de temperatura, un sensor de presión y los elementos finales de control que son una válvula solenoide y 4 relés de estado sólido con sus respectivas resistencias eléctricas.

El sistema de control puede ser operado por computadora o por medio de un tablero de control. La operación con el tablero consiste en una tarjeta de visualización, en donde se muestran los valores de cada sensor y un teclado capacitivo con el cual se dan todas las instrucciones al sistema. En el control por computadora los valores de los sensores son mostrados en una interfaz gráfica, además todas las instrucciones o cambios se harán desde esta misma.

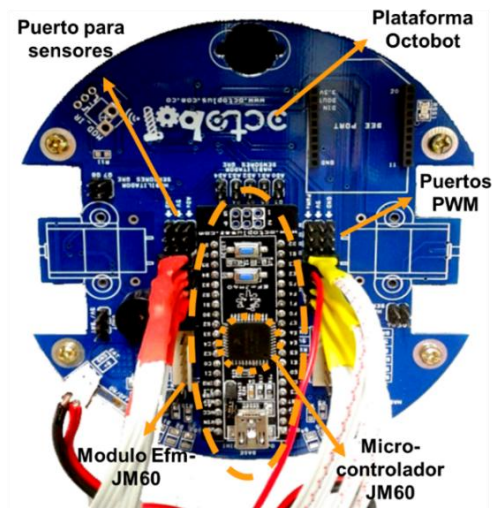
Para los dos modos de operación se cuenta con la funcionalidad de 5 controladores configurables opcionalmente *on/off* o PID, los cuales se diseñaron y se programaron en él.

Módulo de control

Éste está compuesto por uno de los módulos Efm-JM60 adquiridos, el cual posee un micro-controlador JM60 instalado. Este módulo está encargado exclusivamente del control y es conectado junto con los sensores y los elementos finales de control en la plataforma Octobot (fabricada por OCTOPLUS S.A) como se muestra en la Figura 8. Esta plataforma extiende los puertos del micro-controlador para que los sensores y diferentes componentes que se conectan a él cuenten con la posibilidad de un suministro de energía e intercambio de señales, de una forma práctica y ordenada.

El micro-controlador JM60 montado en el módulo, está en capacidad de recibir 8 señales análogas provenientes de sensores y cuenta con 6 salidas PWM (en español, modulación por ancho de pulsos) que permiten enviar señales reguladas a los elementos finales de control (válvula solenoide y relés de estado sólido).

Figura 8. Módulo Efm-JM60 y puertos de la plataforma Octobot.



La programación del micro-controlador fue realizada en el software Codewarrior 10. Esta es una herramienta basada en un entorno de desarrollo integrado que es capaz de compilar, depurar y simular la secuencia de programación del micro-controlador. Se trabajó con la versión especial de Codewarrior 10, la cual es libre

pero restringe las líneas de código (disponible en: www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=CW_SPECIAL EDITIONS).

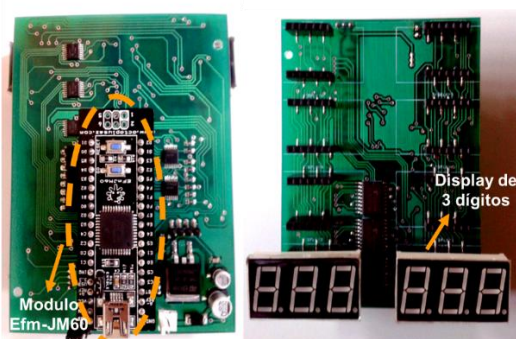
La transferencia del código generado en Codewarrior 10 al micro-controlador del módulo conectado al octobot se realiza mediante la interfaz gráfica FREESCALE JM60 GUI, un software libre (disponible en: www.freescale.com/webapp/sps/download/license.jsp?colCode=JM60_GUI_INST ALLER), que se encarga de leer y enviar el archivo generado por el compilador de Codewarrior 10 a la memoria del micro-controlador.

La empresa Octoplus S.A. proporcionó, junto con los módulos, plantillas en donde se encuentran ejemplos de las diferentes funciones del micro-controlador, siendo de gran utilidad para la programación de los mismos. Estos módulos tienen precargado un bloque de instrucciones llamado *Bootloader* (gestor de arranque) el cual permite reprogramar la memoria del micro-controlador que contiene, cuantas veces se requiera.

Tablero de control

El tablero cuenta también con un módulo EFm-JM60 que se encuentra conectado a la tarjeta de visualización de datos (ver Figura 9). Éste manipula los *displays* de tres dígitos montados en ella, de tal forma que permitan mostrar la información deseada. Este módulo se comunica con el módulo de la plataforma octobot (módulo del control), estableciendo la transmisión y recepción de datos a través de sus puertos de comunicación UART (en español, transmisor-receptor asíncrono universal). Estos puertos controlan el flujo de información entre dispositivos. De igual forma la tarjeta de visualización extiende los puertos que permiten la recepción de señales provenientes de los sensores.

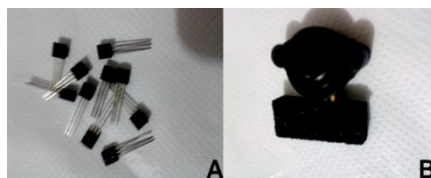
Figura 9. Módulo EFm-JM60 conectado a la tarjeta de visualización.



Sensores

Para la medición de las temperaturas del proceso (a excepción del sistema evaporador) se utilizaron sensores electrónicos LM35 (fabricado por Texas Instrument Inc.) mostrados en la Figura 10A, los cuales tienen una escala entre los 55 y 150 °C, baja corriente de alimentación y bajo costo; características que lo hacen un sensor práctico y fácil de implementar.

Figura 10. A) sensores de temperatura **B)** sensor de presión.



Para el caso de la temperatura del sistema evaporador, su medición se realizó utilizando termocuplas tipo K, debido a que la temperatura dentro del tubo de acero puede alcanzar los 350°C. Estas termocuplas son capaces de censar hasta los 1000 °C y tienen un bajo coste, pero requieren un circuito adicional para utilizarlas. Para este piloto fueron calibradas hasta los 400 °C por lo que su escala de implementación es de 20-400 °C.

El sensor de presión de la Figura 10B, es un sensor electrónico Mpx2202asx (fabricado por Freescale semiconductor Inc.) con rango de 200-1100 mbar, trabaja

a temperaturas de -40–125 °C. Este sensor posee compensación por temperatura para evitar que su señal de salida varíe al cambiar la temperatura.

El procedimiento para la calibración de los sensores es sencillo y siempre debe hacerse con un instrumento de referencia. Consiste en tomar el valor de la señal de salida del sensor a distintos valores marcados por el instrumento de referencia y hacer un ajuste con estos datos para obtener la ecuación con la que será programada la salida del sensor. Los sensores LM35 fueron calibrados utilizando termómetros de mercurio. Para el sensor de presión se utilizó un vacuometro. Las termocuplas fueron calibradas con una mufla, debido a las altas temperaturas requeridas.

Los sensores de temperatura LM35 y el sensor de presión Mpx2202asx son sensores lineales, es decir, la ecuación con la que trabajan es una ecuación lineal. Para las termocuplas tipo K es recomendable utilizar un polinomio de grado 8 debido a que la energía generada por ella no es una función lineal de la temperatura.

Elementos finales de control

Los elementos finales para el control de las temperaturas son 4 relés de estado sólido (ver figura 11B) conectados a 4 resistencias eléctricas. Un relé es un dispositivo electromecánico que funciona como interruptor para el paso de corriente eléctrica, mediante uno o varios contactos y una bobina. Los relés del tipo estado sólido son utilizados en aplicaciones donde el uso continuo de los contactos generaría un desgaste significativo en los relés convencionales (electromecánicos), disminuyendo su tiempo de vida útil.

Estos relés fueron dimensionados usando la expresión para el cálculo de la potencia eléctrica en corriente alterna (CA) (ecuaciones 1 y 2)

$$P = R * I^2 = (V/I) * I^2 = V * I \quad (1)$$

$$I = P/V \text{ (2)}$$

Donde, I es corriente expresada en amperios (A), V es voltaje expresado en volts (V) y P es potencia expresada en watts (W).

De la ecuación 2 se obtiene el valor máximo de corriente que pasa por el relé. Con base a este valor se utiliza un relé con una capacidad mayor. En la Tabla 3 se muestran las capacidades de los relés usados en el piloto de evaporación de película.

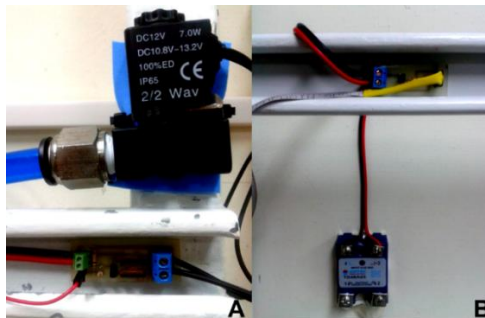
Tabla 3. Capacidades de los relés de estado sólido.

Resistencia asociada	Potencia (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Capacidad del relé (A)
Resistencia superior del evaporador	1600	220	7,27	15
Resistencia inferior del evaporador	1600	220	7,27	15
Resistencia de precalentamiento	4000	220	18,18	25
Resistencia del sistema de calentamiento del aire	2000	110	18,18	25

Estos relés trabajan conectados a los puertos PWM del octobot mediante un circuito transistor, que se encarga básicamente de transformar el pulso enviado por el puerto en un pulso adecuado para el relé.

El otro elemento final de control es una electroválvula 2/2 (ver Figura 11A), que permite el ingreso de aire al sistema para estabilizar la presión de vacío. Ésta también se conecta a los puertos PWM del octobot mediante un circuito transistor. La electroválvula trabaja a 12 V y su configuración es abierta en falla. Esto evita que ante una desconexión, sufra algún daño el sensor de presión, pues podría ser sometido a una presión por debajo de su rango de operación. Por otra parte, el vacío favorece la ebullición, con lo que aumentaría el desprendimiento de vapor, con posibles repercusiones en la bomba de vacío.

Figura 11. A) Electroválvula con su respectivo circuito transistor **B)** Relé de estado sólido con su respectivo circuito transistor.



2.3. Diseño de la interfaz gráfica de usuario

Esta interfaz (ver Figura 12) es un entorno visual programado con el fin de interactuar con los demás componentes del sistema de control de forma sencilla e intuitiva. Se encuentra diseñada para ser ejecutada en el sistema operativo Windows, pero puede ser modificada para trabajar en otros sistemas operativos como Linux o Mac.

Figura 12. Interfaz gráfica de usuario.



Cabe resaltar que la imagen de fondo de la interfaz gráfica fue creada por medio del software blender (disponible en <http://www.blender.org>), el cual es un software

libre desarrollado para modelar, animar y renderizar objetos, obteniendo imágenes tridimensionales de gran calidad

La interfaz tiene la capacidad de gestionar el funcionamiento del puerto USB del computador y es a través de éste que se realiza la comunicación con el módulo de control. Se establece específicamente una comunicación USB HID (en español, interfaz humana de usuario), que es común ver en dispositivos como teclados y ratones. La HID es un tipo de comunicación robusta y veloz que no requiere instalar *drivers* adicionales para su funcionamiento, necesarios en otros tipos de comunicación, siendo estos *drivers* una limitante cuando no son actualizados para los nuevos sistemas operativos.

La función principal de la interfaz gráfica es la de mostrar los valores en tiempo real de las variables medidas, las demás funciones serán detalladas a continuación:

Configuración de parámetros de control: estos parámetros corresponden al *set point*, ganancia, tiempo de integración, tiempo de derivación y valor en estado estacionario de la señal de salida del controlador, para cada uno de los lazos de control (ver Figura 13A).

Graficar: esta opción permite generar y visualizar gráficas de las variables controladas y su *set point* en tiempo real, de forma independiente (ver Figura 13B).

Almacenamiento de datos: la aplicación almacena información del proceso, organizándola en una hoja de cálculo de Excel. También se puede visualizar esta información directamente desde la interfaz (ver Figura 13C).

Ayuda: con esta herramienta se pueden consultar los manuales de operación y funcionamiento del piloto de evaporación (ver Figura 13D).

Figura 13. Íconos de las funciones de la interfaz.



2.4. Implementación del piloto de evaporación de película descendente

Durante la implementación del piloto de evaporación se realizaron algunos ajustes sobre el diseño inicial, con el fin de mejorar la operación del equipo. Los cambios más relevantes fueron realizados sobre el sistema de distribución y el tubo en acrílico. El sistema de distribución construido inicialmente (ver sección 3.1) trabajaba bien con caudales altos, pero a bajos caudales se tuvo dificultades con la formación de la película. Se atribuyó esto al tamaño de las ranuras, por lo cual se colocó una boquilla con ranuras de 0,8 mm de diámetro (ver Figura 14) dentro de la boquilla inicial. Con este cambio se observó una mejora notable en la distribución de la película, incluso con caudales altos.

Figura 14. Boquilla rediseñada complemento de la boquilla inicial.

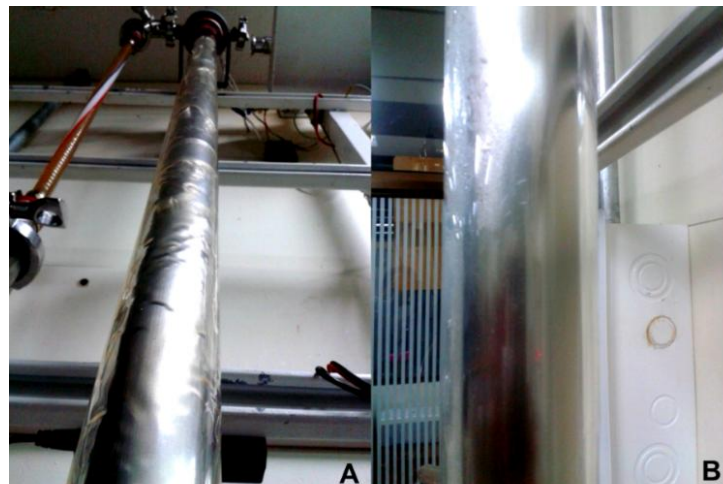


Otro cambio importante fue la disminución del diámetro del tubo de acrílico, el cual cambió de 70 a 50 mm. Esta mejora se realizó porque durante el desarrollo de algunos experimentos se observó que las burbujas generadas por la ebullición, favorecían la uniformidad de la película, con la desventaja de que al entrar en contacto con el tubo de acrílico, parte del fluido descendía por éste, disminuyendo la cantidad de fluido en el tubo de acero y dañando la película en el tramo final del sistema evaporador. Con la reducción del espacio entre el tubo de acrílico y el tubo de acero se redujo la cantidad de fluido que descendía por el acrílico,

disminuyendo el caudal de alimentación necesario para la formación de la película en el tubo de acero.

Luego de realizar los ajustes necesarios y verificar el correcto funcionamiento del piloto, se procedió con un desarrollo experimental para realizar una evaluación de las técnicas propuestas al vacío y con gas de arrastre. La Figura 15 muestra el comportamiento de la película durante las pruebas al vacío (ver Figura 15A) y con gas de arrastre (ver Figura 15B).

Figura 15. Comportamiento de la película **A)** al vacío **B)** con gas de arrastre.



Los datos y resultados de las pruebas realizadas son detallados en las Tablas 4 y 5. Cada prueba duró alrededor de 30 min, el caudal obtenido corresponde al valor mínimo que garantizó una película uniforme en toda la superficie.

Tabla 4. Datos y resultados de las pruebas de evaporación al vacío.

	Concentración inicial [°Bx]	Temperatura tubos [°C]	Temperatura alimento [°C]	Presión [mbar]	Caudal [L/min]	Concentración final [°Bx]	Factor de concentración
1	20	330	70	200	0,300	25,0	1,25
2	20	330	60	100	0,300	24,5	1,23
3	40	320	70	200	0,230	49,0	1,23
4	40	200	70	200	0,153	48,0	1,20
5	40	200	60	100	0,148	50,0	1,25
6	40	320	60	100	0,224	51,0	1,28

Tabla 5. Datos y resultados de las pruebas de evaporación con gas de arrastre.

	Concentración inicial [°Bx]	Temperatura aire [°C]	Temperatura alimento [°C]	Velocidad aire [m/S]	Caudal [L/min]	Concentración final [°Bx]	Factor de concentración
1	20	80	80	5,4	0,20	20,7	1,04
2	20	120	80	5,4	0,17	21,0	1,05
3	20	140	80	5,4	0,16	21,2	1,06
4	40	120	80	5,4	0,41	41,0	1,03
5	40	120	80	3,4	0,26	41,2	1,03

Basados en los datos obtenidos en las pruebas con vacío, se puede observar que a mayor concentración inicial, los caudales de alimentación necesarios para garantizar la formación de la película, fueron menores. Además estos caudales fueron más bajos al disminuir la temperatura de operación. Esto puede deberse a que al aumentar la concentración o disminuir la temperatura, la viscosidad aumenta, lo que posiblemente genera una mejor adherencia del fluido sobre la pared.

También se observa, que en las pruebas realizadas con temperaturas de tubo a 320 °C no se obtuvo un aumento significativo de la concentración, comparadas con las pruebas a 200 °C, pero cabe resaltar que hubo un incremento importante en el caudal de operación. Por esta razón, si al aumentar la temperatura se requiere un incremento en el caudal, puede resultar desfavorable realizar este cambio, pues aumentará el consumo energético del proceso, sin mejoras notables en la concentración.

Para la técnica con vacío se realizó el cálculo de la energía necesaria para retirar un litro de agua del fluido, a partir del consumo en el precalentamiento y en el sistema de evaporación. En las pruebas, el precalentamiento tardó aproximadamente 3,6 min, con la resistencia de 4 KW trabajando a su máxima potencia. Las pruebas duraban alrededor de 30 min, y para las de 330 °C, en las que se recuperaban en promedio 2 L, las dos resistencias del tubo evaporador, de 1,6 KW cada una, también se encontraban a su máxima potencia. Teniendo en cuenta esto, se aproximó a partir de la siguiente expresión.

*Energía consumida = potencia * tiempo*

*Energía consumida precalentamiento = 4 KW * 3,6 min * (60 s/1 min) = 864 KJ*

*Energía consumida evaporación = 2 * 1,6 KW * 30 min * (60 s/1 min) = 5760 KJ*

Energía total consumida = 6624 KJ

Energía para retirar un litro de agua = 6624 KJ/2L = 3312 KJ/L = 3312 KJ/Kg

Este consumo de energía no resulta excesivo a pesar de tratarse de un piloto, pues un cálculo realizado por **Westergaard, (2004)** estimando tan solo una pérdida de calor del 2%, para un evaporador de película descendente operando a las mismas condiciones, sugiere un consumo de 2733 KJ/Kg, que corresponde al 83% del consumo requerido por el piloto.

Para la técnica de gas de arrastre, en general, se evidencian bajos factores de concentración, a pesar de trabajar con caudales similares a las pruebas al vacío. Esto se debe posiblemente a que el aire no entrega la suficiente energía al fluido debido al poco tiempo de residencia (tiempo inferior a 2 s).

Durante el desarrollo de las pruebas con ambas técnicas no se evidenció ensuciamiento sobre la superficie de calentamiento, por lo que podemos inferir que no hay una disminución en la transferencia de calor atribuida a este factor. Por otro lado, el no presenciar ensuciamiento facilita en gran manera el mantenimiento del piloto.

De manera general, se puede afirmar que el funcionamiento del piloto fue satisfactorio, ya que operó de acuerdo a lo establecido en los alcances de este trabajo, tanto en la parte del proceso como en su sistema de control, siempre manteniendo las variables a controlar en los valores asignados, brindándole seguridad al proceso y a las personas que lo operan.

3. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un piloto de evaporación de película descendente que permite trabajar las configuraciones de evaporación con vacío y con gas de arrastre. El piloto construido posee un sistema de distribución innovador y tiene la capacidad de trabajar con valores de temperatura de tubo hasta 350 °C, con presiones de vacío desde 100 mbar y temperaturas de aire hasta 150 °C. Además de esto, facilita la observación del fenómeno, es práctico y de fácil manejo, y no requiere un consumo energético elevado para operar. Estas características lo convierten en una herramienta muy útil para la formación académica y la investigación.

El piloto cuenta con un módulo de control que permite regular los valores de la temperatura del tubo evaporador y la temperatura del aire o presión de vacío (según la técnica). Adicionalmente, el sistema de control diseñado cuenta con sensores y elementos finales de control, que en su conjunto permitieron operar de manera estable, brindando seguridad y un correcto funcionamiento para las dos configuraciones.

Finalmente, la interfaz gráfica diseñada permite de una forma fácil e intuitiva, manipular el proceso. El uso de los protocolos de comunicación USB HID entre el módulo de control y el computador, facilita su integración con nuevos computadores y además con otros dispositivos como *tablets* y *smartphones*, retrasando con esto la obsolescencia del sistema de control y facilitando la sustitución de este elemento de operación. De igual forma el protocolo de comunicación UART proporciona una conexión eficiente entre el módulo de control y el tablero, resultando igualmente confiable este modo de operación.

4. RECOMENDACIONES

Se presentan algunos trabajos a considerar:

- Evaluar los alcances del piloto de evaporación utilizando otro tipo de fluidos presentes en la industria alimenticia como la leche o los jugos naturales.
- Realizar un análisis sobre los parámetros de los controladores en busca de los valores óptimos de ganancias, tiempos de integración y tiempos de derivación.
- Analizar los efectos que tiene la evaporación descendente sobre la calidad del fluido utilizando métodos de espectrofotometría y análisis de color.

BIBLIOGRAFIA

- AKPINAR E. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73 2006. Pág 75–84
- ALI ADIB T. ; HEYD B. ; VASSEUR J. *Experimental results and modeling of boiling heat transfer coefficients in falling film evaporator usable for evaporator design*. *Chemical Engineering and Processing Process Intensification* 2009.
- ALI ADIB T. ; VASSEUR J. *Bibliographic analysis of predicting heat transfer coefficients in boiling for applications in designing liquid food evaporators*. *Journal of food engineering*. 2007
- APV. *Evaporator Handbook*. Gettsville, New York. APV, SPX Corporation. 2008. Pág 22.
- ARNDT S.; SCHOLL S. *Evaporation of single component viscous liquids in a metal falling film evaporator*. *Heat Mass Transfer* Springer-Verlag 2011
- BADUI S. “Química de los alimentos”, 2da edición, Alhambra mexicana. 1990 pág. 483
- BERK Z. *Food process engineering and technology*. 1ra Edición. Elsevier, 2009. Cap 21

- BROOME S. *Liquid distribution and falling film wetting in dairy evaporators*. Tesis de maestría en ingeniería química. Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda. 2005
- CASTRO DUARTE, C.; CASTRO RUIZ, E. *Diseño e implementación de un prototipo portátil para la medición digital del consumo de energía eléctrica y visualización del coste equivalente*. Tesis de pregrado en ingeniería electrónica. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Universidad industrial de Santander 2012
- CHAO L ; WEIBIN M ; YULIE G. *Design of single vertical tube falling-film evaporation basing on experiment*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2010
- CHEN H.; JEBSON R. S. *Factors affecting heat transfer in falling film evaporators*. Food Technology Department, Massey University, Palmerston North, New Zealand 1997.
- CORZO O; BRACHO N.; ALVAREZ C. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. Journal of Food Engineering 87 2008. Pág 479–484
- FENNEMA O. “Química de los alimentos”, 2da edición, editorial acribia 2000, pág. 228
- GEANKOPLIS, C.E. “Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”, 3era. Edición, CECSA México 1998, cap. 8

- HUSEYIN P.; MUSTAFA O. *Experimental and theoretical investigations of falling film evaporation*. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
- JORGE L.M.M.; RIGHETTO A.R.; POLLI P.A.; SANTOS O.A.A.; MACIEL FILHO R. *Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system*. Journal of Food Engineering 2010
- LIU Z.; LIU F.; SHI Q.; SUN F. *Rheological and heat transfer characterizations of non-Newtonian fluid falling film in evaporation process*. J. Cent. South Univ. Technol. 2007
- McCABE, W.L.; Smith, J.C.; Harriot P. “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”, 4ta. Edición, McGraw-Hill, 1991, pág. 482 – 517
- MERA I.; CATAÑO J. *Obtención de glucosa a partir de almidón de yuca manihot sculenta*. 2005
- MORISON K. R.; WORTH Q. A. G.; O’DEA N. P. *Minimum wetting and distribution rates in falling film evaporators*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. Trans IChemE, Part C, December 2006
- NGUYEN M.; PRICE W. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. Journal of Food Engineering 79 2007. Pág 200–207
- PROST J. S., GONZALEZ M. T., URBICAIN M. J *Determination and correlation of heat transfer coefficients in a falling film evaporator*. Journal of Food Engineering 2006

- RODRIGUEZ S.; SANDOVAL J. *Obtención de jarabes de glucosa a partir del almidón de yuca: etapas de concentración y pre-concentración*. Tesis de pregrado en ingeniería química. Facultad de ingenierías físico químicas. Universidad industrial de Santander 2011.
- RUIZ M. *Obtención de jarabes de glucosa a partir de almidón de yuca por medio de hidrólisis enzimática, para ser usados como sustrato en la producción de bioetanol*. Tesis de pregrado en química. Facultad de ciencias Universidad Industrial de Santander 2009.
- SINGH R. P.; HELDMAN D. R. *“introduction to food engineering”* 4 edición Nueva York: Academic Press 2008. Pág. 241
- WEISE F.; SCHOLL S. *Evaporation of pure liquids with increased viscosity in a falling film evaporator*. Heat Mass Transfer 45:1037–1046 Springer-Verlag 2009
- WESTERGAARD V. Tecnología de la leche en polvo, evaporación y secado por atomización. Copenhagen, Niro A/S, GEA Group. 2004. Pág. 19
- XIANBIAO B.; WEIBIN M.; HUASHAN L. *Heat and mass transfer of ammonia-water in falling film evaporator*. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.