

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

## **DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

### **OPCION I.- TESIS**

#### **TRABAJO PROFESIONAL**

**“ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN  
CONDENSADOR HÍBRIDO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS  
GASTOS ENERGÉTICOS E HIDRÁULICOS EN UN PROCESO DE  
CRISTALIZACIÓN POR LOTES A VACÍO”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**I.Q. ALDO CERVANTES FLORES**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. EUSEBIO BOLAÑOS REYNOSO**

**ORIZABA, VER. MÉXICO**

**MARZO 2017**





"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA: 29/03/2017  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

**C. ALDO CERVANTES FLORES**  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
**CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACION DE UN CONDENSADOR HIBRIDO PARA LA OPTIMIZACION DE LOS GASTOS ENERGETICOS E HIDRAULICOS EN UN PROCESO DE CRISTALIZACION POR LOTES A VACIO".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

**C.A. TITULACIÓN**



A T E N T A M E N T E

M.C. MA.  ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO





"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA : 09/03/2017

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

ALDO CERVANTES FLORES

la cual lleva el título de:

"ANALISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACION DE UN CONDENSADOR HIBRIDO PARA LA OPTIMIZACION DE LOS GASTOS ENERGETICOS E HIDRAULICOS EN UN PROCESO DE CRISTALIZACION POR LOTES A VACIO".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. EUSEBIO BOLAÑOS REYNOSO

SECRETARIO : DR. GALO RAFAEL URREA GARCIA

VOCAL : DRA. GUADALUPE LUNA SOLANO

VOCAL SUP. : DRA. ROSALIA CERECERO ENRIQUEZ

FIRMA  
FIRMA  
FIRMA  
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

OPCION: I Tesis



*Dedicado a  
mi familia*

**A mis padres:**

Por ser mis maestros en la vida, sin duda las mejores lecciones las he aprendido de ustedes. Gracias por brindarme la confianza y sabiduría para alcanzar mis metas.

**A mis hermanos:**

Por ser mis compañeros en la vida, las horas que hemos sembrado al estar juntos empiezan a dar frutos. Gracias por estar siempre a mi lado y darme la motivación para seguir en el camino.

**A mis abuelos**

Por ser mis segundos padres y apoyarme en las decisiones que he tomado. Gracias por guiarme en mi camino y estar conmigo siempre que los he necesitado.

A mis compañeros: Bet, **Blu**, Javier, **Joc**, **Karen**, Glo, **Mayet**, Toño y Vero por ser parte de las lecciones de la vida, los buenos momentos siempre estarán presentes.

A mis compañeros: Adán, Adrián, El Brayan, Fortino, Kelvyn, Lorena, Magda, Mariana, Marleny, Saul y Zu. Por compartirme parte de su tiempo y conocimiento.

A: Aby, Jean, Marco y Orlando por darme una experiencia única, aprendí bastante de ustedes y agradezco el tiempo que compartimos.

## *Agradecimientos*

Al **Dr. Eusebio Bolaños Reynoso** por darme la oportunidad de pertenecer a su equipo de trabajo y por la dirección de este trabajo de investigación. También, por guiarme durante mi permanencia en la maestría, por la confianza y enseñanzas que me permitieron crecer como profesionalista.

Al **Dr. Galo Urrea García** por las revisiones y observaciones que hicieron posible mejorar el presente trabajo de investigación. También por ser parte en mi desarrollo profesional.

A la **Dra. Guadalupe Luna Solano** por las revisiones y observaciones que hicieron posible mejorar el presente trabajo de investigación. También por ser parte en mi desarrollo profesional.

A la **Dra. Rosalía Cerecero Enríquez** por las revisiones y observaciones que hicieron posible mejorar el presente trabajo de investigación. También por guiarme durante mi permanencia en la maestría, compartir sus anécdotas que lograron motivarme para ser una mejor persona, por ser parte en mi desarrollo profesional.

Al consejo nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante el programa de posgrado, con número de registro 663011.

## **RESUMEN**

### **Análisis de las condiciones de operación de un condensador híbrido para la optimización de los gastos energéticos e hidráulicos en un proceso de cristalización por lotes a vacío**

**Elaborada por: Ing. Aldo Cervantes Flores**  
**Dirigida por: Dr. Eusebio Bolaños Reynoso**

La cristalización es una operación de separación ampliamente usada en la industria para la producción de cristales con alta pureza con bajos costos de operación. En la industria azucarera la cristalización representa una de las etapas de mayor importancia donde las condiciones óptimas de operación para satisfacer los requerimientos de calidad del producto final son desconocidas. La cristalización por enfriamiento adiabático (a vacío), es la más importante para producciones a gran escala debido a que la evaporación ocurrirá rápidamente ocasionando un enfriamiento adiabático, sin embargo, los vapores generados en éste proceso deben condensarse y descargarse a condiciones reguladas por la NOM-001-SEMARNAT-1996. Los condensadores de contacto directo barométricos son los más usados para generar el vacío requerido y condensar vapores del proceso. El problema de éste tipo de condensador es que presenta un gran consumo de agua de enfriamiento. El objetivo de este trabajo fue analizar las condiciones de operación de un condensador híbrido para determinar el flujo de agua mínimo para la condensación de los vapores y lograr reducir el consumo energético e hidráulico en el proceso de cristalización por lotes a vacío. El equipo fue acoplado al proceso e instrumentado para la validación y control de las variables involucradas y analizar las variables que afectan la generación de vacío para definir las condiciones que permitan operar de manera adecuada el proceso de cristalización. De acuerdo a los resultados de la simulación, este sistema permitirá condensar vapores del proceso a 35 °C con un tiempo de estabilización de 200 s y un flujo de agua de enfriamiento de 0.5 Kg/min, la temperatura de los condensados se encuentra en los límites de la Norma Oficial Mexicana, con esto, se logran condiciones adecuadas para condensar vapores del proceso, minimizando el consumo energético e hidráulico de la operación del sistema de condensación híbrido. El diseño de experimentos, optimiza los parámetros de operación del sistema de condensación para maximizar la presión de vacío, a la vez que el consumo de agua en el sistema de condensación se minimiza. Además, el dispositivo presentado es viable para su registro como modelo de utilidad ante el IMPI.

## **ABSTRACT**

### **Analysis of the operating conditions of a hybrid condenser for the optimization of energy and hydraulic expenses in a vacuum batch crystallization process**

**By: Ing. Aldo Cervantes Flores**

**Advisor: Dr. Eusebio Bolaños Reynoso**

Crystallization is a separation operation widely used in the industry for the production of high purity crystals with low operating costs. In the sugar industry, crystallization represents one of the most important stages where the optimal operating conditions to meet the quality requirements of the final product are unknown. The crystallization by adiabatic (vacuum) cooling is the most important for large scale productions because evaporation will occur rapidly causing adiabatic cooling, however, the steam generated in this process must be condensed and discharged under conditions regulated by the NOM-001-SEMARNAT-1996. Barometric direct contact condensers are the most used to generate the required vacuum and to condense process steam. The problem of this type of condenser is that it has a high consumption of cooling water. The objective of this work was to analyze the operating conditions of a hybrid condenser to determine the minimum water flow for the condensation of the steam and to reduce the energy and hydraulic consumption in the vacuum batch crystallization process. The equipment was coupled to the process and instrumented for the validation and control of the variables involved and to analyze the variables that affect the vacuum generation to define the conditions that allow to operate properly the crystallization process. According to the results of the simulation, this system will condense the process steam at 35 ° C with a stabilization time of 200 s and a cooling water flow of 0.5 kg / min, the temperature of the condensates is within the limits by the Official Mexican Standard, with this, adequate conditions are obtained to condense steam process, minimizing the energy and hydraulic consumption for the operation of the hybrid condensation system. The experiment design provided the optimally operating parameters of the condensation system to maximize the vacuum pressure, while the water consumption in the condensation system is minimized. In addition, the presented device is viable for its registration as a utility at the IMPI.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	IV
<b>LISTA DE TABLAS</b>	VI
<b>NOMENCLATURA</b>	VII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>OBJETIVOS</b>	2
<b>CAPITULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	
1.1 Antecedentes científicos	5
1.2 La industria azucarera en México	8
1.3 Cristalización	9
1.3.1 Cinéticas de cristalización	10
1.3.2 Solubilidad de equilibrio	11
1.4 Cristalizadores	12
1.4.2 Cristalización por lotes	12
1.4.2.1 Cristalización por lotes con enfriamiento	13
1.4.2.2 Cristalización por lotes a vacío	13
1.5 Parámetros que influyen en el proceso de cristalización del azúcar de caña.	14
1.6 Condensadores	15
1.6.1 Condensadores de superficie	16
1.6.2 Condensadores de contacto directo	16
1.6.2.1 Condensadores barométricos	18
1.7 Equipo de vacío	19
1.8 Sistemas híbridos	21

1.9	Sistemas de control SCADA	22
1.9.1	Instrumentación virtual	24
1.9.2	Labview	25
1.10	Optimización	26
1.10.1	Diseño de experimentos	27
1.10.2	Metodología de superficie de respuesta	27
1.11	Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI)	29
1.11.1	Patentes	29
1.11.2	Modelos de utilidad	30

## **CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS**

2.1	Materiales	32
2.1.1	Condensador de contacto directo	32
2.1.2	Bomba de vacío de anillo líquido	33
2.1.3	Cristalizador por lotes a vacío	33
2.2	Procedimientos	37
2.2.1	Evaluación del sistema de condensación híbrido	37
2.2.2	Flujo de vapor generado en el cristalizador por lotes a vacío	38
2.2.2.1	Balance másico del líquido dentro de cristalizador	38
2.2.2.2	Balance energético del líquido dentro del cristalizador	39
2.2.3	Modelo matemático del condensador híbrido	40
2.2.3.1	Balance másico del condensador	41
2.2.3.1	Balance energético del condensador	42
2.2.4	Agua de enfriamiento necesaria para la condensación	45
2.2.5	Validación experimental del modelo matemático	46
2.2.6	Caracterización de la respuesta del proceso	47
2.2.7	Optimización mediante el método de superficie de respuesta	48
2.2.8	Elaboración del manual técnico del condensador híbrido	49

<b>CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
3.1 Operación del sistema de condensación híbrido	53
3.1.1 Reingeniería del condensador por contacto directo	53
3.1.2 Bomba de vacío de anillo líquido	55
3.1.3 Alimentación de agua de enfriamiento	55
3.1.4 Suministro de agua a la bomba de vacío de anillo líquido	55
3.1.5 Control del almacenamiento de agua	56
3.1.6 Reingeniería de las tuberías del proceso de cristalización	57
3.1.7 Pruebas de hermeticidad	58
3.1.8 Calibración del transductor de presión	58
3.2 Balances de materia y energía	60
3.2.1 Balance para la fase líquida dentro del cristizador	60
3.2.2 Modelo matemático del condensador	61
3.2.3 Evaluación experimental del modelo matemático	62
3.2.4 Sintonización de un controlador tipo feedback	63
3.3 Evaluación del condensador híbrido	69
3.3.1 Diseño central compuesto	69
3.3.2 Análisis de los resultados experimentales	70
3.3.3 Optimización por superficie de respuesta	73
3.3.4 Análisis canónico	74
3.4 Modelo de utilidad	75
<b>CONCLUSIONES</b>	78
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	81
<b>APENDICE A</b>	87
<b>APENDICE B</b>	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Pág.
1.1	Zonas de sobresaturación a diferentes temperaturas y concentraciones (Burns, 2000)	11
1.2	Cristalizador al vacío: A, cuerpo del cristalizador; B, salida del vapor; C, tubería de descarga; D, bomba del producto; E, agitadores; F, mirillas; G, condensador (Badger y Banchemo, 1986)	14
1.3	Configuración de un condensador barométrico (McCabe <i>et al</i> , 2007)	17
1.4	Ejemplo de condensadores barométricos	19
1.5	Sistema de vacío en un proceso de evaporación (Hugot y Jenkins, 1986)	20
1.6	Sistema híbrido integrado por una bomba de anillo líquido acoplada a un sistema de condensación de tubo y coraza (Wetzel, 1996)	21
1.7	Sistema de adquisición de datos basado en una computadora personal	24
1.8	Representación gráfica de superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado $\eta$ (Montgomery, 2012)	28
2.1	Estructura del cuerpo del condensador	32
2.2	Bomba de vacío de anillo líquido marca Vaccutech	33
2.3	Diagrama del cristalizador por lotes a vacío escala planta piloto	34
2.4	Diagrama del condensador por contacto directo	41
2.5	Curva de respuesta a lazo abierto	47
2.6	Representación del diseño central compuesto	48
3.1	Configuración del condensador por contacto directo	54
3.2	Configuración de electroniveles a los tanques de almacenamiento de agua	56
3.3	Diagrama del proceso de cristalización por lotes a vacío	57
3.4	Modelo lineal de la presión de vacío proporcionada por el	

	transductor	58
3.5	Programación del modelo lineal del transductor de vacío en LabVIEW	59
3.6	Comportamiento dinámico del volumen de agua evaporada	60
3.7	Respuesta dinámica de la temperatura de los condensados	61
3.8	Evaluación experimental del modelo matemático	62
3.9	Curva de reacción del sistema de condensación híbrido	63
3.10	Comportamiento de la función de transferencia del condensador híbrido	64
3.11	Efecto de los controladores P, PI y PID sobre el sistema (regulador)	65
3.12	Comportamiento de la señal del control PID ante una perturbación del flujo de vapor	66
3.13	Efecto del compensador de respuesta inversa al sistema regulador	67
3.14	Efecto de los controladores: P, PI y PID sobre el sistema (servo)	67
3.15	Diagrama de bloques con compensador de respuesta inversa	68
3.16	Efecto del compensador de respuesta inversa sobre el sistema controlado	69
3.17	Efectos de los factores sobre la presión de vacío: a) válvula a la bomba de vacío, b) válvula al condensador y c) interacción de ambas válvulas	72
3.18	Gráfica de superficie de respuesta para el diseño central compuesto	73
3.19	Gráfico de contornos de datos experimentales de diseño central compuesto	74

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Dispositivos e instrumentación del cristizador por lotes a vacío	35
2.2	Elevación máxima de temperatura en agua de enfriamiento (Ryans y Roper, 1986)	46
2.3	Estado de la técnica del condensador híbrido	50
3.1	Características geométricas del condensador por contacto directo	54
3.2	Parámetros obtenidos de la sintonización por Ziegler & Nichols	65
3.3	Datos experimentales del diseño central compuesto	70
3.4	Análisis de varianza de los datos experimentales	71
3.5	Comparación de medias por el método de Tukey-Kramer	71

## NOMENCLATURA

<b>Letras latinas mayúsculas</b>		<b>Unidades</b>
A	Área de transferencia de calor	$m^2$
DTC	Distribución de tamaño de cristal	-----
H	Entalpía	KJ/Kg
HMI	Human Machine Interface	-----
IMAQ	Image acquisition (adquisición de imágenes)	-----
IMPI	Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial	-----
F	Flujo volumétrico	$m^3/min$
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Laboratorio de instrumentación virtual para el diseño de panel de trabajo)	-----
LPI	Ley de la Propiedad Industrial	-----
LRVP	Liquid Ring Vacuum Pump (Bomba de Vacío de Anillo Líquido)	-----
MCF	Masa de cristal formada	g
MSR	Método de superficie de respuesta	-----
NIC	National Instruments Corporation	-----
NOM	Norma Oficial Mexicana	-----
NPT	Normal Pressure and Temperature. (Medidas estándar de presión y temperatura)	-----
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Adquisición de datos y control supervisorio)	-----
T	Temperatura	$^{\circ}C$
U	Coeficiente global de transferencia de calor	$cal/cm^2^{\circ}Cmin$
V	Volumen	$cm^3$
VCA	Voltaje de corriente alterna	volts
SAGARPA	Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación	-----

W	Flujo de agua de enfriamiento	cm <sup>3</sup> /min
---	-------------------------------	----------------------

### Letras latinas minúsculas

bval	Bomba de vacío de anillo líquido	-----
Cp	Capacidad calorífica	cal/gr °C
hfg	Entalpía de vaporización	cal/gr
mA	Miliamperios	mA
t	Tiempo	s, min

### SIMBOLO

T <sub>agi</sub>	Temperatura del agua de alimentación	°C
T <sub>ago</sub>	Temperatura de flujo de salida del condensador	°C
T <sub>max</sub>	Temperatura máxima	°C
Cp	Capacidad calorífica	cal/gr °C
inHg	Pulgadas de mercurio	inHg

### Letras griegas

η	Superficie de respuesta	-----
ρ	Densidad	gr/cm <sup>3</sup>
Δ	Incremento	-----

### Subíndices

ag	Agua	-----
age	Agua de entrada	-----
ags	Agua de salida	-----
amb	Ambiente	-----
v	Vapor	-----

## INTRODUCCIÓN

El azúcar de caña es uno de los productos de consumo básico, en los últimos años ha tenido gran diversidad de aplicaciones, por lo que la demanda ha crecido en un 25 % durante los últimos 5 años (SAGARPA, 2015), la producción se realiza en los ingenios a partir de los jugos de la caña de azúcar.

La cristalización por evaporación y enfriamiento a vacío, son las más importantes y ampliamente usadas para producciones a gran escala (Berckmann, 2013). La combinación evaporación-enfriamiento produce la sobresaturación necesaria para el proceso de cristalización. Por otra parte, los vapores provenientes del proceso, salen a presiones inferiores a la atmosférica por lo que deben condensarse y descargarse como líquido a condiciones normales de presión y temperatura, esto se logra al condensar los vapores usando agua de enfriamiento. Industrialmente, los condensadores de contacto directo barométricos son la mejor alternativa para generar el vacío requerido y condensar los vapores del proceso. Sin embargo, éste tipo de condensador aún demanda un gran consumo de agua de enfriamiento.

Por lo anterior, el Instituto Tecnológico de Orizaba en la Sección de Plantas Piloto de la DEPI, se suma a la investigación del proceso de cristalización de azúcar de caña dando soluciones a problemáticas existentes en esta industria, ante esto, en este proyecto se analizan e implementan condiciones óptimas de operación en un condensador híbrido (Condensador de contacto directo con una bomba de vacío de anillo líquido) para reducir el consumo energético e hidráulico acoplado al proceso de cristalización por lotes al vacío; lo que genera contar con un proceso que opera eficientemente, incrementa el rendimiento global y reduzca el impacto ambiental al tener un ahorro significativo en el uso de agua.

## **OBJETIVO GENERAL**

Analizar las condiciones de operación de un condensador híbrido para la optimización de los gastos energéticos e hidráulicos, manteniendo los requerimientos de presión en un proceso de cristalización por lotes a vacío.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar experimentalmente las condiciones de operación del sistema de condensación híbrido acoplado al proceso de cristalización por lotes a vacío.
- Realizar los balances de materia y energía para establecer los parámetros de operación del condensador híbrido y reducir los gastos energéticos e hidráulicos en el sistema de condensación del cristizador por lotes a vacío.
- Optimizar mediante el método de superficie de respuesta las variables del proceso que permitan obtener las condiciones de operación del condensador híbrido, evaluando el impacto en la presión de vacío.
- Elaborar el manual técnico del condensador híbrido, así como los diagramas técnicos (paquete tecnológico), para su viable registro como modelo de utilidad ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).

## **JUSTIFICACIÓN**

La agroindustria cañera es de suma importancia para la economía mexicana, entre 2011 y 2015, la superficie de caña de azúcar cosechada ha crecido a TCAC (Tasa de Crecimiento Anual Compuesto) del 3.9% que abastecen a todos los ingenios

azucareros; a pesar de la crisis de los últimos años en el país. La caña de azúcar ha sido una fuente importante de empleo directo e indirecto, en las diferentes regiones cañeras del país. Sin embargo, los ingenios azucareros tienen un gran problema de consumo de agua por el uso desmedido de este servicio en los sistemas de condensación y generación de vacío, además de un rezago en diversos factores tecnológicos que mejoren la calidad del producto y optimicen los gastos energéticos e hidráulicos para hacer que este sector sea más rentable. El agua de uso industrial proviene de abastecimientos naturales originando que la mayoría de los cuerpos de agua sean sobreexplotados y agotados, por lo que es necesario implementar sistemas tecnológicos innovadores, que permitan un mejor control del proceso de cristalización en la condensación. Estos gastos pueden reducirse con el uso eficiente al incorporar nuevas tecnologías en la adquisición y generación de señales, optimizando el control del flujo de agua de enfriamiento. Estudios realizados sobre gastos hídricos en condensadores durante el proceso de cristalización y evaporación, reportan gastos de agua de enfriamiento superiores a 2,500 m<sup>3</sup>/h, y que repercute en elevados costos por derecho al consumo de agua. Por lo anterior, se propone analizar las condiciones de operación a un sistema de condensación híbrido (nivel planta piloto) para la optimización de los gastos energéticos e hidráulicos y que además proporcione las condiciones de vacío necesarias para su posible implementación en el proceso de cristalización por lotes a nivel industrial.

## **ALCANCE DEL PROYECTO**

Este desarrollo experimental, propone por medio de balances de materia y energía determinar las condiciones de operación (flujo de agua de enfriamiento, presión de vacío y temperatura de condensados), de un condensador híbrido para minimizar gastos energéticos e hidráulicos en un proceso de cristalización por lotes a vacío, además se propone un paquete tecnológico del condensador híbrido para su registro como modelo de utilidad ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).

**CAPITULO 1**  
**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## 1.1 ANTECEDENTES CIENTÍFICOS

Ingaramo *et al.*, (2004). Reportaron que los sistemas de condensados en la industria azucarera son uno de los circuitos en los que se debe hacer mayor referencia en cuanto al uso eficiente de agua en los ingenios y sus interrelaciones, proponiendo mejoras que favorezcan el uso del agua, lo cual es un beneficio principalmente para los ingenios que se encuentran ubicados en zonas donde este recurso es limitado.

Martins (2005). Realizó un estudio a nivel planta piloto y desarrollaron nuevos métodos de supervisión para estimar las variables de importancia en el proceso de cristalización industrial. Aplicaron métodos matemáticos basados en balances de masa para determinar la evolución de los parámetros relacionados al tamaño, masa del cristal y pureza del licor. También calcularon el tamaño promedio del cristal por análisis de imágenes.

Xaca (2006). Desarrolló instrumentos virtuales para la adquisición de datos en un cristizador batch operado a vacío e implemento perfiles de regulación de vacío con un punto de ajuste dinámico, con el objetivo de controlar la presión en el sistema y disminuir el contenido de sacarosa en las mieles finales.

Carrillo (2006). Desarrolló perfiles dinámicos de regulación de vacío para el control de la sobresaturación con la finalidad de obtener un producto de alta calidad con una distribución de tamaño de cristal específica, reporta que la presión de vacío tiene un efecto significativo en la sobresaturación y por lo tanto en la DTC.

Martínez (2006). Estudió el comportamiento del flujo de vapor en un cristizador por lotes a vacío, evaluando las variables de distribución de tamaño de cristal, desviación estándar y masa de cristal formado. Reporta que una presión de vapor de 0.15 Kg/cm<sup>2</sup> para una solución de azúcar saturada, produce un flujo promedio de evaporados de 13.1619 ml/min.

Tapia (2006). Reportó que el uso de agua en los ingenios azucareros depende principalmente de la calidad y temperatura de la misma, gran volumen del consumo total del agua que requiere un ingenio es para el agua de enfriamiento que se destina a los condensadores barométricos.

Kapooria *et al.*, (2008). Analizaron el uso de un condensador de vapor híbrido con una mayor relación del área de superficie y el diámetro del tubo de agua de enfriamiento. Mencionan que el empleo de un condensador de vapor híbrido permite una mayor eficiencia de la planta de energía de vapor por el aumento de la presión de vacío dentro del condensador.

López *et al.*, (2008). Realizaron un estudio sobre el efecto de la presión de vacío y la presión de vapor sobre la masa de cristales formados y la distribución de tamaño del cristal en el proceso de cristalización por lotes, implementando un perfil de desplazamiento máximo de la bomba de vacío y diferentes presiones de vapor en la chaqueta de calentamiento-enfriamiento. Concluyeron que la implementación de este perfil de vacío y la reducción de la presión de vapor en combinación con el tiempo de calentamiento, mejoran notablemente el proceso de cristalización incrementando el rendimiento y reduciendo el consumo de vapor.

Bolaños *et al.*, (2008). Analizaron los efectos de la presión de vacío en un cristizador por lotes usando adquisición de datos e imágenes, instrumentos virtuales y control supervisor. De esta manera, los perfiles dinámicos de regulación de vacío originaron un efecto de enfriamiento brusco por evaporación adiabática en el interior del cristizador, beneficiando el crecimiento de cristales de azúcar de caña, además esta estrategia reduce el tiempo y consumo de energía en el proceso.

Genic *et al.*, (2008). Realizaron experimentalmente la condensación en contacto directo de vapor con agua en una columna de tipo cascada con bandejas deflectoras, esto con el fin de obtener el contacto entre el agua y el vapor en una columna de

diámetro nominal 300 a presión atmosférica. Encontraron que la prueba de Chernobilski muestra una pobre correlación en comparación a los datos experimentales, de tal manera encontraron una nueva forma de la correlación para determinar la velocidad de transferencia de calor recomendada para cálculos de este tipo de equipos.

Alvarado (2009). Realizó la optimización del sistema presión de vacío - presión de vapor del proceso de cristalización, resaltando la importancia al efecto que tiene la presión de vacío en el proceso de cristalización por lotes, logrando obtener rutas óptimas para maximizar la masa de cristal formado (MCF) y la DTC.

Jeong *et al.*, (2010). Desarrollaron un modelo analítico para predecir el calor transferido de la tubería de gas al agua de enfriamiento y la velocidad de condensación del vapor de agua en la tubería de gas. La validación de modelo se realizó en un intercambiador de calor escala planta piloto. Los resultados obtenidos con el modelo tienen una buena aproximación con los datos experimentales. El desempeño del intercambiador de calor fue evaluado en función de la relación de la velocidad de flujo másico del agua de enfriamiento a la velocidad del flujo másico del gas de entrada, la temperatura del agua de enfriamiento a la entrada y la relación de la velocidad de flujo másico del gas en la superficie de transferencia de calor.

Riha y Jackmann (2011). Analizaron las ventajas de implementar condensadores de aire enfriado en plantas de refrigeración de  $\text{NH}_3$  como una alternativa a los condensadores evaporativos. También presentan un análisis de costos de operación y costos energéticos. Concluyen que los condensadores de aire enfriado son una alternativa a los condensadores evaporativos debido que ofrecen una ventaja económica en cuanto a costos de operación además presentan un diseño simple y menor costo de mantenimiento.

Domínguez *et al.*, (2014). Realizaron un análisis sobre las condiciones en que se

encuentran la mayoría de las industrias azucareras en México y proponen una metodología para la prevención de la contaminación ambiental, medidas de prevención, minimización y control de la contaminación del agua. Proponen el uso eficiente y reciclado del agua empleada en los condensados de vapor en la operación de evaporación y cristalización de los ingenios azucareros.

Jacimovic *et al.*, (2015). Validaron un procedimiento para el dimensionamiento de condensadores de contacto directo. El procedimiento propuesto se basa totalmente en el modelo teórico que siempre debe cumplirse la condensación completa. Este hecho hace que sea muy útil en la verificación de los resultados experimentales para condensadores de contacto sin ningún flujo de salida de vapor.

Mahood *et al.*, (2015). Investigaron experimentalmente la eficiencia de transmisión de calor y el costo de un intercambiador de calor de contacto directo trifásico (usado como evaporador y condensador) usando dos flujos inmiscibles, determinaron que el costo estimado del intercambiador de contacto directo es menor en los condensadores de superficie (tubo y coraza) por 30 veces. También concluyen que la eficiencia es afectada significativamente por la velocidad de flujo de la fase dispersa (vapor o burbujas).

Perea (2015). Analizó las ventajas de modificar los sistemas de condensación como una alternativa para reducir los gastos energéticos e hídricos, también estudió los condensadores híbridos con cámaras adiabáticas y ventilación de aire debido al bajo consumo de agua en comparación con otros sistemas de condensación.

## **1.2 LA INDUSTRIA AZUCARERA EN MÉXICO**

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una gramínea tropical en cuyo tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar. La agroindustria azucarera genera gran cantidad de empleos, participando directamente en la economía nacional. Suministra el 70% de

la demanda internacional de azúcar, en tanto que el resto, se obtiene de la remolacha. México es el sexto productor y exportador de azúcar a nivel internacional. De los 51 ingenios activos en México (2015), sólo 18 se localizan en el estado de Veracruz y representan el 37% de la producción a nivel nacional (SAGARPA, 2015).

En términos generales, el nivel de productividad de la industria azucarera en México es alto, los rendimientos en campo y en fábrica están por arriba del promedio mundial, no obstante, los costos de producción son superiores a los considerados como eficientes; Actualmente los ingenios presentan deficiencias en infraestructuras, maquinaria y equipo en la producción de azúcar debido al bajo nivel de desarrollo científico y tecnológico que aporte soluciones a los problemas presentados en este sector.

### **1.3 CRISTALIZACIÓN**

La cristalización, es una operación unitaria donde uno de los componentes de una solución sobresaturada es transferido a una fase sólida en forma de cristales que precipitan, a partir de la separación sólido-líquido de químicos orgánicos e inorgánicos para su purificación (Velázquez, 2010). A nivel industrial, la cristalización es económicamente importante dado que la producción mundial de productos cristalizados es considerable en diversos sectores, tales como, la industria azucarera, de fertilizantes, farmacéutica, alimenticia, entre otros, usada principalmente para la producción, purificación y recuperación de sólidos (Nagy y Braatz, 2012).

Los problemas de la operación de cristalización que se enfrentan frecuentemente son:

- Rendimiento del producto.
- Pureza del producto.

- Energía necesaria para enfriamiento, evaporación, etc.
- Forma de los cristales.
- Tamaño de los cristales.
- Uniformidad o distribución del tamaño de cristal.
- Velocidad de cristalización.

### 1.3.1 CINÉTICAS DE CRISTALIZACIÓN

La velocidad de cristalización es sin duda un factor de gran importancia en la operación. La cristalización comprende dos procesos distintos: la formación de núcleos o centros de cristalización (nucleación) y en segundo lugar, la precipitación de sustancia sobre los núcleos ya formados (crecimiento). Estos parámetros influyen directamente en la DTC. El tamaño del cristal y la forma son propiedades comunes relacionadas con el proceso de nucleación y crecimiento. La pureza, dureza y resistencia a la abrasión del cristal son otros parámetros que determinan frecuentemente las características de un cristal en particular.

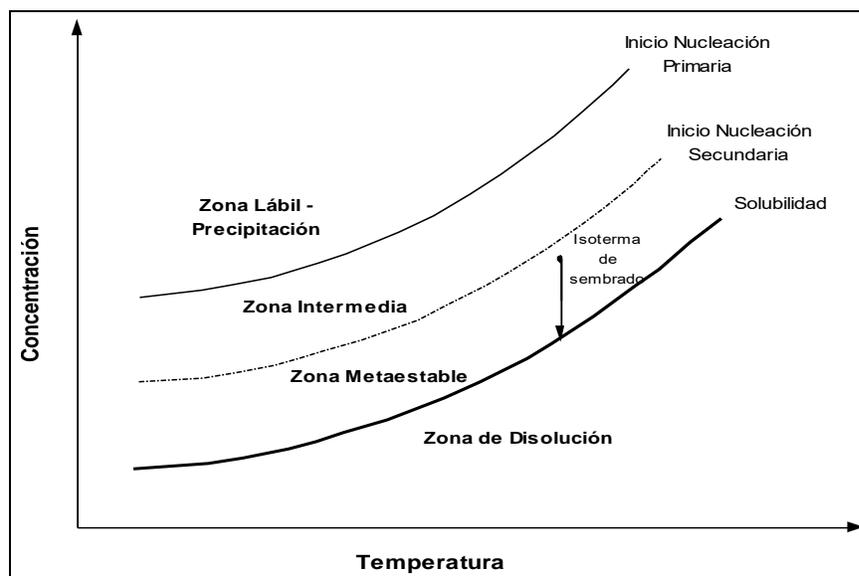
Para que un sólido disuelto se deposite sobre un cristal tiene que existir un cierto grado de desequilibrio con una fuerza motriz o potencial químico entre la disolución y la capa de tránsito de la superficie cristalina. Es decir, para que tenga lugar el crecimiento cristalino, la disolución ha de estar sobresaturada (Tung *et al.*, 2009).

Con objeto de regular el número de cristales sobre los que se deposita una determinada cantidad de soluto, se suelen añadir a la disolución, pequeños cristales llamados *semilla*. La operación de cristalización se lleva a cabo de tal modo que la disolución se mantenga sobresaturada con respecto a los núcleos introducidos, pero no sobresaturada con respecto a los minúsculos agregados elementales que, inevitablemente, se han de producir en las condiciones de trabajo.

### 1.3.2 SOLUBILIDAD DE EQUILIBRIO

El equilibrio en la cristalización se alcanza cuando la solución o licor madre está saturado. Esto se representa mediante una curva de solubilidad. La solubilidad depende principalmente de la temperatura, mientras que la presión tiene un efecto despreciable sobre ella. Los datos se expresan en forma de curvas en las que se grafica la solubilidad en función de la temperatura.

En la Figura 1.1 se muestran las diferentes zonas de sobresaturación. La zona inestable o lábil corresponde a la zona donde ocurre la nucleación espontánea homogénea o heterogénea de una fase sólida. La zona metaestable es donde la nucleación homogénea y heterogénea no ocurrirá inmediatamente pero sí el crecimiento de cristales y la zona insaturada (zona de disolución) corresponde a la región en donde no hay formación ni crecimiento de cristales.



**Figura 1.1** Zonas de sobresaturación a diferentes temperaturas y concentraciones (Burns, 2000)

## 1.4 CRISTALIZADORES

Durante muchos años, la práctica para la producción de cristales fue preparar en soluciones calientes casi saturadas y llevar estas soluciones a depósitos en los cuales la solución se enfriaba y la cristalización ocurría. En estas condiciones los cristales crecen muy lentamente y de gran tamaño lo que ocasionaba la aglomeración.

La cristalización no puede ocurrir sin una sobresaturación. Una de las principales funciones de cualquier cristizador es la de causar la formación de una solución sobresaturada. Los equipos de cristalización pueden clasificarse con base en el método empleado para producir la sobresaturación como sigue:

- Sobresaturación producida por enfriamiento de la solución con evaporación despreciable (cristalizadores de tanque y por lotes).
- Sobresaturación producida por evaporación del disolvente con poco enfriamiento o sin enfriamiento.
- Sobresaturación por combinación de enfriamiento y evaporación en cristalizadores adiabáticos (Geankoplis, 2006).

La cristalización se puede efectuar en procesos continuos y por lotes (batch). Los procesos por lotes conducen a la producción de cantidades finitas de producto a partir de una cantidad de materiales de entrada.

### 1.4.2 CRISTALIZACIÓN POR LOTES

Los cristalizadores por lotes son ampliamente usados en la industria química para la manufactura de un gran número de productos químicos de alto valor. En cuanto a su operación, son simples y flexibles además de que requieren menor inversión de capital.

Los cristalizadores por lotes son utilizados preferentemente si la tasa de producción es baja o si el equipo debe ser utilizado en la obtención de productos de naturaleza diferente (Srinivasakannan *et al.*, 2002). Estos recipientes se encuentran a presión atmosférica, presurizados o a vacío, y pueden o no tener agitación, según las necesidades del producto final y el procedimiento empleado para su obtención.

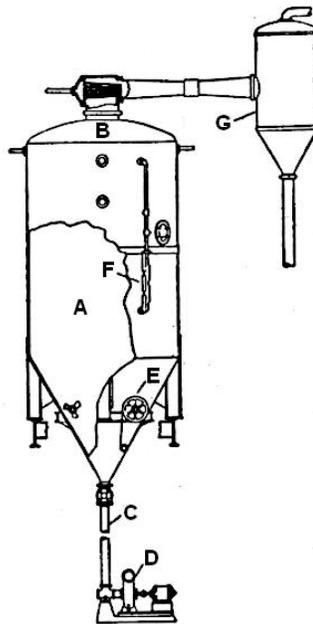
Los sistemas batch tienen ventajas potenciales en la determinación de las cinéticas de cristalización y en la cuantificación de propiedades fisicoquímicas de las sustancias. Esta operación ofrece flexibilidad y procesamiento simple en plantas con continuos cambios en sus líneas de producción.

#### **1.4.2.1 CRISTALIZACIÓN POR LOTES CON ENFRIAMIENTO**

En cristalizadores con enfriamiento, la sobresaturación es generada debido a la reducción en la solubilidad con la temperatura, la capacidad de solvente del sistema permanece aproximadamente constante. De los tipos de cristalizadores por lotes, la cristalización por enfriamiento es una de los modos más comunes usados en la industria. Las trayectorias de enfriamiento son un punto importante a controlar en la cristalización, manteniéndose en la región metaestable, con esto, cristales de gran tamaño pueden ser producidos (Choong, 2004).

#### **1.4.2.2 CRISTALIZACIÓN POR LOTES A VACÍO**

En los cristalizadores por lotes a vacío la cristalización ocurre por sobresaturación, sometiendo una solución caliente a un depósito en el que existe vacío para reducir el punto de ebullición, puesto que a temperaturas bajas de operación se reduce la probabilidad de degradación térmica. La solución se evaporará rápidamente y se enfriará como resultado de la evaporación adiabática (Figura 1.2).



**Figura 1.2** Cristalizador al vacío: A, cuerpo del cristalizador; B, salida del vapor; C, tubería de descarga; D, bomba del producto; E, agitadores; F, mirillas; G, condensador (Badger y Banchero, 1986)

En los cristalizadores a vacío la temperatura es controlada por el control de la presión. Esta combinación de evaporación y enfriamiento produce la sobresaturación deseada dando lugar a la nucleación y el crecimiento de los cristales (McCabe *et al.*, 2007). No sólo el enfriamiento resultante origina la cristalización, sino que la evaporación que se produce aumenta el rendimiento del proceso.

Un cristalizador de este tipo se mantiene al vacío por medio de un condensador en combinación de una bomba de vacío tipo eyector de vapor. El rendimiento teórico de cristales es proporcional a la diferencia entre la concentración de la alimentación y la solubilidad del soluto a la temperatura de equilibrio.

### 1.5 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN DEL AZÚCAR DE CAÑA.

Algunos de los parámetros que tienen mayor influencia en el proceso de cristalización son: la temperatura, presión y la agitación del sistema.

La temperatura afecta la solubilidad de la mayoría de las sustancias debido a que la solubilidad es fuertemente dependiente de la temperatura. Se debe tener un control adecuado sobre este parámetro, pues es decisivo para lograr una distribución de tamaño de cristal uniforme. Si se produce una evaporación o enfriamiento excesivos, no se obtendrá el tamaño y pureza de cristal deseados debido a choques térmicos que modificarán la forma de los cristales.

La presión en la operación de la cristalización hace referencia al uso de dos sistemas, la presión de vacío y la presión de vapor. El buen manejo de ambas presiones dará una DTC y masa de cristal formado (MCF) deseada, debido a que influyen en el proceso de vaporización por la relación que tiene con la temperatura de la solución, el adecuado control de las presiones permitirá que la solución tenga un adecuado seguimiento de la temperatura influyendo con esto en el agotamiento de la solución.

La agitación ayuda a mejorar la velocidad de crecimiento debido a que existe una mejor homogeneidad en el sistema mejorando la transferencia de soluto a las capas del cristal, previene la segregación de la disolución sobresaturada, la cual da lugar a una nucleación excesiva manteniendo los cristales en suspensión en la zona de cristalización (Genck, 2000). Aunque la nucleación secundaria y la velocidad de crecimiento son afectadas por la velocidad de agitación, su contribución es pequeña comparada con la nucleación primaria (Kim *et al.*, 2002).

## **1.6 CONDENSADORES**

Los vapores resultantes del proceso de producción de azúcar en los tachos y evaporadores de múltiple efecto salen al vacío, por lo que se requiere del uso de condensadores que permitan descargar dichos vapores en estado líquido y a presión atmosférica. Las corrientes de vapor pueden tener presencia de gases no condensables incorporados en la corriente de alimentación o al inicio del lote. Si el

vapor que se condensa está por debajo de la presión atmosférica, el líquido condensado puede extraerse por medio de una bomba y los gases no condensables por medio de una bomba de vacío.

El condensador puede ser de superficie, donde el vapor por condensar y el líquido de enfriamiento están separados por una pared metálica, o de contacto directo, donde el vapor y el líquido de enfriamiento se mezclan directamente.

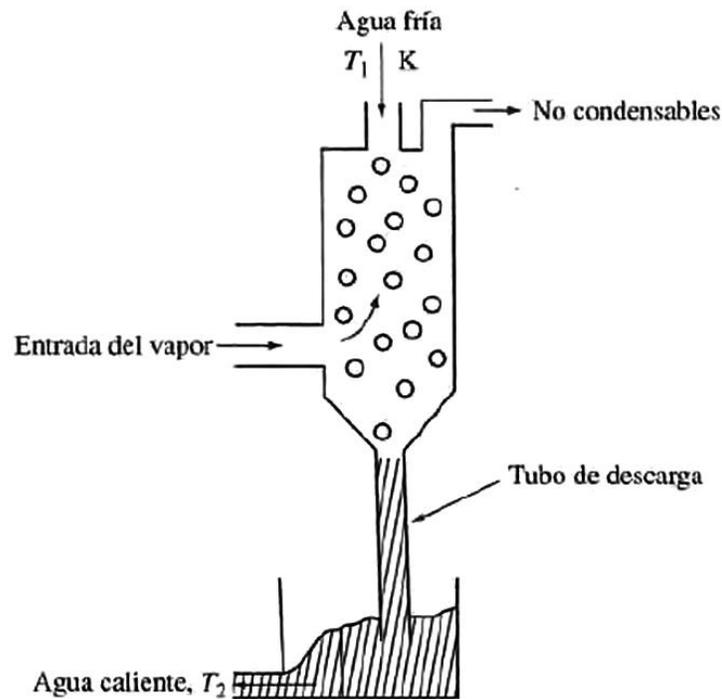
### **1.6.1 CONDENSADORES DE SUPERFICIE**

En un condensador de superficie el vapor circula por el interior de los tubos, mientras que el agua de enfriamiento lo hace por el exterior. Si el vapor producido es de algún disolvente distinto al agua, por consideraciones prácticas los condensadores de contacto no son efectivos y únicamente pueden utilizarse condensadores de superficie, por otra parte, si los vapores a condensar son de agua, el condensador de contacto es el único tipo prácticamente usado, puesto que el condensador de superficie es más caro de instalar.

El condensador de superficie presenta serias limitaciones en sistemas grandes. El número de tubos ocasiona que la velocidad a través de los tubos resulte demasiado pequeña para obtener un adecuado coeficiente de transferencia de calor, de forma que la unidad tiene que ser muy grande y, por lo tanto, antieconómica (McCabe *et al.*, 2007).

### **1.6.2 CONDENSADORES DE CONTACTO DIRECTO**

En los condensadores de contacto directo, el agua de enfriamiento se pone en contacto con los vapores provenientes del proceso sin alguna pared divisoria como se observa en la Figura 1.3, en este tipo de condensadores se alcanzan altas velocidades de transferencia de calor.



**Figura 1.3** Configuración de un condensador barométrico (McCabe *et al.*, 2007)

Los condensadores de contacto directo pueden considerarse siempre que la corriente del proceso y el líquido de refrigeración sean compatibles. No existe un método de diseño general para condensadores de contacto directo. La mayoría de las aplicaciones involucran la transferencia de calor sensible, así como calor latente, y este proceso es uno de transferencia de masa y energía simultáneamente (Serth y Lestina, 2014).

El consumo de agua se estima por medio de un balance de calor del condensador barométrico. Si el flujo de vapor al condensador es  $F_v$  (kg/h) a temperatura  $T_v$  (°K) y el flujo de agua es  $F_{age}$  (kg/h) con una temperatura de entrada de  $T_{age}$  (°K) y una temperatura de salida de  $T_{ags}$  (°K), el balance es el siguiente:

$$F_v h_{fg} + F_{age} Cp(T_{age} - 273.15) = (F_v + F_{age}) Cp(T_{ags} - 273.15) \quad (1.1)$$

donde  $h_{fg}$  es la entalpía de vaporización obtenida de las tablas de vapor a  $T_v$  ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Los condensadores de contacto directo son empleados ampliamente en la industria azucarera, y pueden clasificarse desde varios aspectos a considerar (Hugot, 1986):

Desde el punto de vista del método de extracción de aire:

- Condensadores de aire húmedo, donde el aire y el agua mezclados son extraídos juntos
- Condensadores de aire seco, donde el agua y el aire son removidos separadamente

Desde el punto de vista del método de extracción del agua:

- Condensadores cortos, con extracción por medio de una bomba
- Condensadores largos o barométricos, donde el agua es removida por gravedad

Desde el punto de vista del método de circulación de aire:

- Condensadores de flujo paralelo, en los cuales el agua y el aire circulan en la misma dirección
- Condensadores de flujo en contracorriente, en los cuales el agua y el aire circulan en direcciones opuestas

### **1.6.2.1 CONDENSADORES BAROMÉTRICOS**

Este tipo de condensador presenta la ventaja de ser menos costoso y ahorrar el consumo de agua de enfriamiento (Geankoplis, 2006). El condensador se sitúa en la parte superior de un tubo largo de descarga. El condensador está a una altura suficiente por encima del punto de descarga del tubo para que la columna de agua en el interior de éste compense la diferencia entre la presión absoluta en el condensador y la atmósfera. De esta manera, el agua se descarga por gravedad a

través de un recipiente de sellado en el extremo inferior. Se usa una altura aproximada de 10.4 m (Figura 1.4).

Una característica del condensador barométrico es que el agua de inyección se puede descargar a través de una pierna por gravedad, sin requerir una bomba de vacío. Además, que en el condensador barométrico no hay piezas móviles, por lo que el costo de mantenimiento es bajo; requiere poco espacio y es fácil de instalar.

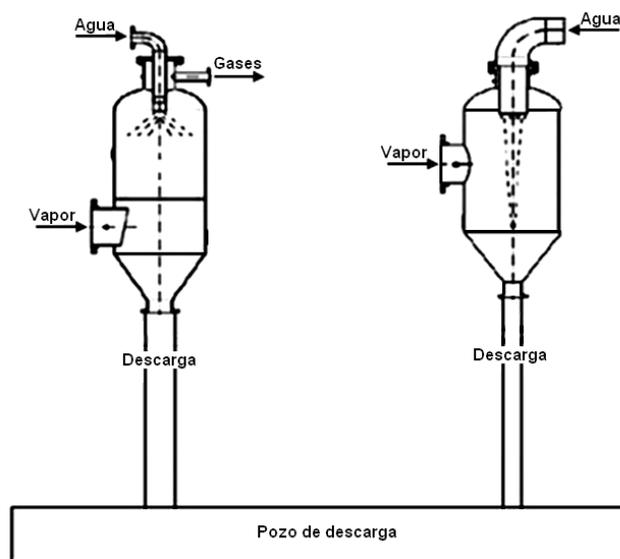
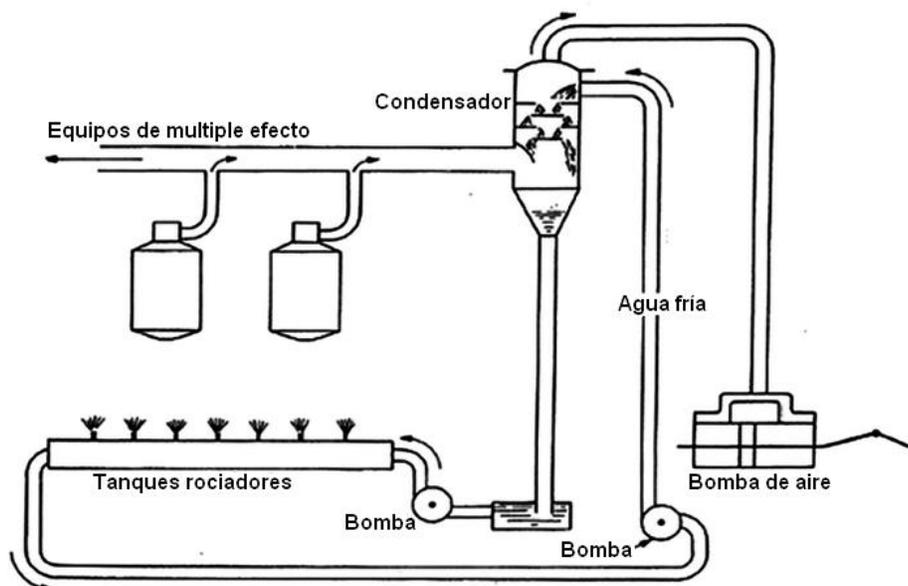


Figura 1.4 Ejemplo de condensadores barométricos.

## 1.7 EQUIPO DE VACÍO

La bomba usada para extraer los vapores y los gases no condensables, son generalmente bombas de vacío secas, utilizadas por los condensadores barométricos en contracorriente. Una bomba de vacío que tuvo una gran difusión es el eyector de chorro de vapor. El vapor a alta presión se admite en el aparato y pasa por una tobera la cual dispara un chorro a altas velocidades a través de un tubo en forma de venturi.

Industrialmente para producir el vacío en el proceso de cristalización, se emplean condensadores conectados a una bomba de aire, de este modo se produce el vacío en el equipo requerido y las condiciones dentro del condensador permiten que los gases condensen con mayor facilidad. El condensador es colocado a una altura tal que permita que el agua de enfriamiento y los condensados puedan fluir por gravedad. El condensador es por tanto una cámara barométrica extendida en la parte inferior por una columna barométrica sumergida a un pozo abierto a la atmosfera como se muestra en la Figura 1.5.



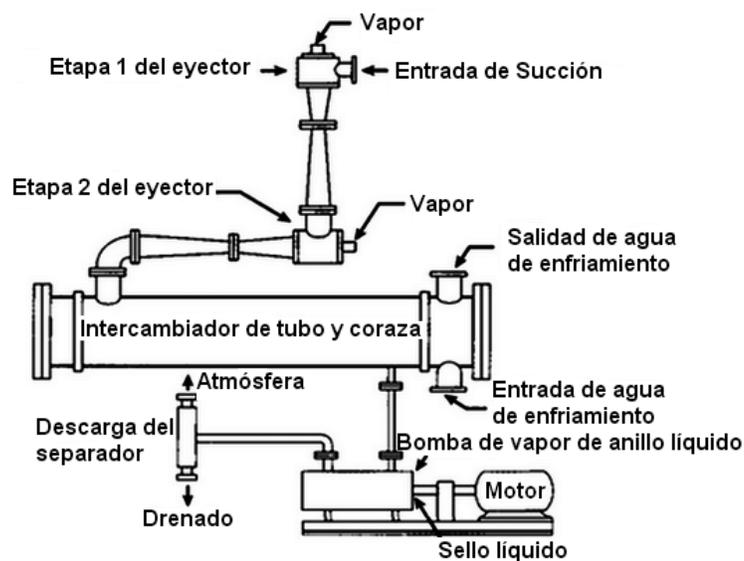
**Figura 1.5** Sistema de vacío en un proceso de evaporación (Hugot y Jenkins, 1986)

El agua de enfriamiento es bombeada al sistema de condensación a una temperatura por menor a la temperatura de saturación a presión dentro del condensador, y por contacto directo, los vapores son condensados.

Los condensados son bombeados a un sistema de enfriamiento para posteriormente ser recirculados como agua de enfriamiento al condensador. La bomba de aire también tiene el funcionamiento de extraer los gases no condensables dentro del sistema de evaporación.

### 1.7.2 SISTEMAS HÍBRIDOS

Los sistemas de condensación híbridos, son producto de procesos de distinta naturaleza, incluyen modificaciones tales como otro condensador de tubos y coraza además de la bomba de vacío de anillo líquido (LRVP). En tales configuraciones, la LRVP debe situarse directamente debajo del sistema de condensación como se muestra en la Figura 1.6 (Wetzel, 1996).



**Figura 1.6** Sistema híbrido integrado por una bomba de anillo líquido acoplada a un sistema de condensación de tubo y coraza (Wetzel, 1996)

Este sistema es comúnmente llamado sistema híbrido, son efectivos en cuanto a costos, sin embargo, el uso de una LRVP es limitado debido al bombeo de líquidos y vapores no condensables por lo que cada sistema debe ser analizado por individual.

También existen aquellos sistemas que consisten en la combinación de un condensador evaporativo y un condensador por aire enfriado, a baja temperatura ambiental el enfriamiento del intercambiador de calor se realiza sólo con aire, a temperatura ambiente el intercambiador es humedecido parcialmente con agua y a

altas temperaturas la superficie es humedecida completamente (Riha y Jackmann, 2011).

## **1.9 SISTEMAS DE CONTROL SCADA**

El diseño y control apropiado de los procesos de cristalización pueden tener un efecto significativo en la eficiencia total de los procesos de producción, así como, en la calidad del producto final. Los principales desarrollos han ocurrido en cuatro importantes categorías: modelado, monitoreo, control y conceptos nuevos de cristalización (Nagy, 2013).

En todos los procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas variables tales como la presión, velocidad, temperatura etc. Los instrumentos de medición y control permiten mantener y regular estas constantes en condiciones idóneas (Velázquez, 2009).

En los últimos años se ha desarrollado un conjunto de software denominado SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition), para funcionar sobre ordenadores de control de producción con acceso a planta mediante la comunicación digital con los instrumentos y actuadores e interfaz gráfica de alto nivel con el usuario.

Los sistemas SCADA deben cumplir con varias funciones básicas:

- Adquisición de datos, para recuperar, procesar y almacenar la información recibida.
- Representación gráfica y animada de variables de proceso y monitoreo de estas por medio de alarmas.
- Ejecutar acciones de control para modificar la evolución del proceso, actuando sobre los reguladores autónomos básicos o sobre el proceso mediante las salidas conectadas.

- Arquitectura abierta y flexible con capacidad de ampliación y adaptación.
- Conectividad con otras aplicaciones y base de datos, locales o distribuidas en redes de comunicación.
- Supervisión, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- Transmisión de información con dispositivos de campo y otros PC's.
- Base de datos, gestión de datos con bajos tiempos de acceso.
- Representación gráfica de los datos. Interfaz del operador o HMI (Human Machine Interface).
- Alertar al operador de cambios detectados en la planta, tanto los que pueden ocurrir espontáneamente, como eventos que sucedan en la operación normal de la planta.

El sistema permite supervisar y controlar las distintas variables que se encuentran en un proceso comunicándose con los dispositivos de campo (controladores autónomos, sistemas de dosificación, etc.) para controlar el proceso en forma automática. Además, provee de toda la información que se genera en el proceso a diversos usuarios.

Los sistemas SCADA deben obtener principalmente mediante la adquisición de datos, mediciones y registro de señales obtenidas básicamente de dos maneras (De la rosa, 2012):

- medición directa de cantidades eléctricas, que pueden incluir voltajes de corriente directa y corriente alterna, frecuencia o resistencia.
- Señales que se originan a partir de transductores, como termopares o sensores de presión.

El tipo de sistema de adquisición de datos, analógica o digital, depende del uso de los datos registrados. En la Figura 1.7, se muestra una representación de los componentes principales de un sistema de adquisición de datos.



**Figura 1.7** Sistema de adquisición de datos basado en una computadora personal

### 1.9.1 INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso de un computador como forma de reemplazar equipos físicos por software, permitiendo a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando un instrumento real. En la mayoría de los casos el usuario ve la representación gráfica de los indicadores y botones de control virtual en la pantalla del ordenador. El concepto de instrumentación virtual implica adquisición de señales, el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales, interfaz hombre-máquina, visualización, monitoreo y supervisión remota del proceso (De la rosa, 2012).

Un sistema de instrumentación virtual está enfocado a los instrumentos encargados de medir señales, registrar datos y decidir acciones de control (Morris y Langari, 2012). Generalmente es requerida por alguna de las siguientes razones:

- Para reducir costos de energía.
- Para reducir costos de personal.
- Para reducir requisitos de capital futuros.
- Para mejorar el nivel de servicio.
- Para evitar incidentes ambientales.

- Para cumplir con requisitos regulatorios.
- Para ser más competitivo.
- Para sustituir sistemas obsoletos.

### 1.9.2 LabVIEW

Es un software de gran aceptación comercial para la implementación de la instrumentación virtual. La palabra LabVIEW según sus siglas significa Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Es una plataforma de programación basada en un lenguaje gráfico para el diseño de aplicaciones de adquisición de datos, instrumentación y control. Permite diseñar interfaces de usuario mediante instrumentos virtuales (VI), tiene la ventaja de integrarse fácilmente con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos.

La programación en LabVIEW se realiza mediante la interconexión de bloques de control, medición, indicadores y gráficas. Los programas en LabVIEW constan de 3 partes principales:

- Panel frontal, permite la interacción del usuario con el instrumento virtual, controlando y observando las acciones del mismo. Constituye la interfaz del usuario.
- Diagrama de bloques, es la referencia al código usado para el instrumento virtual.
- Cables, son las líneas que definen la interacción entre los distintos bloques.

Dentro del código del programa los bloques de control son observados en el panel frontal por medio de una terminal que permite su modificación aun cuando el programa se esté ejecutando, los valores fluyen a través de las líneas conectadas

con otros bloques, posteriormente serán mostrados en indicadores que también tienen una terminal en el panel frontal.

Las ventajas que proporciona el uso de LabVIEW se resumen en las siguientes:

Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender (NIC, 2003).

- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

## **1.10 OPTIMIZACIÓN**

La optimización se define como el empleo de métodos específicos para determinar las condiciones más rentables y eficaces que den solución a un problema. La optimización puede englobar una variedad de problemas dentro de los campos de la ciencia, la ingeniería y los negocios, dando una solución eficaz a ellos. Las técnicas empleadas en la optimización hacen referencia al uso de diversas herramientas como son las estadísticas, los principios de probabilidad, los mínimos cuadrados, empleo de máximos y mínimos, ganancias y pérdidas, costos, así como esfuerzos para aumentar ganancias.

El objetivo de la optimización es encontrar los valores de ciertas variables dentro de un sistema o proceso que proporcione las mejores condiciones para el problema planteado. Dentro de las herramientas que emplea la optimización para resolver los

problemas, se encuentra el uso de las computadoras debido a que se han implementado software que facilitan la solución dando resultados satisfactorios (Himmelblau *et al.*, 2001).

### 1.10.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los modelos de diseño de experimentos son una serie de pruebas para determinadas variables ( $x$ ) que influyen en una variable de interés ( $y$ ) cuyo objetivo es averiguar si existe influencia de algún factor, algunas variables ( $z$ ) no son controlables, aunque pueden serlo para fines de una prueba. La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación. Los objetivos del experimento podrían comprender:

- Determinar las variables de mayor influencia sobre la respuesta  $y$ .
- Determinar el ajuste de las  $x$  que tienen mayor influencia para que  $y$  esté cercana al valor deseado.
- Determinar el ajuste de las  $x$  que tienen mayor influencia para que la variabilidad de  $y$  sea reducida.
- Determinar el ajuste de las  $x$  que tienen mayor influencia para que los efectos de las variables no controlables ( $z$ ) sean mínimos.

### 1.10.2 METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

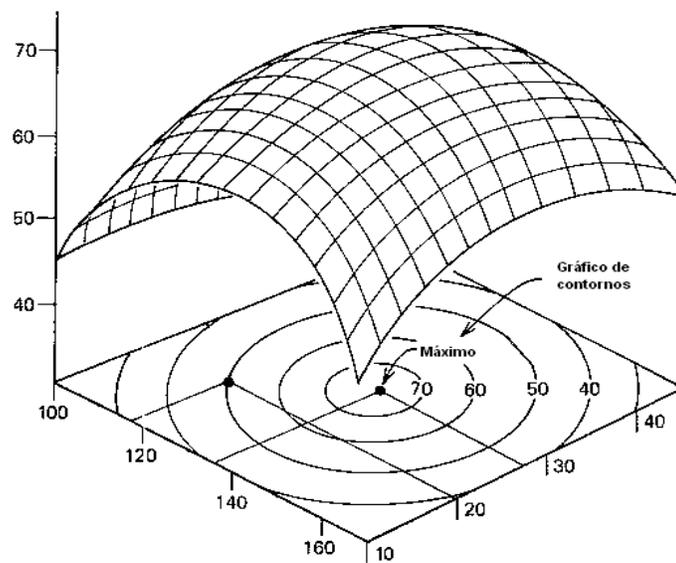
La metodología de superficie de respuesta (MSR), es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta (Montgomery, 2012).

$$y=f(x_1, x_2) + \varepsilon \tag{1.2}$$

donde  $\mathcal{E}$  representa el ruido o error observado en la respuesta  $y$ . Si la respuesta esperada se denota por  $E(y)=f(x_1, x_2) = \eta$ , entonces la superficie de respuesta es representada por:

$$\eta=f(x_1, x_2) \quad (1.3)$$

se le llama superficie de respuesta y proporciona el valor esperado por medio de un gráfico como se muestra en la Figura 1.8.



**Figura 1.8** Representación gráfica de superficie de respuesta tridimensional donde se indica el rendimiento esperado  $\eta$  (Montgomery, 2012)

Las gráficas de las curvas de nivel para los modelos de primer orden tienen una serie de líneas paralelas que representan las coordenadas de los niveles del factor que producen los mismos valores de respuesta; para los modelos cuadráticos son más complejas y tienen varios patrones de curvas posibles, uno de ellos, mostrado en la Figura 1.8, es un contorno en forma de montículo con respuesta máxima en el nivel central el cual es el valor esperado  $\eta=f(x_1, x_2)$ . La superficie de respuesta permite

inspeccionar de manera visual la respuesta para cierta zona de los niveles de los factores de interés.

En este método son realizados planteamientos factoriales, y los resultados son ajustados usando modelos matemáticos. Estas etapas son conocidas como etapa de desplazamiento y modelamiento siguiendo la dirección de la región del punto óptimo deseado.

## **1.11 INSTITUTO MÉXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL (IMPI)**

De acuerdo con la Ley de la Propiedad Industrial (LPI), el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) tiene, entre otras atribuciones, fomentar y proteger la propiedad industrial, tales como: un producto técnicamente nuevo, una mejora a una máquina o aparato, un diseño original para hacer más útil o atractivo un producto, un proceso de fabricación novedoso, una marca o aviso comercial, una denominación que identifique un establecimiento o una declaración sobre el origen geográfico que distingue o hace especial un producto.

La propiedad industrial protege a las creaciones industriales mediante patentes, registros de modelo de utilidad, registros de diseño industrial, esquemas de trazado de circuitos integrados y secretos industriales; la presente guía versa sobre las solicitudes de patentes y los registros de modelos de utilidad.

### **1.11.1 PATENTES**

Se puede solicitar la protección de una patente a toda invención como: productos, procesos o usos de creación humana que permitan transformar la materia o la energía que existe en la naturaleza para su aprovechamiento por el hombre y que satisfaga necesidades concretas, siempre y cuando cumplan con los siguientes requisitos:

- Novedad: se considera nuevo, todo aquello que no se encuentre en el estado de la técnica.
- Actividad Inventiva: es el proceso creativo cuyos resultados no se deduzcan del estado de la técnica en forma evidente para un técnico en la materia.
- Aplicación Industrial: es la posibilidad de ser producido o utilizado en cualquier rama de la actividad económica.

La protección de la patente tiene una vigencia de 20 años improrrogables (IMPI, 2013).

### **1.11.1 MODELOS DE UTILIDAD**

Se pueden registrar como modelos de utilidad los objetos, utensilios, aparatos o herramientas cuyo resultado de un cambio en su disposición, configuración, estructura o forma, presenten una función distinta respecto a las partes que lo integran o ventajas en su utilidad, siempre y cuando cumplan con los siguientes requisitos:

- Novedad.
- Aplicación industrial.

Los productos protegibles por registro de modelo de utilidad son aquellos que no alcanzan un desarrollo tecnológico similar al de una patente, principalmente en cuanto al requisito de actividad inventiva, únicamente se necesita que la modificación que se ha hecho presente una función distinta o una mejora en cuanto al funcionamiento que tenía un producto.

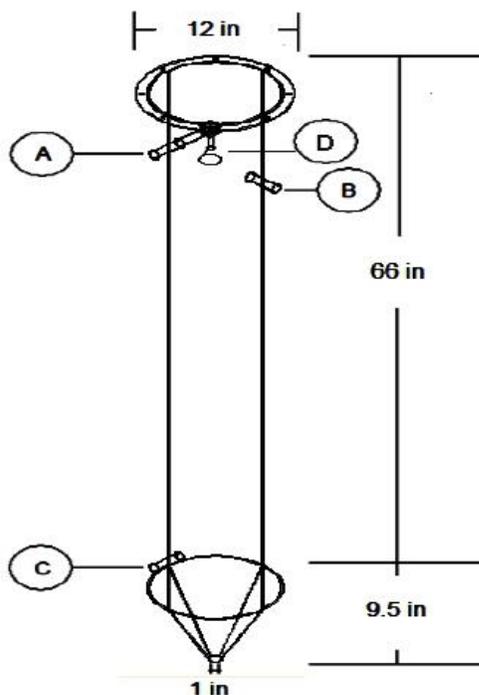
La protección a los registros de modelos de utilidad tiene una vigencia de 10 años improrrogables (IMPI, 2013).

**CAPITULO 2**  
**MATERIALES Y MÉTODOS**

## 2.1 MATERIALES

### 2.1.1 CONDENSADOR DE CONTACTO DIRECTO

Se cuenta con un condensador barométrico de acero galvanizado de 1/8", recubierto con un esmalte para evitar la corrosión. Se compone del cuerpo, base cónica y tapa. El condensador está montado sobre una base anclada al piso para evitar problemas ocasionados por la vibración. En la parte inferior esta acoplada una bomba de vacío de anillo líquido lo que constituye el sistema híbrido de condensación a vacío. La tapa se une al condensador híbrido mediante una brida asegurada con 8 tornillos además de una junta de caucho para tener un cierre hermético. En el interior del condensador se adaptó una regadera para distribuir el agua en forma de chorro y tenga un mayor contacto con los vapores a condensar (Figura 2.1).



**Figura 2.1** Estructura del cuerpo del condensador

El condensador consta básicamente de dos estructuras geométricas, la primera estructura es el cuerpo principal del condensador, tiene forma cilíndrica hueca con un

diámetro interno de 30.5 cm (12 in) y una altura de 167.5 cm (66 in). Se incluyen 3 conectores de 2.54 cm (1 in) tipo macho identificados por las letras A, B y C, los cuales pueden usarse para conexiones de tuberías o accesorios al condensador. En la parte superior identificada por la letra D, se encuentra la regadera de dispersión de agua de enfriamiento.

La segunda estructura hace referente al fondo cónico localizado en la parte inferior del condensador. Consiste en un cono truncado hueco con un diámetro mayor de 30.5 cm (12 in) y diámetro menor de 2.54 cm (1 in) el cual constituye un punto de conexión para otros equipos.

### 2.1.2 BOMBA DE VACÍO DE ANILLO LÍQUIDO

Una bomba de vacío de la marca Vaccutech modelo A-1. Consiste en una motobomba de vacío de anillo líquido (Figura 2.2) de una sola etapa. El vacío máximo obtenible que puede lograrse a 10 °C es de aproximadamente 28 inHg. En conjunto con el condensador de contacto directo constituye el sistema de condensación híbrido.

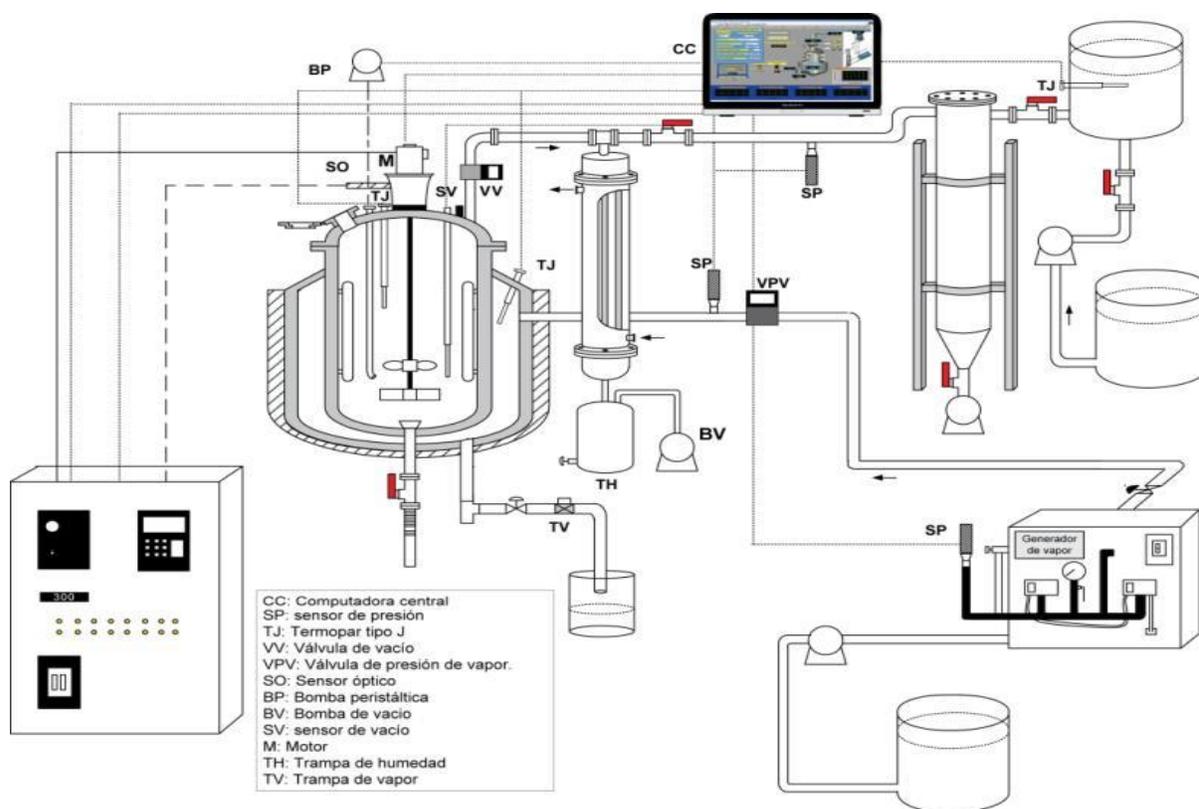


**Figura 2.2** Bomba de vacío de anillo líquido marca Vaccutech

### 2.1.3 CRISTALIZADOR POR LOTES A VACÍO

Un cristalizador por lotes a vacío de acero inoxidable con chaqueta de calentamiento-enfriamiento conectado a un sistema de adquisición de datos e imágenes (SCADA). El equipo es controlado desde la computadora central del sistema, la cual cuenta con un

panel frontal de control desarrollado con el software LabVIEW de National Instruments. Tiene una capacidad de 12.7779 L en su interior y 11.1029 L en la chaqueta de calentamiento-enfriamiento. El sistema ésta provisto de una bomba de vacío, un condensador de superficie, una caldera y un motor de agitación variable integrado. Dicho cristalizador se encuentra en el Laboratorio de Plantas Piloto (área de cristalización), perteneciente a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Orizaba. Las especificaciones de los dispositivos encargados del control del proceso y el equipo de cómputo del sistema se especifican en la Tabla 2.1 y en la Figura 2.3 se muestra un diagrama del cristalizador por lotes a vacío escala planta piloto que se empleará para las pruebas realizadas en esta investigación (Cadeza, 2006; Xaca, 2006).



**Figura 2.3** Diagrama del cristalizador por lotes a vacío escala planta piloto

**Tabla 2.1** Dispositivos e instrumentación del cristizador por lotes a vacío

Cantida	Instrumento
2	Termopar tipo J temperatura de 0 a 760 °C, longitud de cable de 1 m.
2	Termopozos de 1" de diámetro de entrada NPT, en acero inoxidable.
1	Bomba de vacío marca Felisa modelo FE-1400, potencia 0.33 HP.
1	Válvula solenoide de control proporcional para vapor de 2 vías, de latón, orificio 8 mm, conexión roscada de ½" NPT, temperatura media 140°C. Con controlador digital, marca Burkert.
1	Válvula solenoide de control proporcional de 2 vías, para regulación de vacío, función normalmente cerrada, de acero inoxidable, orificio de 2.0 mm, conexión roscada de ¼" NPT, temperatura media 90°C. Con controlador digital, marca Burkert.
6	Válvula solenoide de 2 vías, normalmente cerrada de ½" de diámetro a 120 VCA, de acero, marca Parker.
3	Válvula solenoide de 2 vías, normalmente cerrada de ½" de diámetro a 120 VCA, de latón, servicio vapor, marca Parker.
6	Válvula de paso para permitir flujo de agua y vapor a través de las tuberías de ½" de diámetro.
1	Válvula reguladora de presión marca Norgren de México ½" con entrada máxima de 21 Kg/cm <sup>2</sup> y descarga de 9 Kg/cm <sup>2</sup> . Temperatura máxima 234°C.
1	Transmisor de vacío, marca Cole-Parmer de acero inoxidable, modelo 07356-11, rango de operación de temperatura de -29 a 71 °C, rango de operación de presión de 30" inHg a 30 psig, conexión ¼", salida de 4-20 mA, conexión eléctrica 3 ft cable.
2	Transmisor de presión, marca Cole-Parmer de acero inoxidable, modelo 68072-08, rango de operación de temperatura -40° a 85°C, rango de operación de presión de 0 a 100 psig, conexión ¼" NPT.
1	Generador de vapor marca SUSSMAN modelo MBA9. Presión máxima de trabajo 100 Psi. Voltaje de trabajo 240 VAC. Voltaje de control 120 VAC.
1	Trampa Termodinámica de ½" NPT. Rango de operación de 3.5 a 600
1	Bomba hidráulica modelo QB60 marca Clean Water Pump, potencia 1/2 HP, 127 VCA de 1 fase, 3,450 rpm, 35 L/min de capacidad.
1	Sistema de tubería galvanizada para la circulación del agua de calentamiento-enfriamiento de ½" de diámetro.

**Tabla 2.1** Dispositivos e instrumentación del cristalizador por lotes a vacío (continuación)

1	Aislamiento térmico para alta temperatura a base de 1 ½" de espesor de fibra de vidrio, acabado de lámina de aluminio calibre 26, lisa biselada, capacidad de 80 – 150 °C.
1	Manómetro de carátula marca ASHCROFT de 0 a 100 PSI
1	Condensador de superficie de acero inoxidable 316, con entrada de ½" y salida de ¼" con una longitud de 27" y 4" de diámetro.
1	Tanque de plástico de 1100 L de capacidad, con tapa.
1	Trampa húmeda de acero inoxidable 316, con una longitud de 10" y 7" de diámetro, entrada, salida y purga de ½" de diámetro.
1	Cristalizador de acero inoxidable de 12.7779 L de capacidad, chaqueta de calentamiento de 11.1019 L de capacidad, 4 deflectores de 17 cm de ancho por 3.5 cm de largo, flecha de agitación de 39 cm de largo.
1	Agitador para tanque cerrado modelo NSDB de ⅛ HP (0.125 HP) de potencia, transmisión directa de 1,750 rpm de 1 fase 60 ciclos, 110 VCA totalmente cerrado sin ventilación de acero inoxidable 316, con brida de 4" de diámetro en acero inoxidable con flecha agitadora de 26" de longitud y ½" de diámetro en acero inoxidable 316 y un variador de velocidad con rango de 0 a 1,750 rpm con fusible integrado.
1	Impulsor tipo propela marina de 3" de diámetro con tres hojas de acero inoxidable 316.
1	Impulsor tipo de paletas planas en acero inoxidable 316, de 3" de diámetro.
1	Tacómetro programable. Rango de 5 a 999,990 rpm.
1	Sensor óptico para distancias de 3 ft. Rango de 1 a 150 000 rpm.
1	Microscopio electrónico triocular 48923-30 (Cole-Palmer). Objetivo 4X.
1	Cámara monocromática con video RS-170 con lente de 0.19 mm por píxel. mínimo, 60 Hz.
1	PC, Intel Pentium IV. Sistema operativo XP, memoria RAM 768 MB, disco duro de 40 GB.
4	Tarjeta de adquisición de datos (NI PCI-6023E, NI PCI-6025E, NI PCI-6711 y NI PCI-232/2). Convertidores analógico-digital y digital-analógico que permiten la entrada/salida de señales analógicas y digitales.
2	Módulo de acondicionamiento de señal (NI SCC-TC02).
1	Tarjeta de adquisición de imágenes (NI PCI-1409).

## 2.2 PROCEDIMIENTOS

### 2.2.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CONDENSACION HÍBRIDO

Acoplar el sistema de condensación a la línea del proceso de cristalización y verificar que el equipo no presente fugas de vacío. Además, Modificar las entradas auxiliares del condensador para obtener una consistencia de las medidas de tuberías. Realizar una red de tuberías que conectan al cristizador por lotes a vacío con el condensador híbrido para que el vapor del proceso tenga una entrada directa al sistema de condensación. Evaluar el condensador siguiendo los puntos que se exponen a continuación:

- Revisar los antecedentes de operación y rendimiento del sistema de condensación híbrido montado en el laboratorio para la aplicación y el uso correcto en el proceso de cristalización.
- Realizar pruebas de arranque del sistema de condensación híbrido, para confirmar su hermeticidad de vacío con el medio tanto del condensador como de las tuberías que conectan al cristizador por lotes a vacío.
- Para las pruebas de hermeticidad al condensador, conectar directamente a una bomba de vacío. De igual manera se realizar pruebas con aire comprimido. Si existen fugas hacer las correspondientes acciones preventivas.
- Integrar el equipo de condensación en la línea del proceso, hacer las conexiones necesarias hacia la tubería de vapor, entrada de agua de enfriamiento y salida de condensados.
- Una vez que el sistema de condensación híbrido y las tuberías del proceso de cristalización se encuentren libre de pérdidas de presión de vacío,

comprobar experimentalmente el vacío generado dentro del cristalizador por lotes.

## 2.2.2 FLUJO DE VAPOR GENERADO EN EL CRISTALIZADOR POR LOTES A VACÍO

Realizar por medio de balances de materia y energía, un modelo matemático para determinar el flujo de vapor generado en el cristalizador bajo las condiciones de presión de vacío.

### 2.2.2.1 BALANCE MÁSSICO DEL LÍQUIDO DENTRO DEL CRISTALIZADOR

Aplicando el principio de conservación:

$$[\text{Acumulación de masa}] = [\text{Entrada de masa total}] - [\text{Salida de masa total}] \quad (2.1)$$

Matemáticamente:

$$\frac{d(\rho_l V_l)}{dt} = E_l \rho_l - \rho_v V_v \quad (2.1)$$

donde:  $\rho_l$ =densidad de la solución dentro del cristalizador;  $V_l$ =volumen del líquido dentro del cristalizador;  $E_l$ =flujo volumétrico de entrada al cristalizador;  $\rho_v$ =densidad del vapor;  $V_v$ =flujo volumétrico del vapor que abandona el cristalizador.

Considerando  $\rho_l = cte$  y  $E = 0$  (por lotes)

$$\rho_l \frac{dV}{dt} = -\rho_v V_v \quad (2.2)$$

### 2.2.2.2 BALANCE ENERGÉTICO DEL LÍQUIDO DENTRO DEL CRISTALIZADOR

Aplicando el principio de conservación:

$$[\text{Acumulación de energía total}] = [\text{Entrada de energía total}] - [\text{Salida de energía total}] + [\text{Energía recibida por el sistema}] \quad (2.3)$$

Matemáticamente:

$$\frac{d[\rho_l V_l C p_i (T_i - T_{ref})]}{dt} = \rho_l E_l C p_e (T_e - T_{ref}) - \rho_v V_v h_{fg} + Q \quad (2.3)$$

donde:  $C p_i$ =capacidad calorífica de la solución dentro del cristalizador;  $C p_e$ =capacidad calorífica del flujo de entrada al cristalizador;  $T_i$ =temperatura de la solución dentro del cristalizador;  $T_{ref}$ =temperatura de referencia;  $T_e$ =temperatura del flujo de entrada al cristalizador;  $h_{fg}$ =calor latente de vaporización;  $Q$ =calor recibido por el sistema.

Como es un sistema sin flujo de entrada  $E_l = 0$

$$\frac{d[\rho_l V_l C p_i (T_i - T_{ref})]}{dt} = -\rho_v V_v h_{fg} + Q \quad (2.4)$$

Considerando que  $T_{ref} = 0$  y  $T_i, \rho_l, C p_i = cte$

$$\rho_l C p_i T_i \frac{d(V_l)}{dt} = -\rho_v V_v h_{fg} + Q \quad (2.5)$$

El término  $Q$  está dado por la ley de enfriamiento de Newton, así:

$$Q = U * A(T_{ext} - T_{ag}) \quad (2.6)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.6 en la Ecuación 2.5, se obtiene:

$$\frac{d(V_l)}{dt} = -\frac{\rho_v V_v h_{fg}}{C p_i T_i \rho_l} + \frac{UA(T_{ext} - T_i)}{C p_i T_i \rho_l} \quad (2.7)$$

donde: U= coeficiente global de transferencia de calor; A= área de transferencia de calor; T<sub>ext</sub>= temperatura externa del cristalizador.

El análisis dimensional de la Ecuación 2.7, se presenta en el Apéndice A Sección A.1.

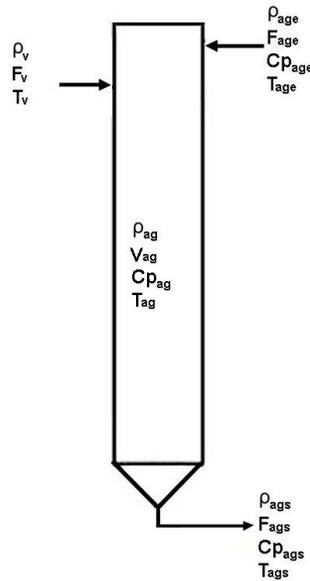
La relación del caudal de vapor es proporcional a la diferencia de presión entre la presión de vapor P<sub>vs</sub> y la presión dentro del sistema P<sub>v</sub> (Ecuación 2.8).

$$V_v = K(P_{vs} - P_v) \quad (2.8)$$

En general, la constante K (pseudo-coeficiente de transferencia de materia) se fija un valor lo suficientemente grande para lograr que P<sub>v</sub> tienda a P<sub>vs</sub>.

### 2.2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL CONDENSADOR HÍBRIDO

Por medio de balances de materia y energía, realizar el modelo matemático del condensador para obtener el comportamiento dinámico a lazo abierto de la temperatura de los condensados y establecer un flujo de agua de enfriamiento adecuado para condensar el vapor generado, reduciendo el consumo hidráulico en el proceso de cristalización por lotes a vacío. En la Figura 2.4, se muestra el diagrama del condensador por contacto directo, los parámetros y variables que intervienen en el modelo matemático.



**Figura 2.4** Diagrama del condensador por contacto directo

### 2.2.3.1 BALANCE MÁSSICO DEL CONDENSADOR

De acuerdo al principio de conservación:

$$[\text{Acumulación de masa total}] = [\text{Entrada de masa total}] - [\text{Salida de masa total}] \quad (2.9)$$

Matemáticamente:

$$\frac{d(\rho_{ag}V_{ag})}{dt} = \rho_v F_v + \rho_{age} F_{age} - \rho_{ags} F_{ags} \quad (2.9)$$

donde:  $\rho_{ag}$ =densidad de los condensados;  $V_{ag}$ =volumen de los condensados;  $\rho_{age}$ =densidad del agua de enfriamiento;  $F_{age}$ =flujo volumétrico de agua de enfriamiento;  $\rho_{ags}$ =densidad del agua de salida;  $F_{ags}$ =flujo volumétrico del agua de salida.

Considerando que la densidad se mantiene constante y  $\rho_{ag} = \rho_{age} = \rho_{ags}$ :

$$\rho_{ag} \frac{dV_{ag}}{dt} = \rho_v F_v + \rho_{ag} F_{age} - \rho_{ag} F_{ags} \quad (2.10)$$

Despejando  $\rho_{ag}$  y reduciendo términos se tiene:

$$\frac{dV_{ag}}{dt} = \frac{\rho_v}{\rho_{ag}} F_v + F_{age} - F_{ags} \quad (2.11)$$

### 2.2.3.2 BALANCE ENERGÉTICO DEL CONDENSADOR

Energía total en el condensador:

$$E = U + K + P \quad (2.12)$$

donde: E= Energía total, U= Energía interna, K = Energía potencial y P= Energía cinética

Como el condensador no está en movimiento, la energía cinética y potencial se consideran despreciables, así:

$$\frac{dE}{dt} \cong \frac{dU}{dt} \cong \frac{dH}{dt} \quad (2.13)$$

Sabemos que:

$$H = \rho V C_p (T - T_{ref}) \quad (2.14)$$

Aplicando el principio de conservación:

$$[\text{Acumulación de energía total}] = [\text{Entrada de energía total}] - [\text{Salida de energía total}] + [\text{Energía recibida por el sistema}] \quad (2.15)$$

Matemáticamente:

$$\begin{aligned} \frac{d[\rho_{ag}V_{ag}Cp_{ag}(T_{ag} - T_{ref})]}{dt} \\ = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{age} F_{age} Cp_{age} (T_{age} - T_{ref}) \\ - \rho_{ags} F_{ags} Cp_{ags} (T_{ags} - T_{ref}) + Q \end{aligned} \quad (2.15)$$

donde:  $Cp_{ag}$ =capacidad calorífica de los condensados;  $T_{ag}$ =temperatura de los condensados;  $Cp_{age}$ =capacidad calorífica del agua de enfriamiento;  $T_{age}$ =temperatura del agua de enfriamiento;  $Cp_{ags}$ =capacidad calorífica del agua de salida;  $T_{ags}$ =temperatura del agua de salida;  $Q$ =calor recibido por el sistema.

Suponiendo que  $\rho_{ag}$  y  $Cp_{ag}$  son constantes, además,  $T_{ref} = 0$ ;  $\rho_{ag} = \rho_{age} = \rho_{ags}$  y  $T_{ag} = T_{ags}$

$$\rho_{ag} Cp_{ag} \frac{d(V_{ag} T_{ag})}{dt} = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{ag} F_{age} Cp_{ag} T_{age} - \rho_{ag} F_{ags} Cp_{ag} T_{ag} + Q \quad (2.16)$$

Derivando las variables:

$$\begin{aligned} \rho_{ag} Cp_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} + \rho_{ag} Cp_{ag} T_{ag} \frac{d(V_{ag})}{dt} \\ = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{ag} F_{age} Cp_{ag} T_{age} - \rho_{ag} F_{ags} Cp_{ag} T_{ag} + Q \end{aligned} \quad (2.17)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.11 en la Ecuación 2.17

$$\begin{aligned} \rho_{ag} C p_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} + \rho_{ag} C p_{ag} T_{ag} \left[ \frac{\rho_v}{\rho_{ag}} F_v + F_{age} - F_{ags} \right] \\ = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} T_{age} - \rho_{ag} F_{ags} C p_{ag} T_{ag} + Q \end{aligned} \quad (2.18)$$

Acomodando términos:

$$\begin{aligned} \rho_{ag} C p_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} + [C p_{ag} T_{ag} \rho_v F_v + \rho_{ag} C p_{ag} T_{ag} F_{age} - \rho_{ag} C p_{ag} T_{ag} F_{ags}] \\ = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} T_{age} - \rho_{ag} F_{ags} C p_{ag} T_{ag} + Q \end{aligned} \quad (2.19)$$

Despejando:

$$\begin{aligned} \rho_{ag} C p_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} \\ = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} T_{age} - \rho_{ag} F_{ags} C p_{ag} T_{ag} - C p_{ag} T_{ag} \rho_v F_v \\ - \rho_{ag} C p_{ag} T_{ag} F_{age} + \rho_{ag} C p_{ag} T_{ag} F_{ags} + Q \end{aligned} \quad (2.20)$$

Reduciendo términos

$$\begin{aligned} \rho_{ag} C p_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} \\ = \rho_v F_v h_{fg} + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} T_{age} - C p_{ag} T_{ag} \rho_v F_v - \rho_{ag} C p_{ag} T_{ag} F_{age} \\ + Q \end{aligned} \quad (2.21)$$

Factorizando términos:

$$\rho_{ag} C p_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} = \rho_v F_v (h_{fg} - C p_{ag} T_{ag}) + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} (T_{age} - T_{ag}) + Q \quad (2.22)$$

El término Q está dado por la ley de enfriamiento de Newton, así:

$$Q = U * A(T_{amb} - T_{ag}) \quad (2.23)$$

Donde  $T_{amb}$  = temperatura exterior del condensador.

Sustituyendo la Ecuación 2.23 en la Ecuación 2.22, se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho_{ag} C p_{ag} V_{ag} \frac{d(T_{ag})}{dt} \\ = \rho_v F_v (h_{fg} - C p_{ag} T_{ag}) + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} (T_{age} - T_{ag}) + UA(T_{amb} \\ - T_{ag}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Despejando se obtiene:

$$\frac{d(T_{ag})}{dt} = \frac{\rho_v F_v (h_{fg} - C p_{ag} T_{ag}) + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} (T_{age} - T_{ag}) + UA(T_{amb} - T_{ag})}{\rho_{ag} C p_{ag} V_{ag}} \quad (2.25)$$

El análisis dimensional de la Ecuación 2.25, se presenta en el Apéndice A Sección A.2.

#### 2.2.4 AGUA DE ENFRIAMIENTO NECESARIA PARA LA CONDENSACION

En base al flujo de vapor generado dentro del cristalizador y con el modelo matemático del sistema de condensación, determinar el flujo de agua de enfriamiento necesario para condensar los vapores basándose en las condiciones de descarga permisibles por la NOM-001-SEMARNAT-1996, la temperatura máxima permitida de descarga es de 40 °C, por lo que la temperatura de los condensados no debe superar este límite. La metodología del cálculo se describe en los siguientes puntos:

- a) Determinar la temperatura de condensación del vapor proveniente del proceso a las condiciones de vacío a la cual opera el sistema de cristalización por lote a vacío.

- b) Considerar la elevación de temperatura máxima del agua de enfriamiento en función de la presión de vacío a la que se encuentra dentro del condensador híbrido, los rangos se muestran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Elevación máxima de temperatura en agua de enfriamiento (Ryans y Roper, 1986)

Presión		T <sub>max</sub>	
Torr	inHg	°C	°F
<50	> 28.4	27	15
50 – 200	28.04 – 22.13	54	30
>200	< 22.13	81	45

- c) Establecer la temperatura de entrada del agua de enfriamiento y la temperatura del agua de salida de acuerdo a la elevación máxima y a la NOM-001-SEMARNAT-1996.
- d) Mediante el modelo matemático del condensador, estimar la cantidad de agua de enfriamiento requerida para condensar el flujo de vapor proveniente del cristalizador.

### 2.2.5 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO MATEMÁTICO

Validar experimentalmente el modelo matemático del sistema de evaporación condensación, estimar el caudal de agua de alimentación al condensador híbrido en función de la apertura de la válvula de compuerta, para esto es necesario ajustar la presión de vacío de la etapa de evaporación (21.5 inHg), caracterizar el flujo de alimentación por diferencia del nivel del tanque de almacenamiento y determinar el caudal volumétrico de alimentación al condensador híbrido.

Para la validación del modelo matemático, someter 12 litros de agua a 70 °C dentro del cristalizador y 21.5 inHg de presión de vacío, monitorear el comportamiento dinámico de la temperatura de los condensados a la salida del condensador. Mantener la evaporación por 20 minutos y al finalizar se cuantificar por diferencia de volumen la

cantidad de agua evaporada y de agua de enfriamiento suministrada al condensador híbrido.

## 2.2.6 CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DEL PROCESO

Para sintonizar un controlador es necesario obtener el comportamiento dinámico a lazo cerrado del proceso, normalmente representado por un modelo de primer o segundo orden. Los parámetros de estos modelos se pueden identificar a partir de la curva de reacción del proceso.

A partir de la curva de reacción del proceso a una entrada escalón, se debe determinar el instante  $t_{63.2}$ , que corresponde al tiempo requerido para que la respuesta del proceso alcance el 63.2% de su valor final, así como el cambio total en la respuesta  $\Delta T$  a la ganancia de estado estacionario del proceso ( $K$ ), como se muestra en la Figura 2.5.

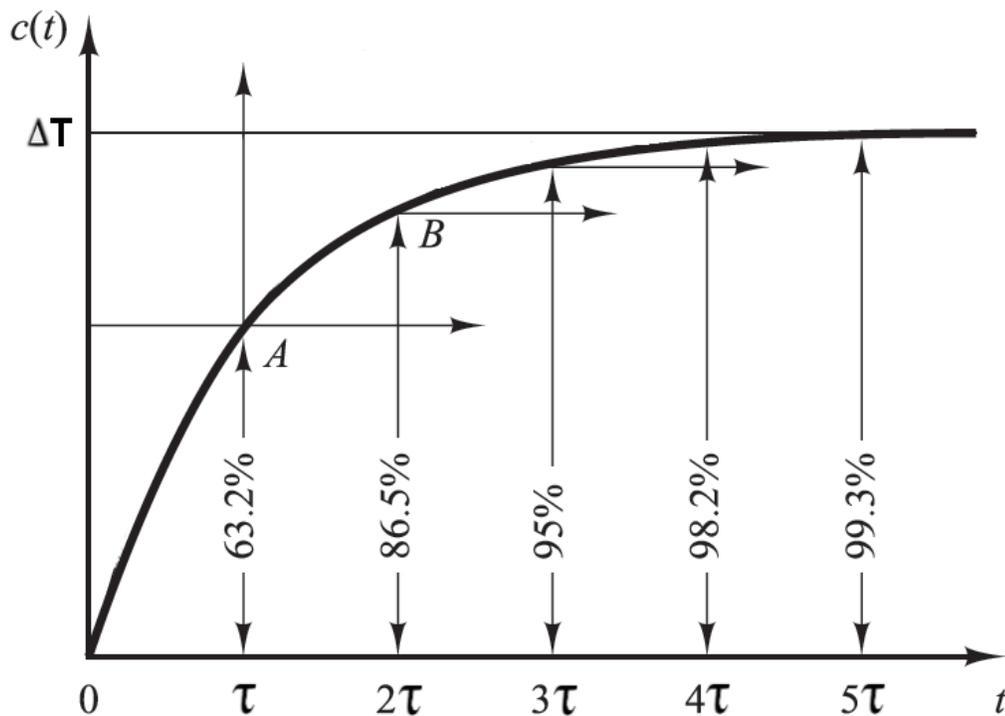
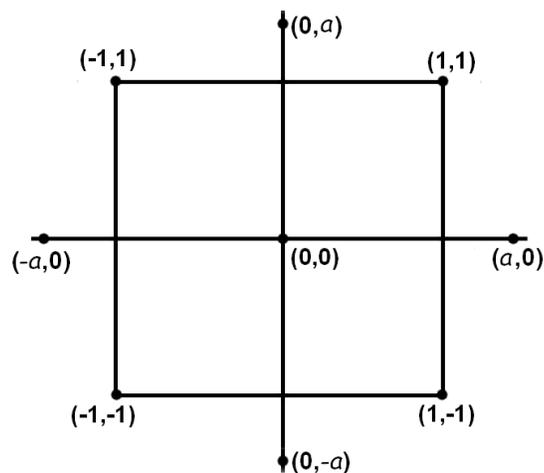


Figura 2.5 Curva de respuesta a lazo abierto

Diseñar un controlador para garantizar que la temperatura de los condensados no exceda los límites que marca la normatividad vigente manipulando el flujo de agua de enfriamiento, además con la finalidad de minimizar los gastos hidráulicos requeridos para el proceso de condensación.

### 2.2.7 OPTIMIZACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Realizar un diseño de experimentos central compuesto  $2^2$  con 2 réplicas y 5 puntos centrales para obtener los parámetros óptimos del funcionamiento del condensador híbrido (Figura 2.6).



**Figura 2.6** Representación del diseño central compuesto

Las variables involucradas en el funcionamiento son: el flujo de agua de enfriamiento en el condensador ( $x_1$ ), y el flujo de agua de servicio a la bomba de vacío de anillo líquido ( $x_2$ ). Realizar las corridas experimentales manipulando las variables  $x_1$  y  $x_2$ .

Evaluar mediante el método de superficie de respuesta el efecto que tienen los flujos de agua ( $x_1$  y  $x_2$ ) en la generación de vacío, también analizar las condiciones óptimas de operación que proporcionan el vacío necesario en el proceso de cristalización y reduzcan el consumo de agua de enfriamiento para la condensación del vapor proveniente del proceso.

## 2.2.8 ELABORACION DEL MANUAL TECNICO DEL CONDENSADOR HÍBRIDO

El sistema de condensación híbrido puede constituir un elemento susceptible de protección a través del registro como modelo de utilidad. El resultado de la configuración realizada, presenta una función diferente y ventajas respecto a las partes que lo integran, por lo que para su registro es necesario contemplar los requisitos para su validación. Los productos protegibles son aquellos que no logran tener las características tecnológicas similares a las de una patente, principalmente en cuanto a la actividad inventiva, para el registro como modelo de utilidad únicamente se necesita que la modificación que se ha realizado presente una función distinta o una mejora en cuanto al funcionamiento o desempeño que tenía el producto.

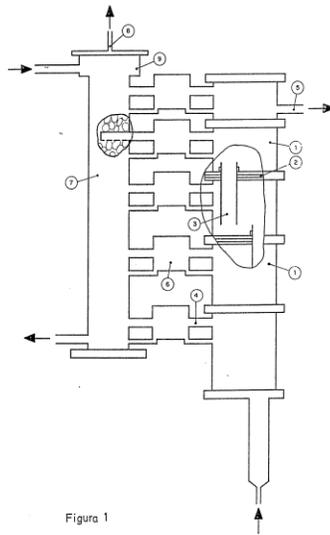
Verificar que el sistema de condensación híbrido pueda obtener los derechos de exclusividad de acuerdo a los artículos 16 y 19 de la Ley de la Propiedad Industrial para su registro como modelo de utilidad.

Realizar una búsqueda de información tecnológica a través de bases de datos en las principales oficinas de patentes, en las cuales se pudo encontrar información de más de 70 países. Se enuncian las principales:

- La Organización Mundial de la Propiedad Intelectual OMPI cuenta con el sitio PATENTSCOPE <http://patentscope.wipo.int/search/es/search.jsf>
- La Oficina Europea de Patentes cuenta con el sitio ESPACENET®, podrá realizar su búsqueda en las páginas:  
<http://www.epo.org/searching/free/espacenet.html>  
<https://register.epo.org/regviewer>
- Los países latinoamericanos publican sus documentos en LATIPAT ®  
<http://lp.espacenet.com/>
- La oficina de marcas y patentes de Estados Unidos de América, USPTO por sus siglas en inglés, cuenta con el sitio <http://www.uspto.gov/>

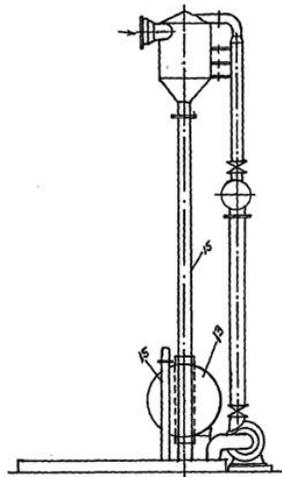


Cambiador de calor barométrico de vaporización súbita y condensador de contacto directo



El cambiador consta de 2 columnas, una de enfriamiento donde se produce la vaporización súbita y otra de calentamiento que es donde se condensa el vapor además la parte superior de la columna está conectada al sistema de vacío.

Condensador barométrico de autosuficiencia hídrica



Condensador barométrico de auto-suficiencia hidráulica cuya función es recircular el agua de los condensados para su uso en calderas o enfriarla para alimentar el condensador

**CAPITULO 3**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

### 3.1 OPERACIÓN DEL SISTEMA DE CONDENSACION HIBRIDO

#### 3.1.1 Reingeniería del condensador por contacto directo

El condensador por contacto directo empleado en este trabajo posee dimensiones fuera del espacio disponible dentro del laboratorio de plantas piloto, por lo que principalmente requirió ciertas modificaciones en cuanto a su tamaño, se recortaron 17.78 cm (7 in) del cuerpo del condensador.

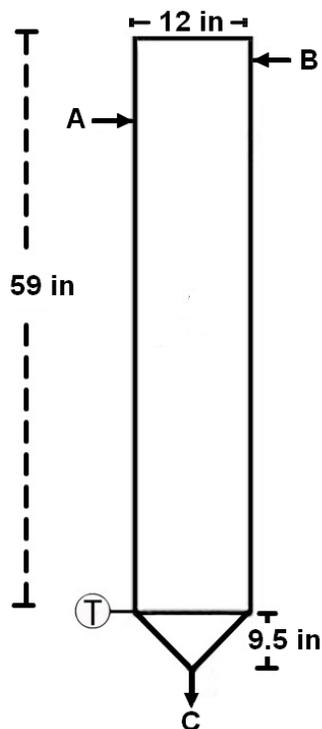
La parte superior del condensador constaba de una tapa unida mediante una brida asegurada por 8 tornillos, sin embargo, la presencia de ésta ocasionaba pérdidas de vacío debido a que no tenía un sellado perfecto entre la unión al condensador, por tal motivo la tapa se retiró y el condensador fue sellado completamente con una tapa de acero para permitir la hermeticidad del condensador.

Para la consistencia de las tuberías se modificaron 2 de los conectores auxiliares del condensador (A y B) a 1.27 cm (1/2 in) de diámetro debido a que las tuberías disponibles en la planta de cristalización son de éste tamaño y anteriormente requería de reductores ocasionando pérdidas de vacío, la salida del condensador se mantuvo en 2.54 cm (1 in) a causa de que es el tamaño de la conexión a la bomba de vacío de anillo líquido. Además, 1 conector fue eliminado del cuerpo del condensador, ya que no era necesaria su permanencia.

Iniciando con la instrumentación del condensador, se colocó un termopozo en la parte inferior del condensador para posteriormente adquirir datos de temperatura de los condensados y así configurar la instrumentación virtual y el diseño del controlador de agua de alimentación del condensador híbrido. Las características geométricas y el diagrama del condensador se muestran en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.1.

**Tabla 3.1** Características geométricas del condensador por contacto directo

Descripción	Especificaciones
Altura total	174 cm (68.5 in)
<b>Cuerpo principal:</b>	
Altura	149.86 cm (59 in)
Diámetro	30.5 cm (12 in)
Conexiones (A y B)	2 Conexiones de 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$ in)
<b>Fondo cónico del condensador:</b>	
Altura	24.13 cm (9.5 in)
Diámetro mayor	30.5 cm (12 in)
Diámetro menor	2.54 cm (1 in)

**Figura 3.1** Configuración del condensador por contacto directo

### **3.1.2 Bomba de vacío de anillo líquido**

La bomba de vacío de anillo líquido (bval) se fijó al suelo para evitar vibraciones que produzcan ruido en los sistemas de adquisición de datos, también para anular la posibilidad de desgaste entre las conexiones de las tuberías. Estos dos equipos (condensador por contacto directo y bomba de vacío de anillo líquido) conforman el condensador híbrido, de esta manera condensa los vapores provenientes del proceso y genera la presión de vacío necesaria para el proceso de cristalización.

### **3.1.3 Alimentación de agua de enfriamiento**

Para llevar a cabo la condensación de los vapores del proceso de cristalización, se usó agua de enfriamiento proveniente de un tanque de agua de enfriamiento colocado a una altura suficiente para que fluya ésta por diferencia de presiones hacia un sistema de aspersion colocado dentro del condensador. Además, posee un termopozo para monitorear la temperatura del agua de enfriamiento y garantizar la condensación del vapor con una temperatura que no altere el equilibrio del ecosistema

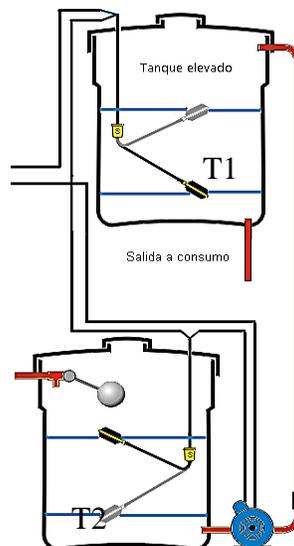
### **3.1.4 Suministro de agua a la bomba de vacío de anillo líquido**

La bomba de vacío requiere de un suministro constante de agua para formar el anillo líquido que además de desalojar gases y condensados, sirve de lubricante para el funcionamiento del equipo. El agua de servicio para la bval se obtiene de un tanque de almacenamiento de agua. Además, en éste tanque desembocan los condensados y el agua de enfriamiento del proceso, también, alimenta al tanque de agua de enfriamiento mediante una bomba cuando se requiere de agua de servicio, logrando un proceso de recirculación entre los tanques de almacenamiento.

### 3.1.5 Control del almacenamiento de agua

Debido al consumo de agua de servicio al condensador, los tanques de almacenamiento cuentan con un par de electroniveles marca Rotoplas, su objetivo es crear un circuito que encienda y apague la bomba hidráulica cuando el sistema lo requiera, de esta manera se logra automatizar el sistema de abastecimiento de agua al condensador. El tanque de almacenamiento (T1) deberá mantener un nivel mínimo de agua por lo que cuando el volumen de agua llega a un nivel crítico, la bomba se enciende por acción del electro nivel y suministra agua proveniente del tanque de almacenamiento T2 hasta satisfacer un nivel adecuado al tanque T1 (Figura 3.2).

El tanque T1 se instrumentó con una válvula solenoide de la marca Parker, para servicio general de agua. Este tipo de válvulas funciona con 110 V, es de dos vías (abierto o cerrado) y normalmente cerrada. El puerto de conexión es de 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$  in). Con este sistema de control, el tanque T1 se vacía cuando la temperatura del agua llega a un punto en la que sea inadecuada para su uso como agua de enfriamiento, al realizar esta acción la bomba automáticamente suministra de agua del tanque T2 a una temperatura menor.



**Figura 3.2** Configuración de electroniveles a los tanques de almacenamiento de agua

### 3.1.6 Reingeniería de las tuberías del proceso de cristalización

Las tuberías de los vapores generados, circulaban por distintas redes de acuerdo el proceso con el que se tratara. Anteriormente, el vapor circulaba en su línea por un condensador de superficie para condensarse, además de una trampa de condensados y finalizaba en el condensador de contacto directo. También se tiene la ruta que dirige a la trampa de mieles para el uso en procesos que la requieran. Se modificaron las tuberías provenientes del cristizador para que tengan una red directa hacia el condensador híbrido y evitar pérdidas de calor a lo largo de su camino. Se añadió la ruta más conveniente aislándola por medio de válvulas de paso. Las líneas que seguían las rutas originalmente, permanecen en el proceso para su uso en futuras investigaciones. Las modificaciones realizadas al proceso, se muestran en la Figura 3.3.

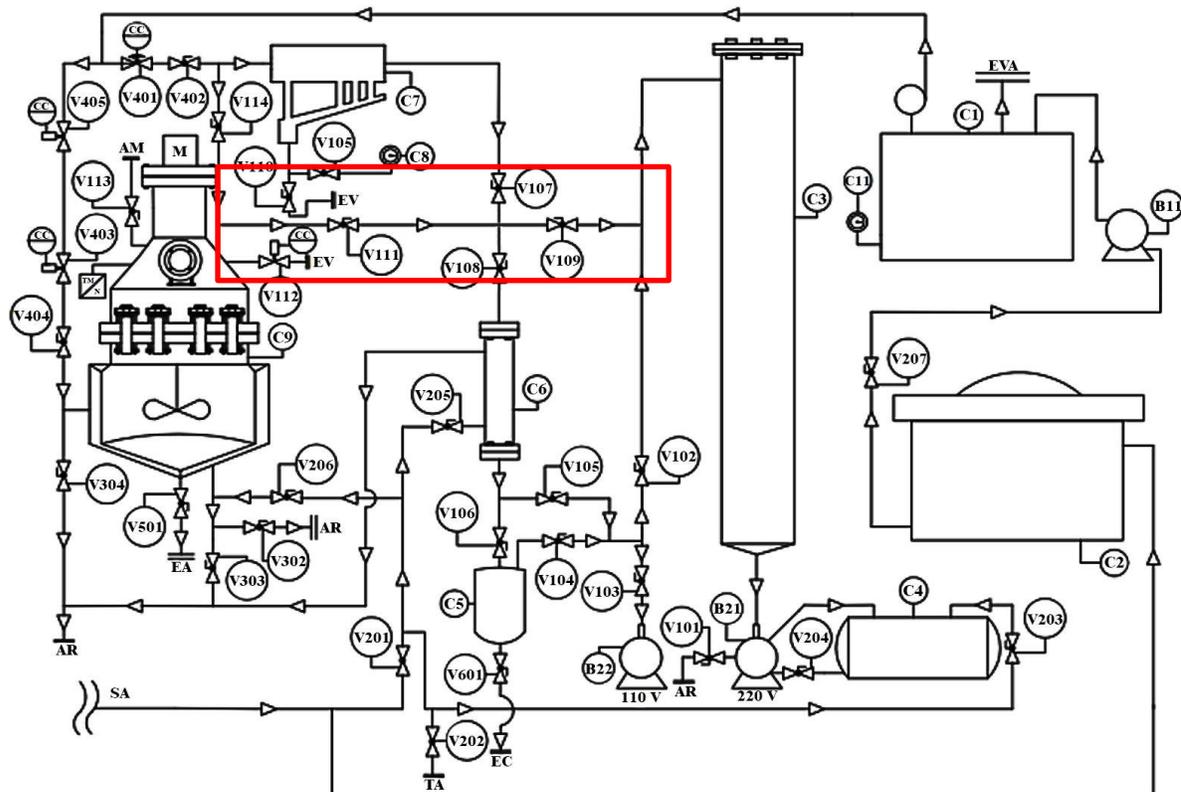


Figura 3.3 Diagrama del proceso de cristalización por lotes a vacío

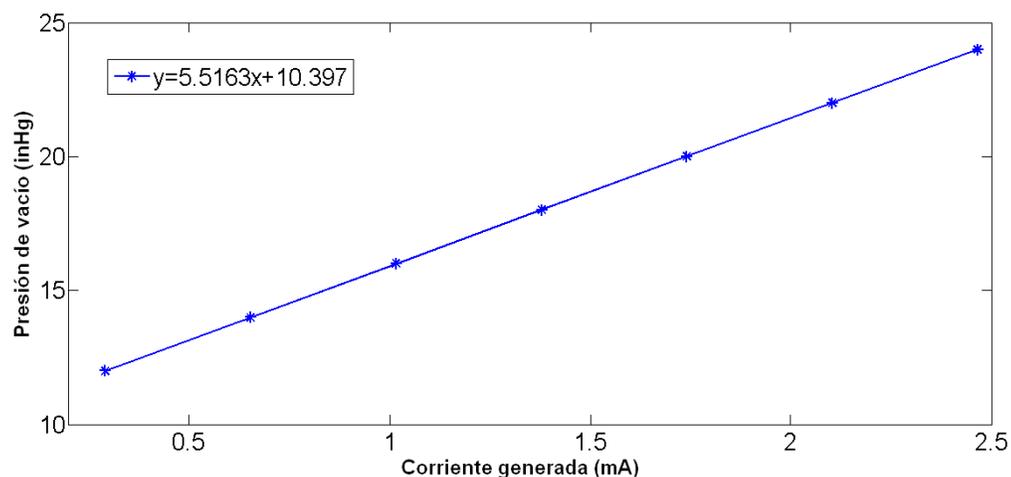
### 3.1.7 Pruebas de hermeticidad

Se realizaron pruebas de hermeticidad al condensador antes de ser montado al proceso de cristalización, también a las modificaciones realizadas en la tapa y a las conexiones auxiliares para asegurar que no presentaran fugas y evitar pérdidas de vacío. Las pruebas se llevaron a cabo con presión de vacío (20 inHg) y aire comprimido, las fugas encontradas fueron soldadas.

Se acopló el equipo de condensación y se realizaron pruebas de hermeticidad a las tuberías que conectan al cristizador con el condensador, se evaluó que las conexiones entre las tuberías (codos, niples, coples, tuerca unión) no tuvieran fugas de vacío, aquellas que presentaron pérdidas de presión fueron corregidas con silicón.

### 3.1.8 Calibración del transductor de presión

Se reemplazó el transductor de presión de vacío para obtener lectura de datos confiables en el proceso, fue necesaria realizar una calibración. Se obtuvo experimentalmente la relación entre la presión de vacío (inHg) y la corriente generada (mA) por el transductor de presión. Los datos obtenidos fueron ajustados a un modelo lineal obteniendo una  $R^2=0.9998$  lo que es adecuado para la medición de la presión de vacío (Figura 3.4).



**Figura 3.4** Modelo lineal de la presión de vacío proporcionada por el transductor

El modelo se integró a la programación gráfica del panel de control en LabVIEW, para observar la presión de vacío ejercida dentro del cristalizador (Figura 3.5).

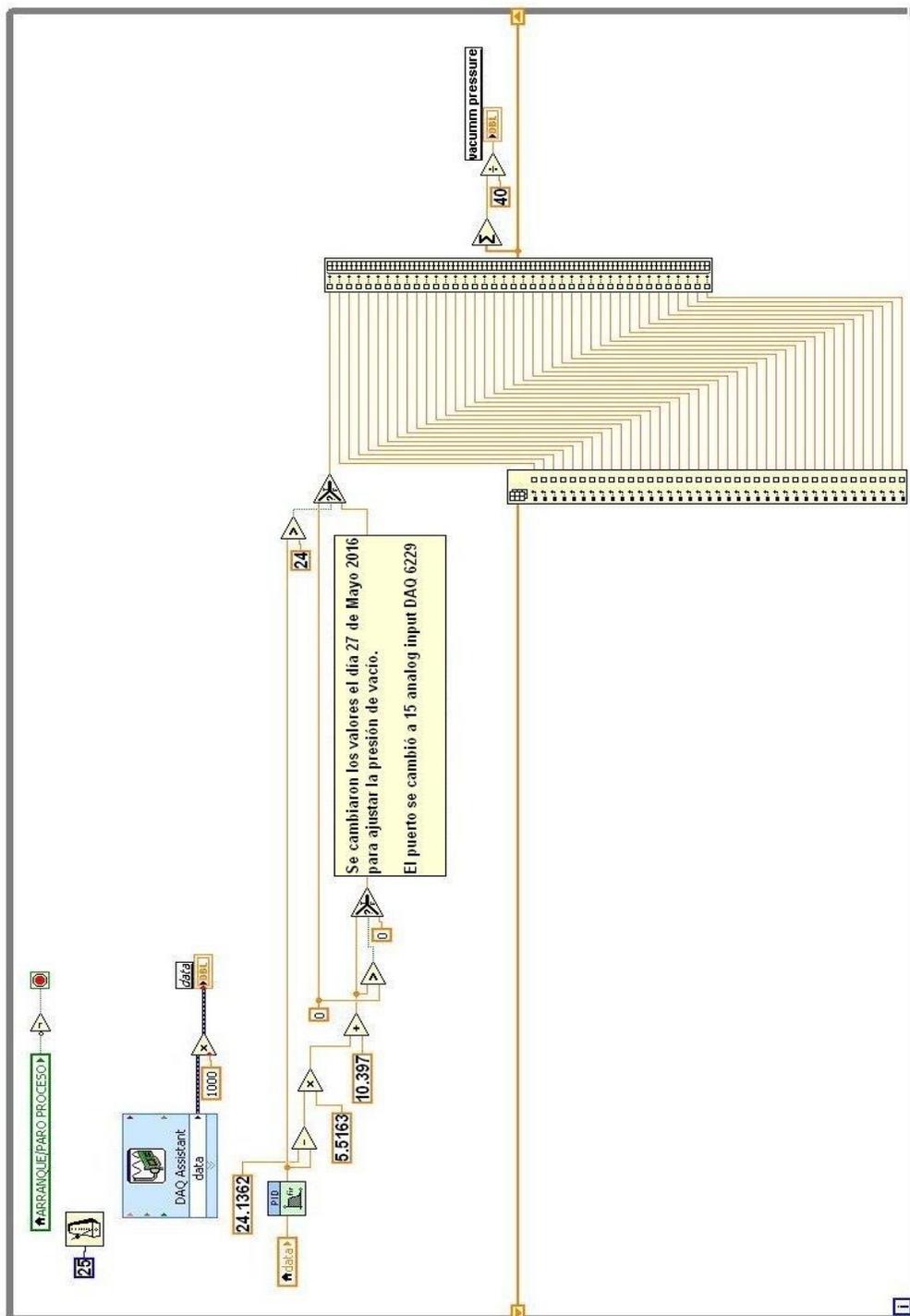


Figura 3.5 Programación del modelo lineal del transductor de vacío en LabVIEW

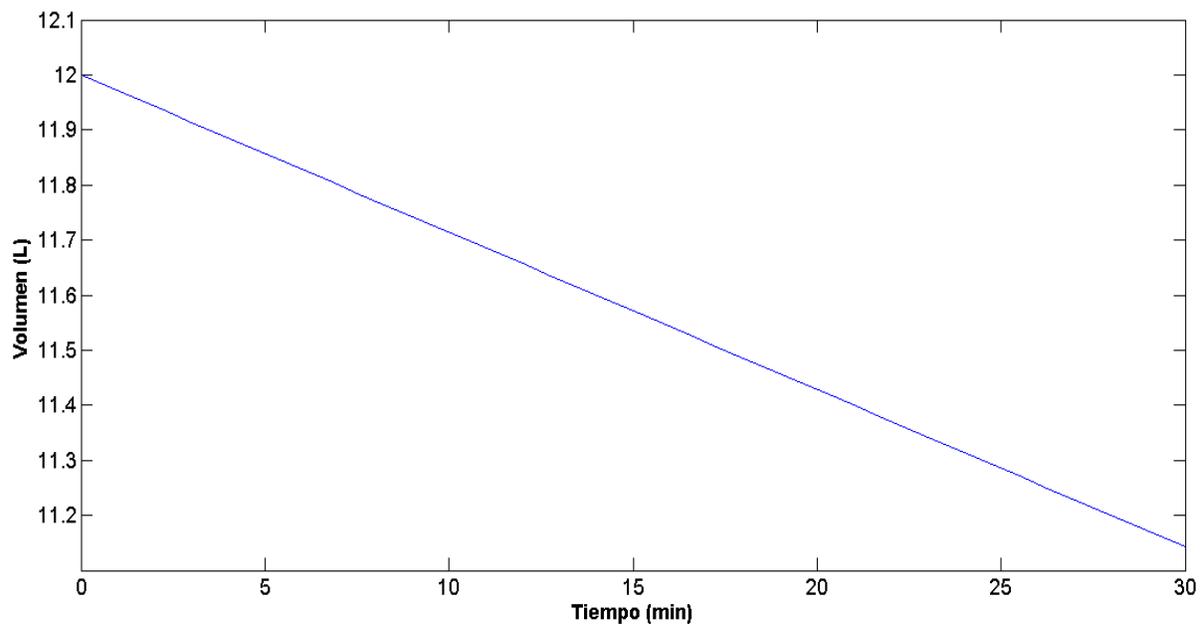
## 3.2 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

### 3.2.1 Balance para la fase líquida dentro del cristizador

Se realizó un balance de la fase líquida en el cristizador (Sección 2.2.2.1 y 2.2.2.2), para conocer de manera precisa el flujo de vapor generado durante los primeros 30 minutos de funcionamiento, aplicando el principio de conservación de la materia.

$$\frac{d(V_l)}{dt} = -\frac{\rho_v V_v h_{fg}}{C_p T_i \rho_l} + \frac{UA(T_{ext} - T_i)}{C_p T_i \rho_l} \quad (2.7)$$

En el Apéndice A, Sección A.1, se presentan las unidades y el análisis dimensional del balance para la fase líquida. El modelo obtenido, fue programado en Matlab y resuelto mediante el método de Runge-Kutta, se obtuvo un comportamiento lineal del flujo de vapor, estos datos fueron ajustados a un modelo de primer orden. La pendiente del modelo representa la velocidad de evaporación del líquido que es de 0.02858 Kg/min (Figura 3.6).



**Figura 3.6** Comportamiento dinámico del volumen de agua evaporada

### 3.2.2 Modelo matemático del condensador

Se realizó el balance másico y energético del condensador para caracterizar el comportamiento dinámico de la temperatura de los condensados (Sección 2.2.3.1 y 2.2.3.2), se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$\frac{d(T_{ag})}{dt} = \frac{\rho_v F_v (h_{fg} - C_{p_{ag}} T_{ag}) + \rho_{ag} F_{age} C_{p_{ag}} (T_{age} - T_{ag}) + UA(T_{amb} - T_{ag})}{\rho_{ag} C_{p_{ag}} V_{ag}} \quad (2.25)$$

En el Apéndice A, Sección A.2, se presentan las unidades y el análisis dimensional del balance energético del condensador. Mediante el comando ode45 en Matlab, se obtuvo la respuesta dinámica a lazo abierto del modelo matemático, la respuesta del modelo representa la temperatura de los condensados, así, con una temperatura de 25 °C y un flujo de 0.5 Kg/min de agua de enfriamiento, el flujo de vapor (0.02858 Kg/min) se condensa y se estabiliza en 34.5 °C (Figura 3.7), lo cual es una temperatura adecuada debido a que la NOM-001-SEMARNAT-1996 marca un límite de 40°C para los desechos líquidos vertidos al drenaje público.

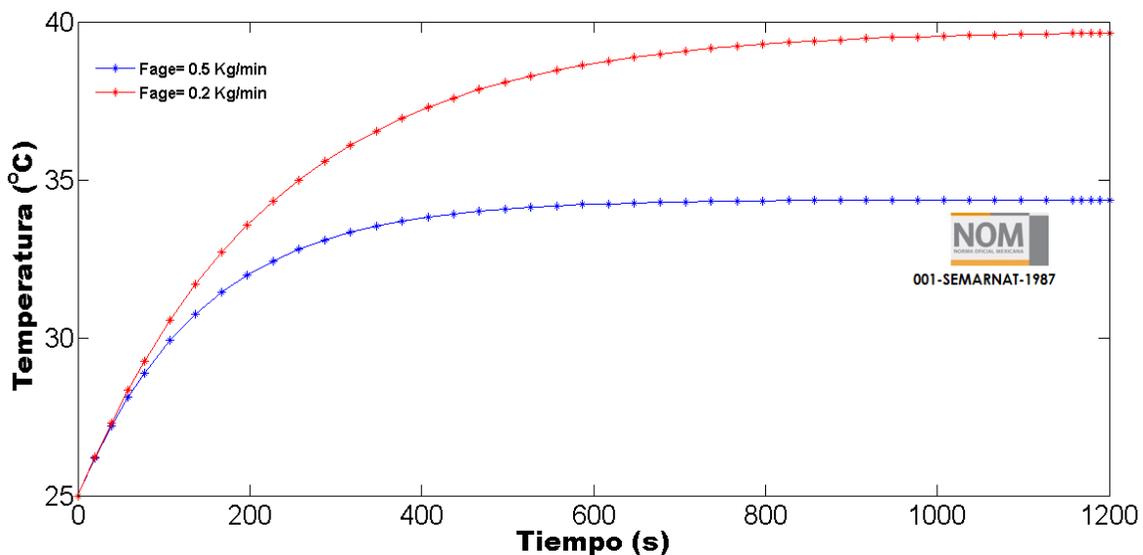


Figura 3.7 Respuesta dinámica de la temperatura de los condensados

### 3.2.3 Evaluación experimental del modelo matemático

Se realizó el monitoreo de la temperatura de los condensados por medio de un termopozo colocado en la parte inferior del condensador para compararlo con los resultados predichos por el modelo matemático, el flujo de agua de enfriamiento utilizado se determinó al finalizar la corrida por diferencia de nivel dentro del tanque, se suministró 1.014 Kg/min de agua de enfriamiento a 0.09456 Kg/min de vapor generado. En la Figura 3.8, se presenta la evaluación del modelo con los datos experimentales obtenidos.

La temperatura de estabilización de los condensados determinada por el modelo matemático es de 47.5 °C (línea roja), mientras que los datos experimentales se estabilizan a los 48 °C (línea azul) por lo que el modelo representa un comportamiento adecuado, el efecto oscilatorio de la validación experimental se atribuye a los cambios de calor suministrado al cristizador para controlar la temperatura del líquido, de igual manera se observa un tiempo de estabilización de 300 segundos en los datos experimentales. El comportamiento dinámico del tiempo de estabilización del modelo matemático fue ajustado para representar de manera adecuada los datos experimentales.

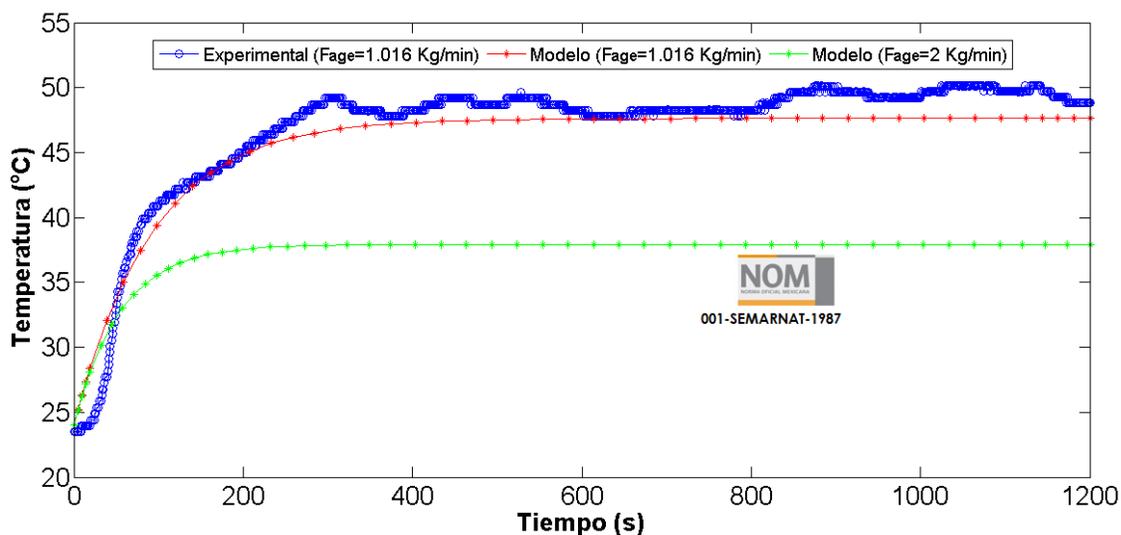
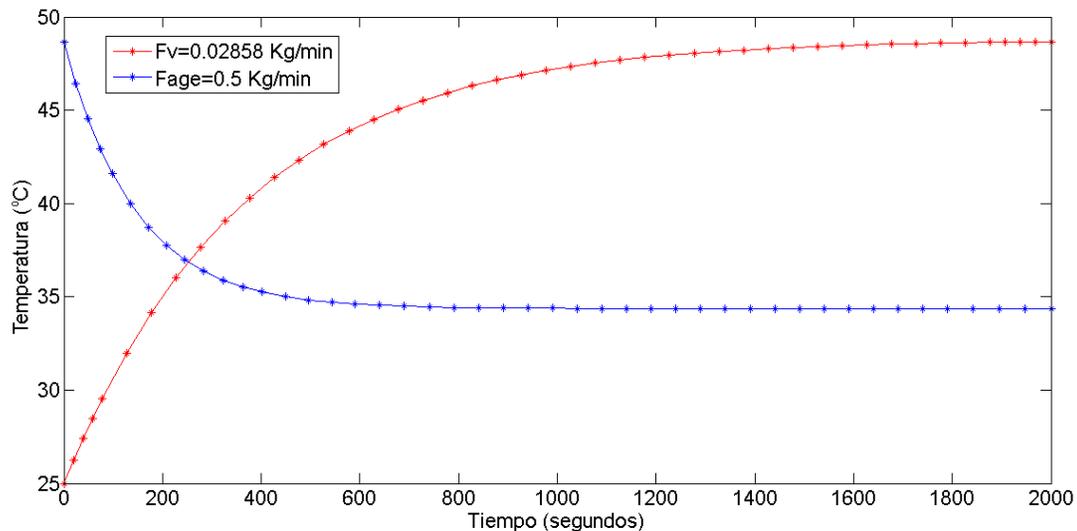


Figura 3.8 Evaluación experimental del modelo matemático

De acuerdo a los resultados de la simulación, este sistema permitirá condensar los vapores del proceso a 38 °C con un tiempo de estabilización de 200 segundos y un flujo de agua de enfriamiento de 2 Kg/min para que la temperatura de los condensados se encuentre dentro de los límites que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMA-1996, con esto se logran obtener las condiciones adecuadas para condensar los vapores del proceso minimizando en un 75 el consumo energético e hidráulico para la operación del sistema de condensación híbrido.

### 3.2.4 Sintonización de un controlador tipo feedback

La Figura 3.9 muestra la curva de reacción del proceso, la función de transferencia del condensador híbrido, se obtuvo a partir de la curva de reacción del proceso a lazo abierto.



**Figura 3.9** Curva de reacción del sistema de condensación híbrido

El sistema muestra un comportamiento de primer orden (Ecuación 3.1).

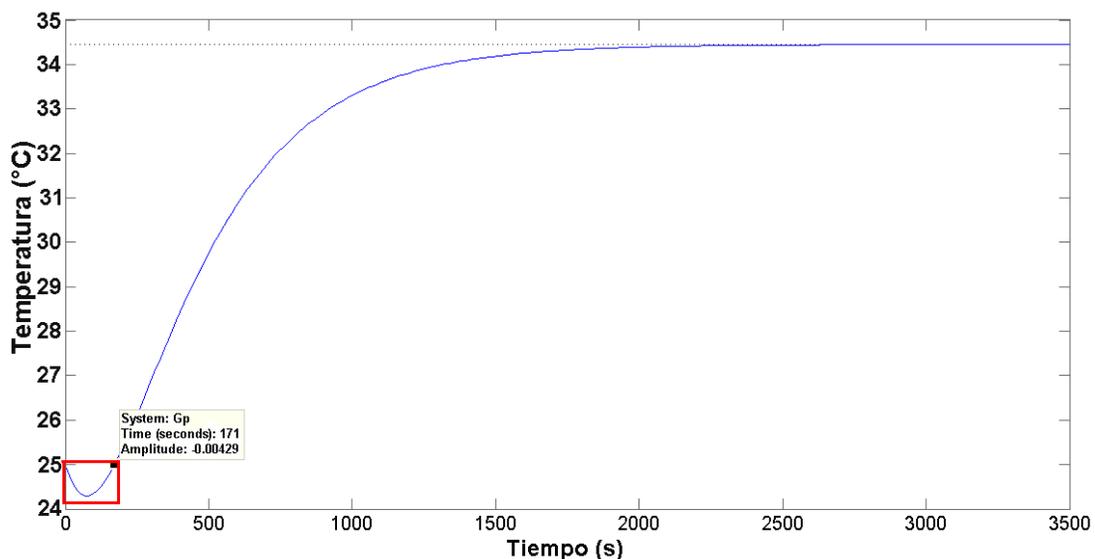
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.1)$$

Se obtuvo la función de transferencia teniendo como variables manipuladas los flujos de entrada de vapor y agua de alimentación al condensador (Ecuación 3.2).

$$T(s) = \frac{22.8818}{336s + 1}Fv(s) - \frac{13.4336}{150s + 1}Fage(s) \quad (3.2)$$

donde  $F_v(s)$  y  $F_{agi}(s)$  es el cambio escalón introducido de 0.028 kg/min y 0.5 kg/min respectivamente. En la Figura 3.10 se muestra el comportamiento de la función de transferencia obtenido y se observa que exhibe un comportamiento de respuesta inversa marcada con el cuadro rojo (del tiempo 0 a los 170 segundos) con una amplitud de 0.8 unidades.

El comportamiento de respuesta inversa constituye un desafío para la implementación de estrategias de control eficientes, por las dificultades y el carácter crítico de las variables involucradas, por lo que fue necesario realizar un ajuste que corrija tal comportamiento. Es decir, el sistema opera de manera contraria al comportamiento lógico esperado ocasionando que el controlador envíe señales equivocadas al elemento final del control.

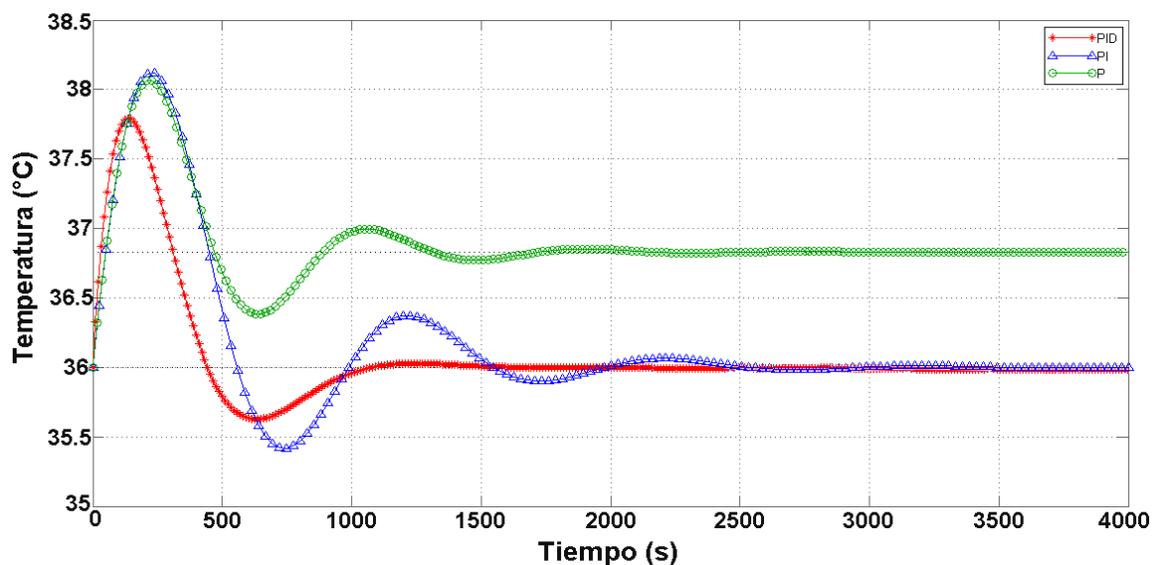


**Figura 3.10** Comportamiento de la función de transferencia del condensador híbrido

Se realizó la sintonización del controlador por el método de Ziegler & Nichols (Ogata, 2010), para establecer un control regulador de temperatura a los condensados ante posibles perturbaciones como el incremento del vapor generado, el calor suplido al cristizador en la etapa de evaporación, la temperatura externa al condensador y el aire de entrada debido al control de vacío. Puesto que la normatividad permite una temperatura máxima de descarga de 40 °C. En la Tabla 3.2, se presentan los parámetros obtenidos de la sintonización para los diferentes controladores y en la Figura 3.11 se muestra el comportamiento obtenido por simulación ante una perturbación del flujo de vapor del 30% en exceso.

**Tabla 3.2** Parámetros obtenidos de la sintonización por Ziegler & Nichols

Controlador	$K_c$	$\tau_i$	$\tau_d$	$K_c/\tau_i$	$K_c \cdot \tau_d$
P	0.2246	---	---	---	---
PI	0.2042	516.6667	---	0.0004	---
PID	0.2642	310	77.5	0.0008	20.4755

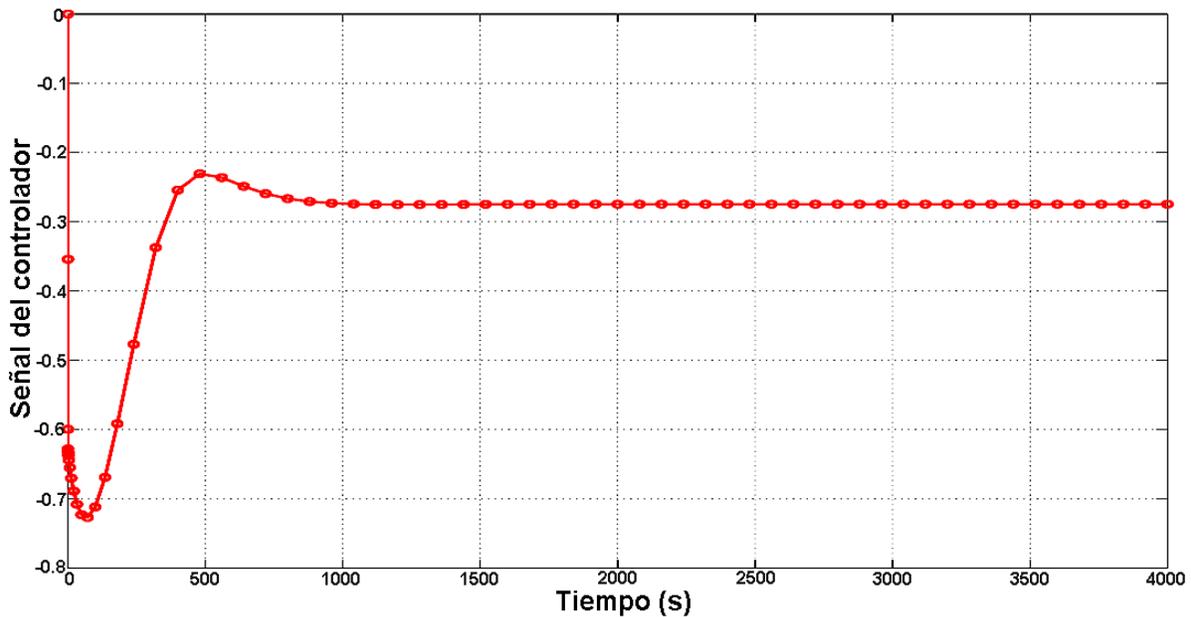


**Figura 3.11** Efecto de los controladores: P, PI y PID sobre el sistema (regulador)

El controlador que satisface la condición de temperatura es el PID, obteniendo un control adecuado, menor sobretiro de la temperatura al reducir el error entre el punto de ajuste y menor tiempo de estabilización, garantizando que la temperatura no

exceda los límites establecidos reduciendo el consumo hidráulico en el sistema de condensación.

En la Figura 3.12, se muestra el comportamiento de la señal del controlador PID ante la perturbación en el flujo de vapor.



**Figura 3.12** Comportamiento de la señal del control PID ante una perturbación del flujo de vapor

Puede observarse la acción correctora del control PID ante la perturbación, el comportamiento es inversamente análogo a la respuesta de la temperatura y llega a un punto estable de -2.8, lo cual compensaría la perturbación en el sistema de condensación.

Se diseñó un compensador de respuesta inversa con la metodología descrita en el Apéndice B, En la Figura 3.13, se muestra el efecto del control regulador con un compensador de respuesta inversa, se observa que el efecto del compensador reduce el sobretiro negativo de la temperatura, lo que beneficiaría al reducir el consumo hidráulico en el proceso de condensación.

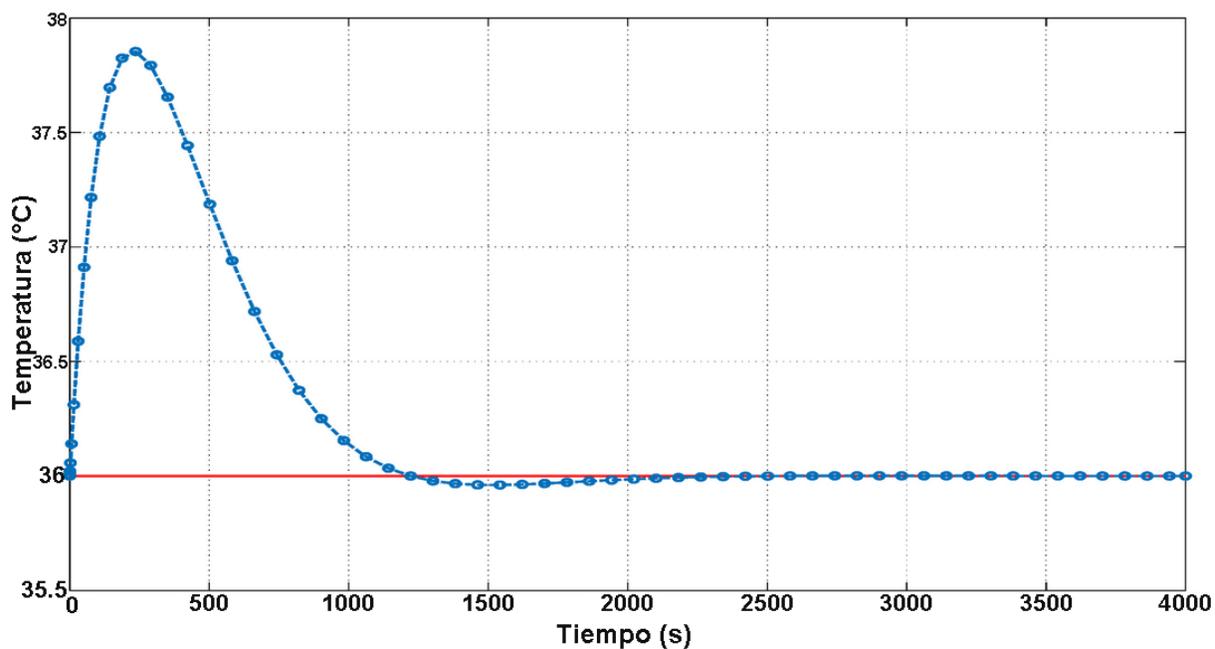


Figura 3.13 Efecto del compensador de respuesta inversa al sistema regulador

Para un sistema servo, se presenta el comportamiento de los controladores P, PI y PID para una temperatura de estabilización de 36 °C y un cambio escalón del flujo de agua de alimentación (Figura 3.14).

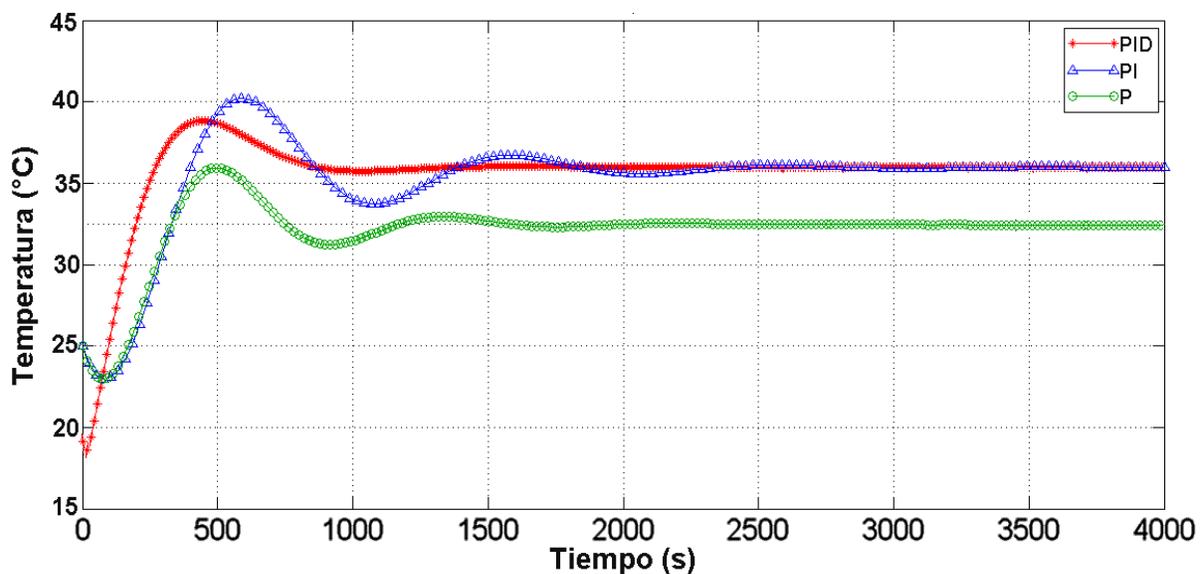
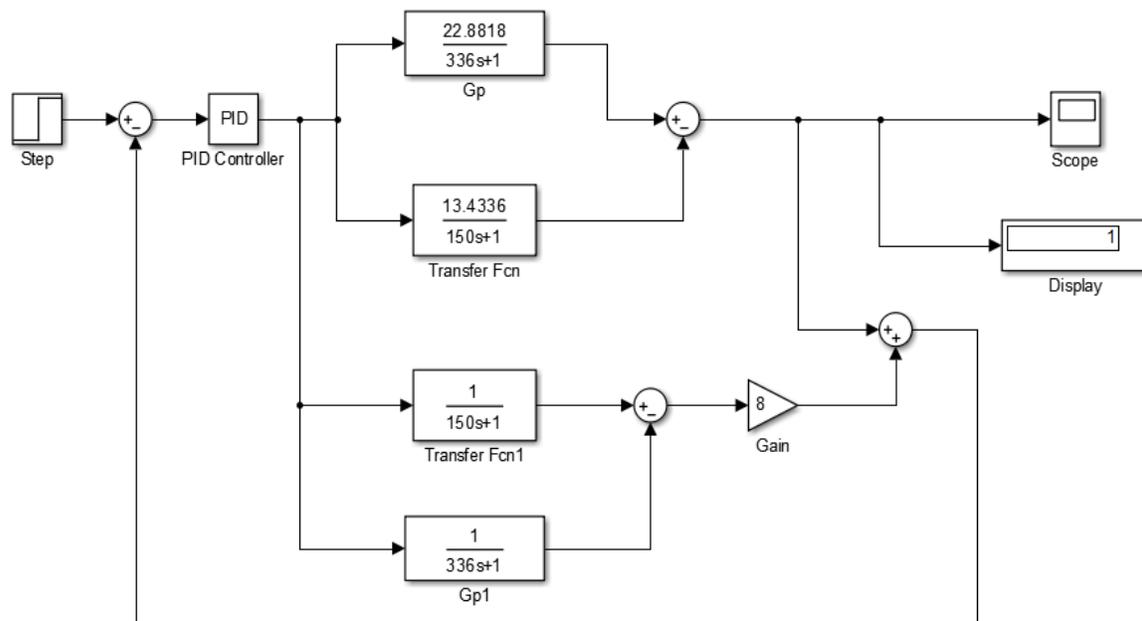


Figura 3.14 Efecto de los controladores: P, PI y PID sobre el sistema (servo)

El sistema PID muestra un menor tiempo de estabilización y un menor sobretiro sobre la temperatura, a diferencia de los controladores P y PI el comportamiento oscilatorio es menor, lo que reduce el uso de agua para controlar la temperatura de los condensados, sin embargo, exhibe el comportamiento de respuesta inversa, por lo que se aplicó la metodología descrita en el Apéndice B para reducir tal efecto.

En la Figura 3.15 se presenta el diagrama de bloques con el compensador de respuesta inversa y un controlador PID con los parámetros de la Tabla 3.2 ( $K_c=0.2642$ ,  $K_i=00008$ ,  $K_d=20.47$ ).



**Figura 3.15** Diagrama de bloques con compensador de respuesta inversa

La Figura 3.16 muestra el efecto del compensador de respuesta inversa. Se observa que el compensador de respuesta inversa reduce en un 70% (de 7 a 2.5) tal efecto, además, se reduce el sobretiro del sistema presentando por lo que constituye un comportamiento adecuado para el control de la temperatura sin exceder los límites establecidos por la normatividad.

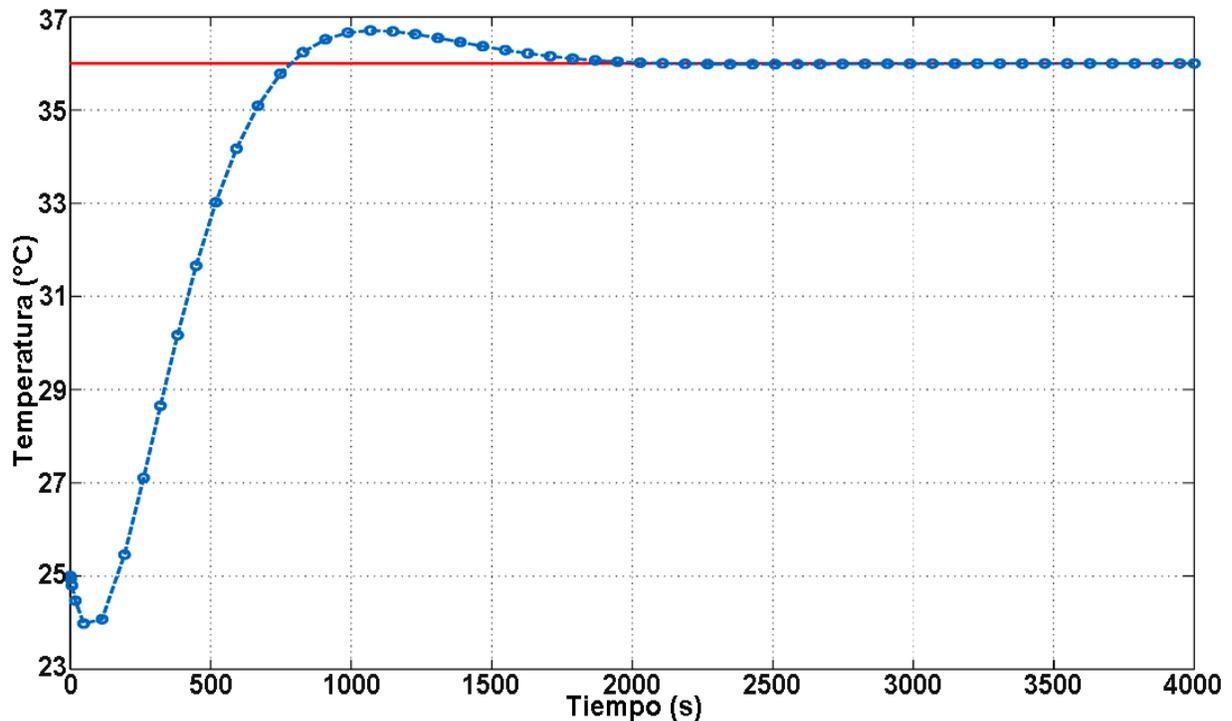


Figura 3.16 Efecto del compensador de respuesta inversa sobre el sistema controlado

### 3.3 EVALUACION DEL CONDENSADOR HIBRIDO

#### 3.3.1 Diseño central compuesto

Se realizó un diseño central compuesto con 5 puntos centrales y 1 replica para determinar el efecto del flujo de agua de enfriamiento al condensador y del flujo de agua de alimentación a la bomba de vacío sobre la presión de vacío ejercida dentro del cristalizador, con el fin de obtener las condiciones de operación óptimas para la generación de vacío, además, minimicen el consumo de agua en el proceso cristalización. En la Tabla 3.3, se presenta el diseño experimental con las variables involucradas en sus distintos niveles, también los resultados obtenidos en cada tratamiento. El análisis de los datos experimentales se realizó con el software NCSS 2000.

**Tabla 3.3** Datos experimentales del diseño central compuesto

X1		X2		Y	
Variable natural (% de apertura de la válvula de la bomba de vacío)	Variable codificada	Variable natural (% de apertura de la válvula del condensador)	variable codificada	Variable de respuesta (presión de vacío en inHg)	
25	-1	25	-1	24.4	24.14
25	-1	75	1	23.78	23.93
75	1	25	-1	24.31	24.03
75	1	75	1	23.54	23.9
14.65	-1.414	50	0	23.65	23.65
85.35	1.414	50	0	23.73	23.88
50	0	14.65(13°)	-1.414	24.1	24.22
50	0	85.35(77°)	1.414	23.51	23.86
50	0	50	0	23.58	23.6
50	0	50	0	23.72	23.63
50	0	50	0	23.73	23.59
50	0	50	0	23.7	23.54
50	0	50	0	23.88	23.25

### 3.3.2 Análisis de los resultados experimentales

En la Tabla 3.4 se muestra el análisis de varianza de los resultados experimentales obtenidos, se observa el factor que tiene un mayor efecto en la presión de vacío es el flujo en la válvula de agua al condensador (F-Ratio = 10.09), el flujo en la válvula a la bomba de vacío y la interacción entre los flujos de ambas válvulas no presentan un efecto significativo en la presión de vacío. Se realizó una comparación de medias por el método de Turey-Krmer para respaldar los resultados obtenidos del análisis de varianza.

**Tabla 3.4** Análisis de varianza de los datos experimentales

<b>Analysis of Variance Table</b>						
<b>Source</b>		<b>Sum of</b>	<b>Mean</b>		<b>Prob</b>	<b>Power</b>
<b>Term</b>	<b>DF</b>	<b>Squares</b>	<b>Square</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>Level</b>	<b>(Alpha=0.05)</b>
A: Válvula de la bomba	1	0.0276125	0.0276125	0.74	0.437873	0.103371
B: Válvula del condensador	1	0.3741125	0.3741125	<b>10.04</b>	0.033904*	0.664149
AB	1	0.0006125	0.0006125	0.02	0.904171	0.051168
S	4	0.14905	0.0372625			
Total (Adjusted)	7	0.5513875				
Total	8					

\* Term significant at alpha = 0.05

En la Tabla 3.5, se observa que las medias de presión de vacío, los niveles del flujo a la bomba no son significativamente diferentes, sin embargo, las medias de vacío para los niveles de flujo en la válvula al condensador muestran un efecto sobre la variable de respuesta generando un mayor vacío (24.22 inHg) dentro del cristalizador en el nivel bajo (-1) de la válvula del condensador.

**Tabla 3.5** Comparación de medias por el método de Tukey-Kramer

Respuesta: presión de vacío en inHg

Term A: válvula de la bomba de vacío de anillo líquido

Alpha=0.050 Error Term=S(AB) DF=4 MSE=0.0372625 Critical Value=3.92

<b>Group</b>	<b>Count</b>	<b>Mean</b>	<b>Different From Groups</b>
1	4	23.945	
-1	4	24.0625	

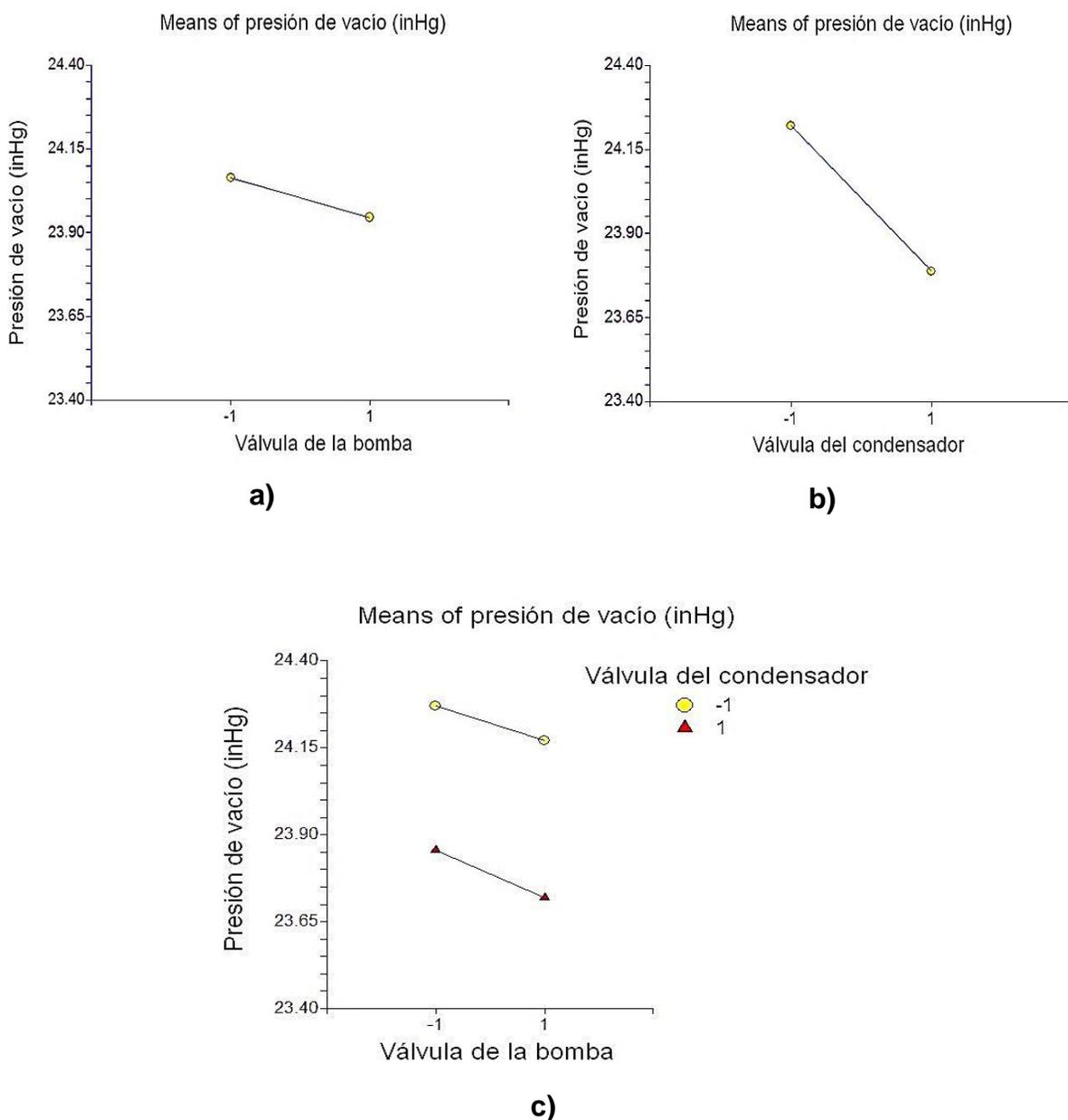
Term B: válvula de alimentación de agua al condensador

Alpha=0.050 Error Term=S(AB) DF=4 MSE=0.0372625 Critical Value=3.92

<b>Group</b>	<b>Count</b>	<b>Mean</b>	<b>Different From Groups</b>
1	4	23.7875	-1
-1	4	24.22	1

En la Figura 3.17 se presentan los efectos los niveles de cada factor en la variable de respuesta, el flujo de la válvula a la bomba no presenta un efecto significativo (Figura 3.17a), sin embargo, se puede notar que un nivel bajo (-1) presenta un ligero aumento en la presión de vacío. El flujo en la válvula al condensador (Figura 3.17b) presenta una respuesta mayor en el nivel bajo (-1) validando lo observado en el ANOVA. La interacción de los factores no muestra un efecto en la presión de vacío

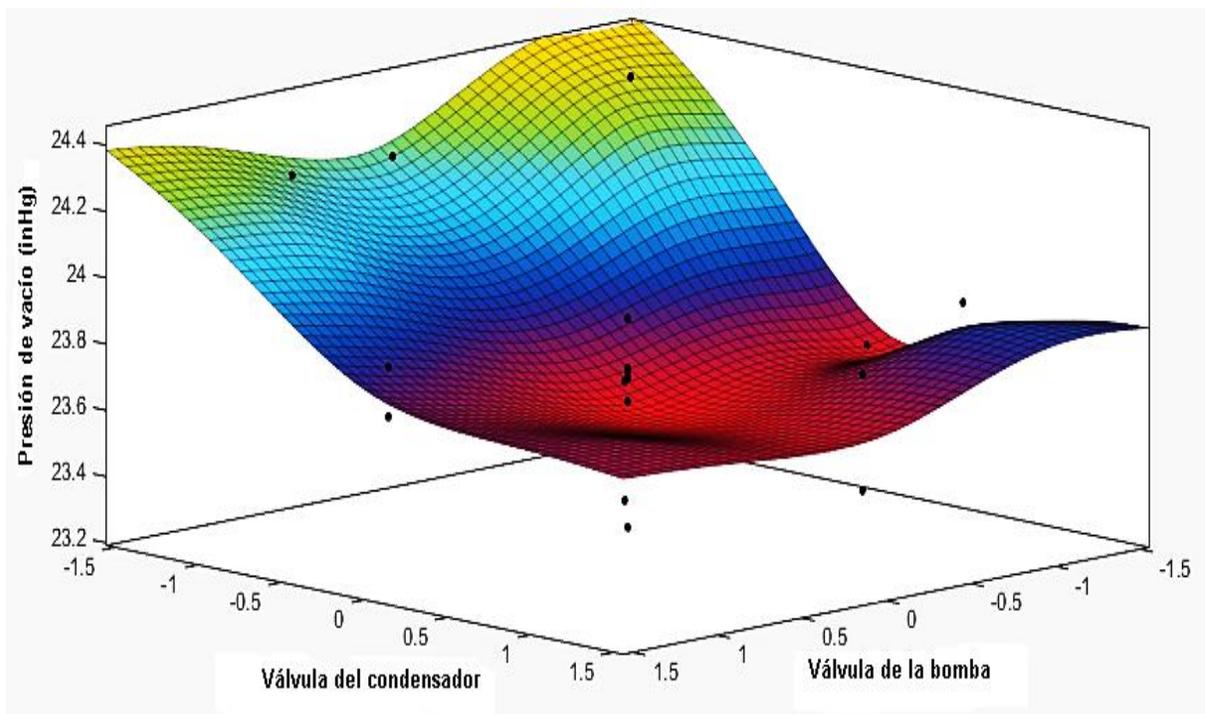
(Figura 3.17c), pero puede observarse que el nivel bajo (-1) de la válvula al condensador es quien proporciona una mayor presión de vacío en el cristalizador por lotes tal como se observó en la comparación de medias de Tukey-Kramer.



**Figura 3.17** Efectos de los factores sobre la presión de vacío: a) válvula a la bomba de vacío, b) válvula al condensador y c) interacción de ambas válvulas

### 3.3.3 Optimización por superficie de respuesta

Se realizó el análisis de superficie de respuesta (Figura 3.18), la región amarilla representa la respuesta máxima (óptimo local) en la presión de vacío para la cual es necesario mantener la alimentación de agua al condensador en un nivel bajo (apertura de la válvula al 25%) al igual que la alimentación a la bomba de agua. También, se puede observar que la alimentación de agua a la bomba de vacío no influye drásticamente en la respuesta esperada puesto que ambos niveles (apertura de la válvula al 25% y 75%) presentan una respuesta estable (24.4 inHg). La parte de color negro, representa el valor mínimo de presión de vacío, como se observa se localiza en los niveles centrales de los factores (0,0), esto indica que, con un flujo de agua mayor en la entrada del condensador, el vacío disminuye dentro del cristizador, resultando las condiciones límite de operación para garantizar la operación.



**Figura 3.18** Gráfica de superficie de respuesta para el diseño central compuesto

En la Figura 3.19 se presenta la gráfica de contornos, el punto óptimo para maximizar la presión de vacío (> a 24.4 inHg), se alcanza en los niveles bajos de la apertura de ambas válvulas (25 %, 25 %). De igual manera podemos observar que el flujo al condensador tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta al observarse distintas secciones que caracterizan la presión de vacío, por otro lado, el flujo de alimentación a la bomba no influye significativamente.

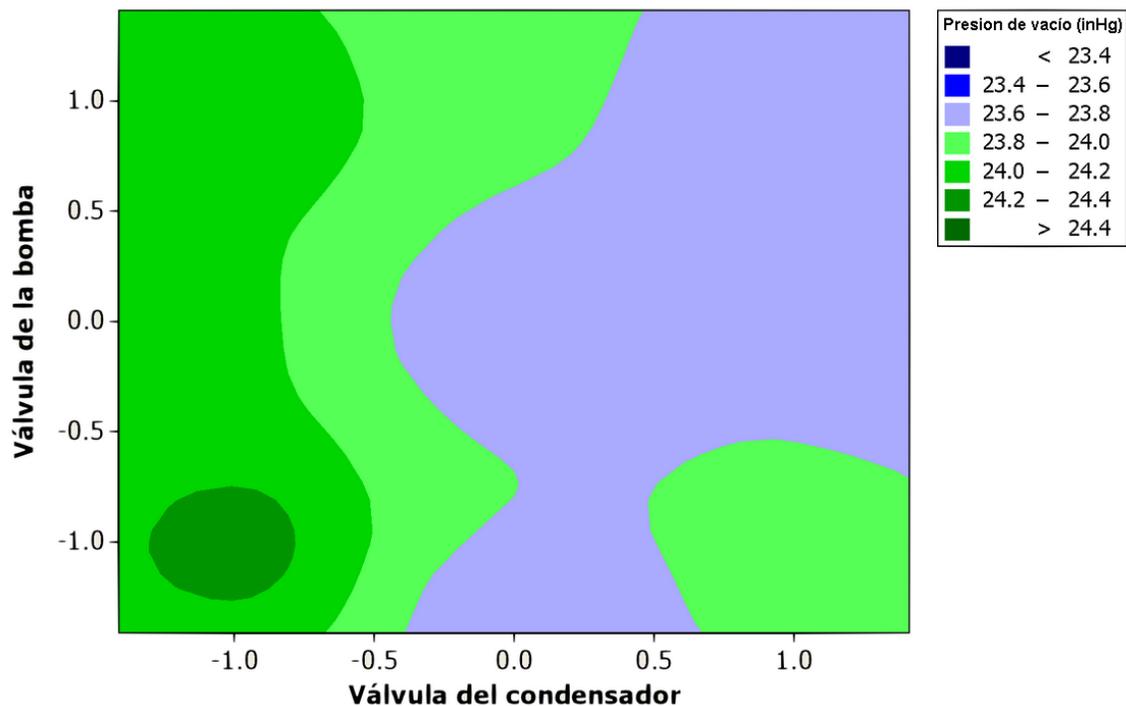


Figura 3.19 Gráfico de contornos de datos experimentales de diseño central compuesto

### 3.3.4 Análisis canónico

Los datos experimentales se ajustaron a un modelo de segundo orden (Ecuación 3.3) y posteriormente se realizó un análisis canónico obtener los valores óptimos que maximicen la presión de vacío generada dentro del cristizador.

$$y = (23.62198) - (1.97904e^{-3}) * x_1 + 9.746239e^{-2} * x_1^2 - (0.1921103 * x_2 - (0.00875) * x_1 * x_2 + (0.1949918 * x_2^2) \quad (3.3)$$

En la Ecuación (3.5) se muestran la matriz de coeficiente de regresión de primer orden. A partir de estos datos se utilizaron las Ecuaciones 3,6 y 3.7 para obtener los puntos óptimos (Ecuación 3.8) y la respuesta predicha (Ecuación 3.9) en el punto estacionario, respectivamente. Finalmente, se obtuvieron los valores propios (Ecuación 3.10) los cuales presentaron signos positivos, revelando así la existencia de un mínimo.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.00197904 \\ -0.1921103 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$X_0 = \frac{-1}{2} B^{-1} b \quad (3.6)$$

$$\gamma_0 = \beta_0 + \frac{1}{2} X_0 b \quad (3.7)$$

$$\text{Puntos óptimos} = \begin{bmatrix} 0.032 \\ 0.493 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\gamma_0 = 23.573 \quad (3.9)$$

$$\text{eigenvalores} = \begin{bmatrix} 0.097 \\ 0.195 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

### 3.4 MODELO DE UTILIDAD

El sistema de condensación híbrido es viable para su registro como modelo de utilidad ya que es el resultado de un cambio en su disposición, configuración, estructura y además presenta una función distinta respecto a las partes que lo

integran, el condensador híbrido es la combinación de un condensador por contacto directo y una bomba de vacío de anillo líquido. El propósito de esta configuración es evaporar el solvente de una solución por efecto del enfriamiento adiabático ocasionado por el vacío generado dentro del equipo, también los vapores generados deben descargarse en forma líquida lo que ocurre con la condensación del vapor generado por medio de agua de enfriamiento.

Este sistema no presenta una actividad inventiva para su registro como patente, sin embargo, el modelo de utilidad no requiere de este requisito, por lo que la modificación que se ha hecho, presenta una función distinta y una mejora en cuanto a la optimización del funcionamiento que presentan los condensadores convencionales.

El estado de la técnica determinó que no existe algún dispositivo con la configuración idéntica al condensador híbrido. Se realizó el manual técnico del sistema de condensación híbrido para iniciar con el registro como modelo de utilidad ante el IMPI.

Para el cumplimiento del objetivo específico 4, se desarrolló el manual técnico del condensador. Este no se incluye en la presente tesis ya que se procederá a su registro como modelo de utilidad ante el IMPI. Lo anterior cuenta con la autorización del consejo de posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.

## **CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES

Se realizó la reingeniería del condensador, así como de las tuberías del sistema de cristalización, con el fin de obtener datos confiables que representen el proceso de cristalización por lotes a vacío de la industria azucarera

Se ha propuesto el modelo matemático de la etapa de evaporación-condensación, para predecir el comportamiento dinámico de la temperatura de los condensados y minimizar los gastos energéticos e hidráulicos en el proceso de cristalización.

Se realizó la evaluación experimental del modelo matemático, se observó un comportamiento satisfactorio sobre la temperatura de los condensados, por lo que es un modelo adecuado para analizar las condiciones de operación en el proceso de cristalización por lotes a vacío bajo la normatividad vigente respecto a la temperatura del agua.

Se obtuvo el comportamiento dinámico a lazo cerrado del condensador híbrido, de igual manera se diseñó un controlador PID para la temperatura de los condensados. Se aplicó un compensador de respuesta inversa para mitigar el efecto inverso del sistema.

La instrumentación y automatización, de los tanques de almacenamiento permitieron un mejor control de las variables que afectan el desempeño del sistema de condensación, además garantizaran el suministro constante de agua al condensador y a la bomba de vacío, lo que beneficiará futuras investigaciones en el proceso de cristalización por lotes a vacío.

El diseño de experimento, proporcionó de manera adecuada los parámetros de operación del sistema de condensación para maximizarla presión de vacío dentro del

cristalizador por lotes. También hace notar que el flujo de agua a la bomba de vacío, no influye de manera drástica en el desempeño del sistema de condensación.

El flujo de agua de alimentación al condensador híbrido tiene un efecto significativo en el vacío generado, si el flujo de agua de enfriamiento se minimiza, se obtiene un mejor desempeño del condensador híbrido reduciendo gastos innecesarios de consumo de agua.

El sistema de condensación híbrido es viable para su registro como modelo de utilidad debido a que es el resultado de un cambio en la configuración, estructura y además presenta una función distinta respecto a las partes que lo integran.

La función del condensador híbrido es evaporar el solvente de una solución por efecto del enfriamiento adiabático ocasionado por el vacío generado dentro del equipo y condensar los vapores por medio de agua de enfriamiento.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alvarado, S., J. 2009. Optimización de la operación del sistema presión de vapor del proceso de cristalización batch, empleando el método de superficie de respuesta. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
2. Badger, W.L., Banchero, J.T. 1986. Introducción a la Ingeniería Química, McGraw-Hill. USA.
3. Bolaños, R.E., Xaca, X.O., Álvarez, R.J., López, Z.L. 2008. Effect analysis from dynamic regulation of vacuum pressure in an adiabatic batch crystallizer using data and image acquisition. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47 (23): 9426-9436.
4. Berckmann, W., 2013. Crystallization: basic concepts and industrial applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany.
5. Burns, N. 2000. Alcoholic Crystallization of Sucrose. Individual Inquiry, Department of Chemical Engineering, University of Queensland, Australia.
6. Carrillo, A.J. 2006. Desarrollo y simulación de estrategias para el control no lineal de la sobresaturación en la cristalización por lotes a través de perfiles dinámicos de regulación de vacío y estimación de parámetros. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
7. Choong, R.S., 2004. Optimization of batch cooling crystallization, *Chemical Engineering Science*. 59: 313-327.
8. De la rosa, G.H., 2012. Implementación de un sistema SCADA para la mezcla de dos sustancias en una industria química. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. México.

9. Domínguez, M.C.A., Bravo, A.H., Sosa, E.R., 2014. prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería investigación y tecnología*. 15 (4): 549-560.
10. Geankoplis, C. J. 2006. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. Continental. México.
11. Genck W.J., 2000. Better growth in batch crystallizers. *Chemical Engineering*. 90-95.
12. Genic, S.B., Jacimovic, M.J., Vladoic, L.A., 2008. Heat transfer rate of direct-contact condensation on baffle trays. *International journal of heat and mass transfer*. 51: 5772-5776.
13. Himmelblau D.M., Edgar T. F., Lasdon, L.S., 2001. *Optimization of Chemical Processes*. Mc Graw – Hill. USA.
14. Hugot, E. y Jenkins G.H., 1986. *Handbook of cane sugar engineering*, Elsevier, Amsterdam, The Neatherlands.
15. IMPI, 2013. *Guía del usuario de patentes y modelos de utilidad*. México.
16. Ingaramo, A., Heluane, H., Colombo, M., Argüello, T., Cesca, M., 2004. *Uso Eficiente del Agua en Ingenios Azucareros*. Investigación y desarrollo, CETUNT.
17. Jacimovic, N., Genic, S., Jacimovic, B., 2015. Novel method for valiation of experimental data for direct contact condensers whit zero vapor outflow. *Applied thermal engineering*. 91: 1134-1140.

18. Jeong, K., Kessen, M.J., Bilirgen, H., Levy, E.K., 2010. Analytical modeling of wáter condensation in condensing heat exchanger. *International journal of heat and mass transfer*. 53: 2361-2368.
19. Kapooria, R. K., Kumar, S., Kasana, K. S. 2008. Technological investigations and efficiency analysis of a steam heat Exchange condenser: conceptual desing of a hybrid steam condenser. *Journal of energy in southern Africa*, 19(3): 35-45.
20. Kim Y. H., Lee K., Koo K. K., Shul Y. G. y Haam S., 2002. Comparison study of mixing on effect on batch cooling crystallization of 3-nitro-1,2,4-triazol-5 one (NTO) using mechanical stirrer an ultrasound irradiation. *Crystal Research Technology*. 37(9): 928-944.
21. López, Z.L., Cadeza, M.O., Martínez, M.K., y Bolaños, R.E., 2008. Estudio preliminar del efecto de la presión de vacío y del vapor en un cristalizador por lotes a nivel planta piloto. *Rev. Mex. Ing. Quim*. 7(1): 65-70.
22. Mahood, H.B., Campbell, A.N., Thorpe, E.B., Sharif, A.O., 2015. Heat transfer efficiency and capital cost evaluation of a three-phase direct contact hear exchanger for the utilisation of low-grade energy sources. *Energy conversión and management*. 106: 101-109.
23. Martínez M. K., 2006. Estudio del comportamiento del flujo de vapor y evaporado en un cristalizador batch a vacío. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba.
24. Martins, P.M., Rocha, F.A., Rein, P., 2005. Modeling sucrose evaporative crystallization. Part 1. Vacuum pan monitoring by mass balance and image análisis methods. *Ind. Eng. Chem. Res*. 44: 8858-8864.

25. McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriot, P. 2007. Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. McGraw-Hill, México.
26. Montgomery, C. A., 2012, Desing and analysis of experiments. Wiley, USA.
27. Morris A.S., Langari, R., 2012. Measurament and instrumentation theory and application. Elsevier. USA.
28. Nagy Z.K., Fevotte G., Kramer H., Simon L.L. 2013. Recent advances in the monitoring, modelling and control of crystallization systems. Chemical engineering research and desing. 91: 1903-1922.
29. Nagy, Z.K., and Braatz, R.D., 2012. Advances and new directions in crystallization control. Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. 3: 55-75.
30. NIC, 2003. LabVIEW user manual. USA.
31. Ogata, K., 2010. Ingeniería de control moderna, quinta edición, Pearson, Madrid.
32. Perea, R., 2015. Hybrid condenser and their advantages in ammonia systems, IIAR Annual meeting. Technical paper. San Diego, CA.
33. Riha, J., Jackmann, H., 2011. Air-cooled condensers in NH<sub>3</sub> refrigerating plants as an alternative to evaporative condensers. International Ammonia Refrigeration Technology Conference. Rhrid.
34. SAGARPA., 2015. Balances mundiales de azúcar. Organización Internacional del Azúcar. México.

35. Serth, W.R., Lestina, G.T., 2014. Process heat transfer principles, applications and rules of thumb. Academic Press. USA.
36. Srinivasakannan, C., Vasanthakumar, R., Iyappan, K. y Rao, P. G., 2002. A study on crystallization of oxalic acid in batch cooling crystallizer. Chem. Biochem Eng. Q. 16(3): 125-129.
37. Stephanopoulos, G., (1984). Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice, Prentice Hall. USA.
38. Tapia, G. R., 2006. Uso del agua en el ingenio El potrero. Tesis de Maestría en ciencias. Instituto Politécnico Nacional. México.
39. Tung, H.H., Paul, E.L., Midler, M., McCauley, J.A., 2009. Crystallization of organic compounds: An industrial perspective. Wiley. New Jersey.
40. Velázquez Camilo O., 2009. Simulación y control del proceso de cristalización de azúcar de caña por lotes a vacío con un enfoque de diseño directo. Tesis doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
41. Velázquez, C. O., Bolaños, R. E., Rodríguez, J. and Álvarez, R. J., 2010. Fractal analysis of crystallization slurry images, Journal of Crystal Growth, 312: 842-850.
42. Wetzel, L. 1996., Proper Piping for Vacuum Systems, Chemical Engineering. 103 (11): 104-110.
43. Xaca X. O., 2006. Desarrollo de instrumentos virtuales para la adquisición de datos e implementación de perfiles de regulación de vacío en el proceso de cristalización por lotes. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

## **APÉNDICE A**

## A.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL DE LA FASE LÍQUIDA DENTRO DEL CRISTALIZADOR

Para el balance de la fase líquida dentro del cristalizador Ecuación (2.7), se presenta la descripción de variables, unidades, dimensiones (Tabla A.1) y el análisis dimensional:

$$\frac{d(V_l)}{dt} = -\frac{\rho_v V_v h_{fg}}{C_p T_i \rho_l} + \frac{UA(T_{ext} - T_i)}{C_p T_i \rho_l} \quad (2.7)$$

**Tabla A.1** Unidades y dimensiones de los parámetros involucrados en el modelo matemático de la fase líquida dentro del cristalizador

Variable	Nombre	Unidades	Dimensiones
$V_l$	Volumen del líquido dentro del cristalizador	$cm^3$	$L^3$
t	tiempo	s, min	$\theta$
$\rho_v$	Densidad del vapor	$gr/cm^3$	$ML^{-3}$
$v_v$	Flujo volumetrico de vapor	$cm^3/min$	$L^3\theta^{-1}$
$h_{fg}$	Calor latente de vaporización	$cal/gr$	$FLM^{-1}$
$C_p$	Capacidad calorífica de la solución	$cal/gr\ ^\circ C$	$FLM^{-1}T^{-1}$
$T_{ext}$	Temperatura en la chaqueta de calentamiento	$^\circ C$	$T$
$\rho_l$	Densidad del licor	$gr/cm^3$	$ML^{-3}$
$T_i$	Temperatura del licor	$^\circ C$	$T$
$U$	Coeficiente global de Transferencia de calor	$cal/cm^2\ ^\circ C\ min$	$FLT^{-1}\theta^{-1}L^{-2}$
$A$	Área de transferencia para el cristalizador	$cm^2$	$L^2$

$$FLM^{-1}T^{-1}TML^{-3}\frac{L^3}{\theta} = ML^{-3}L^3\theta^{-1}FLM^{-1} + FLT^{-1}\theta^{-1}L^{-2}L^2T \quad (A.1)$$

$$FL\theta^{-1} = FL\theta^{-1} \quad (A.2)$$

## A.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL CONDENSADOR

Para el balance del condensador (Ecuación 2.24), se presenta la descripción de variables, unidades, dimensiones (Tabla A.2) y el análisis dimensional:

$$\frac{d(T_{ag})}{dt} = \frac{\rho_v F_v (h_{fg} - C p_{ag} T_{ag}) + \rho_{ag} F_{age} C p_{ag} (T_{age} - T_{ag}) + UA(T_{amb} - T_{ag})}{\rho_{ag} C p_{ag} V_{ag}} \quad (2.25)$$

**Tabla A.2** Unidades y dimensiones de los parámetros involucrados en el modelo matemático del sistema de condensación híbrido

Variable	Nombre	Unidades	Dimensiones
$\rho_v$	Densidad del vapor	$gr/cm^3$	$ML^{-3}$
$F_v$	Flujo másico de vapor	$min^3$	$L^3\theta^{-1}$
$h_{fg}$	Calor latente de vaporización	$cal/gr$	$FLM^{-1}$
$C p_{ag}$	Capacidad calorífica del agua	$cal/gr\ ^\circ C$	$FLM^{-1}T^{-1}$
$T_{ag}$	Temperatura del agua en la salida del condensador	$^\circ C$	$T$
$\rho_{ag}$	Densidad del agua	$gr/cm^3$	$ML^{-3}$
$T_{age}$	Temperatura del agua en la entrada del condensador	$^\circ C$	$T$
$U$	Coefficiente global de Transferencia de calor (agua-acero-ambiente)	$cal/cm^2\ ^\circ C\ min$	$FLT^{-1}\theta^{-1}L^{-2}$
$A$	Área de transferencia para el condensador	$cm^3$	$L^2$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	$^\circ C$	$T$
$V_{ag}$	Volumen del agua	$Cm^3$	$L^3$

$$ML^{-3}FLM^{-1}T^{-1}L^3T\theta^{-1} \quad (A.3)$$

$$= ML^{-3}L^3\theta^{-1}(FLM^{-1}) + ML^{-3}L^3\theta^{-1}FLM^{-1}T^{-1}(T) + FLT^{-1}\theta^{-1}L^{-2}L^2(T)$$

$$FL\theta^{-1} = FL\theta^{-1} \quad (A.4)$$

## **APÉNDICE B**

## B.1 PROCEDIMIENTO PARA REDUCIR EL EFECTO DE RESPUESTA INVERSA

El resultado de dos efectos opuestos puede producir una respuesta inicial que es en la dirección opuesta a donde finalmente se desea llegar.

Considere un sistema retroalimentado, el proceso muestra respuesta inversa cuando:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} > \frac{K_1}{K_2} > 1 \quad \text{B.1}$$

La respuesta del sistema a lazo abierto es:

$$y(s) = G_c(s) \frac{((K_1\tau_2 - K_2\tau_1)s + (K_1 - K_2))}{(\tau_1s + 1)(\tau_2s + 1)} y_{sp}(s) \quad \text{B.2}$$

Y tiene un punto cero positivo al punto

$$z = -\frac{K_1 - K_2}{K_1\tau_2 - K_2\tau_1} > 0 \quad \text{B.3}$$

Para eliminar la respuesta inversa es suficiente eliminar el cero positivo de la parte superior de la función a lazo abierto, es posible si en la respuesta de lazo abierto  $y(s)$  sumamos  $y'(s)$  dado por:

$$y'(s) = G_c(s)K \left( \frac{1}{\tau_2s + 1} - \frac{1}{\tau_1s + 1} \right) y_{sp}(s) \quad \text{B.4}$$

donde:

$$K \geq \frac{K_2\tau_1 - K_1\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \quad \text{B.5}$$

---

Con lo anterior, se encuentra que el cero resultante de la función de transferencia es no positivo

$$z = -\frac{K_1 - K_2}{(K_1\tau_2 - K_2\tau_1) + K(\tau_1 - \tau_2)} \leq 0 \quad \text{B.6}$$

La función de transferencia para el compensador de respuesta inversa es:

$$G_{\text{compensador}} = K\left(\frac{1}{\tau_2 s + 1} - \frac{1}{\tau_1 s + 1}\right) \quad \text{B.7}$$

donde K, debe satisfacer la condición B.5.