



Diseño Integral a Escala Piloto, de una Unidad Didáctica de Evaporación de Doble Efecto de Tubos Verticales Cortos, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales

Andrés Antonio Vodopivec Kuri, Ing. Carlos Balladares Grazzo
Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
ananvodo@espol.edu.ec, c.balladares@yahoo.es

Resumen

La evaporación consiste en la separación de una sustancia líquida contenida en una solución sólido-líquido. Es una operación unitaria multidisciplinaria que involucra varios equipos como: intercambiadores de calor, bombas de proceso y sistemas de vacío.

Dado a su importancia y utilidad en la industria, el presente proyecto de graduación tuvo como fin llevar a cabo el dimensionamiento y diseño de una unidad de didáctica de evaporación a escala piloto para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química en la ESPOL.

Para determinar la capacidad nominal de la unidad de evaporación fue necesario llevar a cabo un análisis del espacio físico y disponibilidad de recursos in situ para su operación, con lo cual, bajo dichos parámetros se realizó el diseño térmico, mecánico e hidráulico.

Dado a que la unidad de evaporación debe ser didáctica y versátil, se escogieron para su diseño tres sustancias de trabajo: azúcar, hidróxido de sodio y cloruro de sodio, al igual que la posibilidad de trabajar a diversas configuraciones: con las siguientes características generales: Capacidad de evaporación nominal de 300 kg/h; consumo de vapor de caldera a 20 psig: 165 kg/h, Consumo de agua de enfriamiento a 30C: 9 m³/h; modelo seleccionado: tipo tubos verticales cortos, doble efecto; materiales: ASTM A240 grado 304 para todos los recipientes a presión e intercambiadores de calor, ASTM A53 para tuberías de interconexión y servicios generales, ASTM A105 para accesorios en tuberías.

Palabras Claves: *Evaporación, intercambiadores de calor, bombas de proceso, sistemas de vacío, capacidad de evaporación.*

Abstract

Evaporation is the separation of a liquid substance contained in a liquid-solid solution. It is a multidisciplinary unit operation involving several equipments such as heat exchangers, pumps and vacuum systems.

Because of its importance and usefulness in the industry, this graduation project was aimed at carrying out the sizing and design of a teaching pilot scale evaporation unit for the Laboratorio de Operaciones Unitarias of the Chemical Engineering career at ESPOL.

To determine the rating of the evaporation unit was necessary to conduct an analysis of the physical space and resources available in the working space for operation, which, under these parameters was performed the thermal, mechanical and hydraulic design.

Considering that the evaporation unit must be versatile for teaching purpose, the design was conceived using three common substances: sugar, sodium hydroxide and sodium chloride, as well as the possibility of working at various settings, which as a result gave the following general characteristics: nominal evaporation capacity: 300 kg/h, boiler steam consumption at 20 psig: 165 kg/h, consumption of cooling water at 30C: 9 m³/h; model selected: short vertical tubes, double effect; Materials: ASTM A240 grade 304 for all pressure vessels and heat exchangers, ASTM A53 for interconnecting piping and general services, ASTM A105 for pipe fittings.

Key words: *Evaporation, heat exchangers, pumps, vacuum systems, evaporation capacity.*

1. Introducción

1.1. Preámbulo

Las Operaciones Unitarias son diversas etapas de los procesos que se llevan a cabo en la industria, cuyo fin es modificar físicamente las propiedades de una materia prima para transformarla en el producto final.

La Operación Unitaria de Evaporación, consiste en la separación de una sustancia líquida (generalmente agua) contenida en una disolución sólido-líquido mediante su ebullición, con la finalidad de obtener dicha solución más concentrada. Es una de las operaciones de mayor aplicación en la industria.

1.2. Definición del Problema

El Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales (ICQA), con su Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU), debe asegurar que los estudiantes adquieran una formación práctica mediante el estudio y aplicación de técnicas de operación y funcionamiento de equipos pilotos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar a escala Piloto una Unidad Didáctica Integral de Evaporación para el Laboratorio de Operaciones Unitarias del ICQA, que garantice una formación eficaz de los practicantes.

2.2. Objetivos Específicos

- Establecer la metodología para el dimensionamiento de un evaporador de doble efecto e intercambiadores de calor, mediante la aplicación de balances de materia y energía.
- Fijar un procedimiento para diseñar la hidráulica de un sistema de evaporación, así como equipos de bombeo y generación de vacío.
- Llevar a cabo el diseño mecánico de los equipos que constituyen la unidad de evaporación y realizar una selección de los materiales basado en normas internacionales de construcción.

3. Metodología

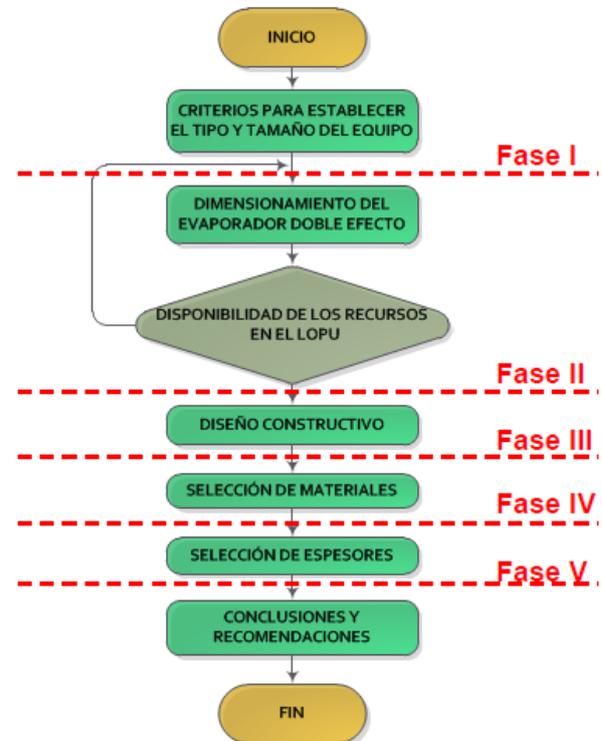


Figura #1. Metodología general del proyecto de graduación.

3.1. Criterios para Establecer el Tipo y Tamaño del Equipo.

Los criterios a considerar son: espacio disponible en el LOPU, demanda de vapor y agua de enfriamiento, las características didácticas a cumplir, y las sustancias de trabajo seleccionadas para el dimensionamiento.

- El LOPU cuenta con un espacio disponible de 24.6x8.3 metros.
- Especificaciones técnicas generales del caldero: Producción de vapor nominal: 235 kg/h; Presión máxima de trabajo: 1000 kPa.
- Especificaciones técnicas generales del sistema de enfriamiento:
Capacidad de enfriamiento de la torre: 30 toneladas de refrigeración; bomba de agua fría: caudal máximo: 13.6 m³/h, presión máxima de bombeo: 310 kPa, potencia del motor: 2 hp.
- Sustancias de trabajo seleccionadas para dimensionamiento: solución azucarada, solución salina y solución de hidróxido de sodio.
- Selección del modelo de evaporador: Tubos verticales cortos (tipo Robert).
- Número de efecto: Doble efecto.
- Características didácticas:

- ✓ Su geometría y funcionamiento es una réplica de los sistemas de evaporación a nivel industrial.
- ✓ Puede trabajar como: efectos simples, o múltiple con alimentación en paralelo y contracorriente.

3.2. Dimensionamiento del Evaporador Doble Efecto.



Figura #2. Cuadro de variables en fase II

3.2.1. Definición de los Parámetros de Cálculo del Sistema

- Temperatura inicial de la solución que ingresa al sistema: 31grados C.
- Presión de vapor del caldero: 20 psig.
- Presión de vacío del segundo efecto: 64 cm Hg.
- Consumo de vapor y agua de enfriamiento: Debe permitir realizar una práctica simultánea con otro u otros equipo del LOPU.
- Propiedades de las soluciones seleccionadas para el dimensionamiento.

3.2.2. Balances de Materia y Energía

- Configuración paralelo

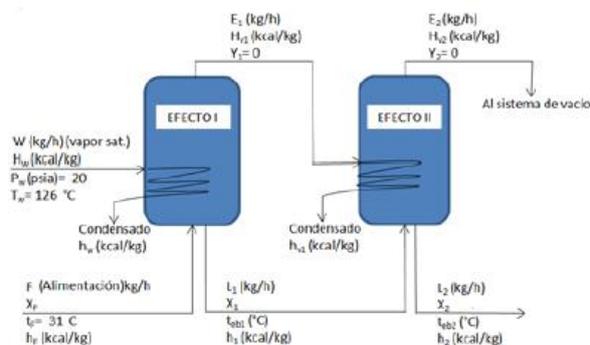


Figura #3. Diagrama de flujo en configuración paralelo.

Ecuaciones de balance global:

Balance Masa Total	$F = L_2 + E_1 + E_2$
Balance de Sólidos	$F \cdot X_F = L_2 \cdot X_2$

Ecuaciones de balance en cada efecto:

Efecto 1	Balance de Materia	$F = L_1 + E_1$
	Balance de Energía	$W \cdot H_w + F \cdot h_F = E_1 \cdot H_{v1} + L_1 \cdot h_1 + W \cdot h_w$
Efecto 2	Balance de Materia	$L_1 = L_2 + E_2$
	Balance de Energía	$E_1 \cdot H_{v1} + L_1 \cdot h_1 = E_2 \cdot H_{v2} + L_2 \cdot h_2 + E_1 \cdot h_{v1}$

- Configuración paralelo

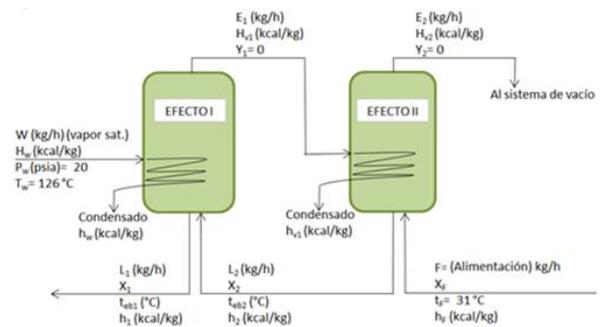


Figura #4. Diagrama de flujo en configuración contracorriente.

Ecuaciones de balance global:

Balance Masa Total	$F = L_1 + E_1 + E_2$
Balance de Sólidos	$F \cdot X_F = L_1 \cdot X_1$

Ecuaciones de balance en cada efecto:

Efecto 1	Balance de Materia	$L_2 = L_1 + E_1$
	Balance de Energía	$W \cdot H_w + L_2 \cdot h_2 = E_1 \cdot H_{v1} + L_1 \cdot h_1 + W \cdot h_w$
Efecto 2	Balance de Materia	$F = L_2 + E_2$
	Balance de Energía	$E_1 \cdot H_{v1} + F \cdot h_F = E_2 \cdot H_{v2} + L_2 \cdot h_2 + E_1 \cdot h_{v1}$

3.2.3. Presión de Trabajo del Primer Efecto

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

Donde:

$$\Delta P_1 = \frac{11}{20} \Delta P_T \quad \text{y} \quad \Delta P_2 = \frac{9}{20} \Delta P_T$$

Siendo:

ΔP_1 , la caída de presión entre el caldero y el primer vaso o efecto.

ΔP_2 , la caída de presión entre el primer y el segundo vaso.

ΔP_T , la caída de presión entre el caldero y el segundo vaso.

3.2.4. Cálculo del Área de Transferencia de Calor

Para determinar el área de transferencia de calor requerido se utiliza la ecuación fundamental de transferencia de calor

$$A_i = \frac{Q_i}{U_i \Delta t_i}$$

Donde:

- a) Q es la cantidad de calor transferido en cada efecto.

Paralelo	Efecto # 1	$q_1 = W \cdot \lambda_w$
	Efecto # 2	$q_2 = E_1 \cdot \lambda_{v1}$
Contracorriente	Efecto # 1	$q_1 = W \cdot \lambda_w$
	Efecto # 2	$q_2 = E_1 \cdot \lambda_{v1}$

- b) Δt es el diferencial de temperatura disponible en el efecto. Se define como la diferencia de temperatura entre el vapor que ingresa a la calandria y la temperatura de ebullición de la solución.
- c) U es el coeficiente de transferencia de calor global de diseño para el efecto. Hugot recomienda, para evaporadores de tubos verticales cortos valores entre 2,500 y 800 kcal/(m²*h*°C), es decir, debe ser seleccionado el dentro del rango mencionado.
- d) Finalmente conociendo la relación (Q/ Δt) en la ecuación fundamental de transferencia de calor, se da valores a U para construir una curva y determinar el área de transferencia de calor requerida.

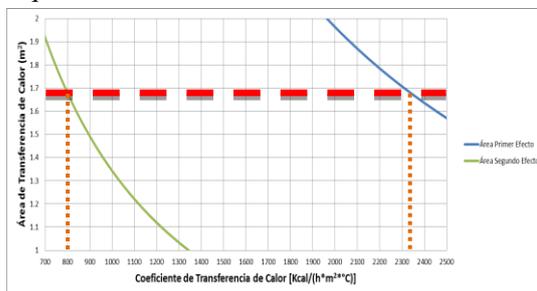


Figura #5. Grafica de área de transferencia vs. coeficiente de transferencia para una solución azucarada en configuración paralelo.

3.2.5. Tuberías de Proceso y Suministro

Las corrientes de trabajo son: vapor, solución diluida y concentrada, condensado y gases incondensables.

Para determinar el diámetro de las tuberías se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi}\right) \times \left(\frac{1.1 \times m}{V \times \rho}\right)}$$

Donde:

(m) es el flujo másico del vapor (kg/h).

(V) es la velocidad recomendada, en m/s.

(ρ) es la densidad del fluido en función del valor de sus propiedades de trabajo (kg/m³).

3.3. Diseño Constructivo de los Efectos

Para el diseño constructivo de los efectos, se lo ha dividido en 4 secciones: separador de arrastre, cámara de evaporación, calandria y domo inferior.

3.3.1. Separador de Arrastre

Su finalidad es separar material arrastrado por el vapor durante la evaporación mediante impacto o cambios bruscos de dirección de flujo. Existen 3 modelos principalmente conocidos y utilizados: centrífugos, placas chevron y contraflujo.

El área superficial se determina con la siguiente ecuación:

$$A = 1.25 \frac{V_V}{C} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right)^{0.5}$$

Siendo:

V_V : Flujo volumétrico del vapor

ρ_G : Densidad del vapor a la presión de trabajo del efecto.

ρ_L : Densidad del líquido a la presión de trabajo del efecto.

C: coeficiente Souders-Brown. Dependiente para cada tipo de separador de arrastre.

3.3.2. Cámara de Evaporación

Es necesario dejar una cámara lo suficientemente alta para inducir el descenso del material arrastrado simplemente por gravedad.

Se recomienda dejar una cámara de evaporación con una altura de 2 a 2.5 veces el largo de los tubos en la calandria.

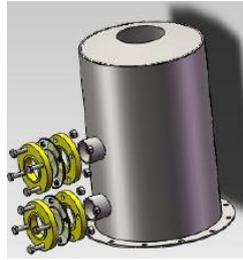


Figura #6. Separador de arrastre.

3.3.3. Calandria

- ✓ Arreglo de los tubos.- Selección del pitch (espaciado de los tubos) y arreglo (triangular o cuadrado).
- ✓ Tubo central.- Entre 1/8 y 1/4 del diámetro de la calandria (Hugot).
- ✓ Placa distribuidora de vapor.- Plancha perforada para equalizar la dosificación de vapor (parte superior, media e inferior). Debe tener la misma área de flujo que la tubería de ingreso de vapor.
- ✓ Canales de vapor.- Distribuir el vapor en toda la calandria.
- ✓ Extracción de gases incondensables y condensados.- Ubicados en el extremo contrario al ingreso de vapor.
- ✓ Cabezal de los tubos.- Norma TEMA sección 5 establece que no debe ser menor a 20 mm.
- ✓ Orificios para los tubos.- norma TEMA sección 5 establece que el diámetro de los orificios deben exceder 1/64 de pulgada con respecto al diámetro exterior del tubo.

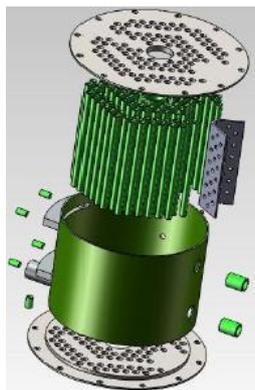


Figura #7. Despiece de calandria de un evaporador.

3.3.4. Domo Inferior

Componentes:

- ✓ Reducción concéntrica.- Reducción abrupta desde el diámetro del tubo central hasta el diámetro de salida de la solución concentrada. Finalidad: Separar burbujas de vapor.

- ✓ Plato deflector.- garantizar dosificación equalizada de solución a concentrar.

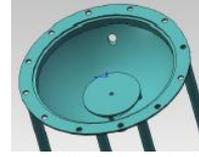


Figura #8. Domo inferior.

3.4. Selección de Materiales

- a) Secciones del Evaporador y tuberías de interconexión (proceso): Pueden ser de acero inoxidable austenítico o acero al carbono.
- b) Tuberías de intercambio de calor (calandria): Acero inoxidable austenítico, bronce o aluminio.

3.5. Selección de Espesores

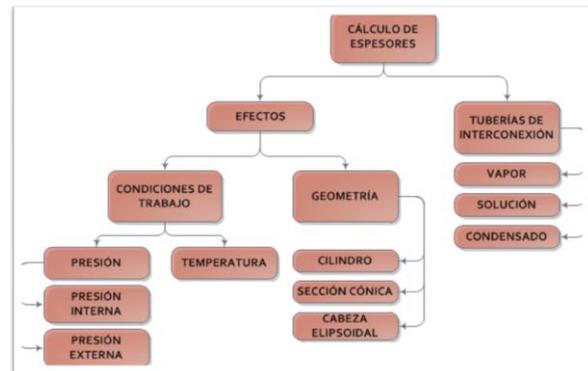


Figura #9. Cuadro de variables para selección de espesores.

- a) Evaporador

PRESIÓN INTERNA	CILINDRO	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	
	SECCIÓN CÓNICA	$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (SE - 0.6P)}$	
	CABEZA ELIPSOIDAL	$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P}$	
PRESIÓN EXTERNA	CILINDRO	$P = \frac{4B}{3 \left(\frac{D}{t} \right)}$	
	SECCIÓN CÓNICA	$P = \frac{4B}{3 \left(\frac{D}{t} \right)}$	$t_e = t \cos \alpha$ ESPESOR EFECTIVO
	CABEZA ELIPSOIDAL	$P = \frac{B}{\left(\frac{R}{t} \right)}$	

Figura #10. Formulas para cálculo de espesores en recipientes a presión.

- b) Tuberías de interconexión (proceso) y transferencia de calor:

- ✓ Categoría IPS: Cedulación seleccionado.
- ✓ Categoría B.W.G.

4. Resultados

4.1. Del Dimensionamiento

- ✓ Flujo másico a ser alimentado al sistema: 300 kg/h.
- ✓ Concentración del soluto en las corrientes de entrada y salida del sistema:

Tabla #1. Concentración del soluto en las corrientes de entrada y salida del sistema.

Concentración másica de flujo	Azúcar	Soda	Sal
Entrada	5%	5%	5%
Salida	30%	30%	20%

- ✓ Presión de vacío del primer efecto: 2.2 pulgadas Hg.
- ✓ Coeficientes de transferencia de calor:
Efecto #1: 2350 kcal/(m²*h*°C)
Efecto #2: 810 kcal/(m²*h*°C)
- ✓ Área de transferencia de calor: 1.95 m², adicionando 20% da 2.3 m².
- ✓ Se seleccionan para la calandria tubos de 15 mm. D.N., ced. 10, de 300mm. de largo. Dando un requerimiento total 114 tubos.
- ✓ Diámetro de tuberías de interconexión (diámetro nominal):
Solución: 15 mm.
Condensado: 10 mm.
Vapor ingresa a efecto #1: 25 mm.
Vapor salida de efecto #1: 40 mm.
Vapor salida de efecto #2: 100 mm.
Gases incondensables: 8 mm.

4.2. Del Diseño Constructivo

- a) Separador de arrastre:
 - ✓ Se selecciona el tipo contraflujo
 - ✓ Diámetro interior de tubo interno: 177.8 mm.
 - ✓ Diámetro interior de tubo externo: 254.0 mm.
- b) Cámara de evaporación:
 - ✓ Se selecciona 2.0 veces la longitud de los tubos en la calandria.
 - ✓ Altura de la cámara de evaporación: 900 mm.
- c) Calandria:
 - ✓ Arreglo de los tubos.- Selección de un pitch de 1.5 con arreglo triangular.

- ✓ Tubo central.- Tubería de 80 mm. diámetro nominal.
- ✓ Placa distribuidora de vapor.- 45 orificios de 6mm. de diámetro c/u.
- ✓ Canales de vapor.- Ancho equivalente a un carril sin tubos.
- ✓ Extracción de gases incondensables y condensados.- Colectores para abarcar mayor área de extracción.

d) Domo inferior:

- ✓ Reducción concéntrica.- Reducción de 80 mm. a 15mm. En 90 mm. de longitud.
- ✓ Plato deflector.- Diámetro: 190 mm.

4.3. De Selección de Materiales

- a) Secciones del evaporador y tubos de transferencia de calor: acero inoxidable austenítico.
- c) Tuberías de interconexión (proceso): Acero al carbono.

4.4. De Selección de Espesores

a) Secciones de los efectos

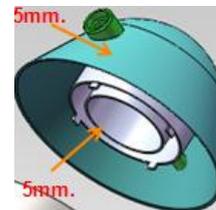


Figura #11. Espesores del separador de arrastre.

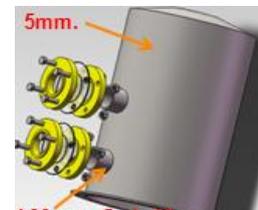


Figura #12. Espesores de la cámara de evaporación

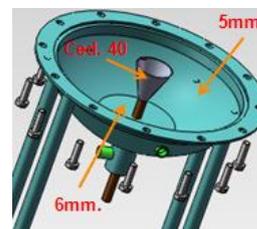


Figura #13. Espesores del domo inferior.

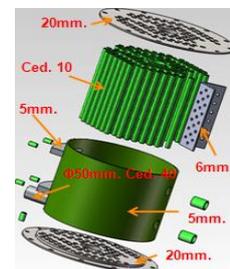


Figura #14. Espesores de la calandria.

- b) Tuberías de interconexión (proceso): espesor cedula 40 IPS.
- c) Tuberías de intercambio de calor (calandria): espesor cedula 10 IPS.

5. Equipos Complementarios

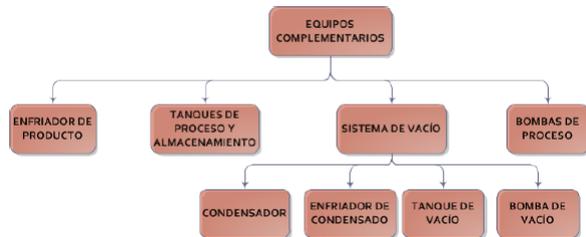


Figura #15. Equipos complementarios en la Unidad de Evaporación.

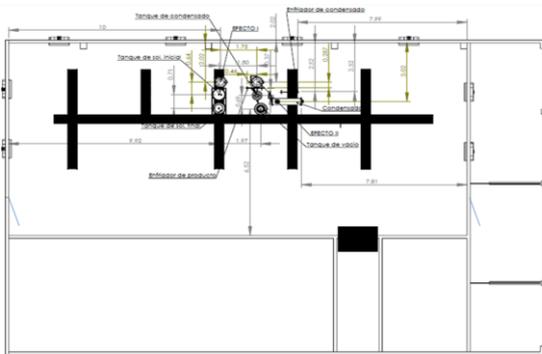


Figura #16. Distribución de los efectos y equipos complementarios en el LOPU.

6. Conclusiones

- ✓ El diseño de la unidad didáctica de evaporación ha sido realizado utilizando literatura comprobada luego de más de 70 años de aplicación industrial, lo cual asegura que su funcionalidad y desempeño para los fines pertinentes.
- ✓ El tamaño y capacidad de los recipientes y equipos va de acuerdo a las necesidades y requerimientos para fines didácticos. Acomodándose a la capacidad de los servicios básicos que se encuentran en el LOPU.
- ✓ La versatilidad de escenarios de trabajo y operación del equipo, garantiza una formación óptima para los estudiantes.
- ✓ La construcción del evaporador piloto propone futuros proyectos de tesis para estudiantes, al igual que investigaciones: comportamiento de diversos fluidos, desarrollo de ecuaciones, etc.

7. Recomendaciones

- ✓ Colocar como aislamiento una protección simple de lana de vidrio para recubrir los evaporadores,

tanques de proceso, intercambiadores de calor y tuberías en contacto con fluidos calientes que pueden conllevar a quemaduras en los practicantes.

- ✓ Las planchas y elementos inoxidables que componen los tanques y evaporadores deben ser soldadas con un equipo SMAW, con cordones A.W.S. E-308L-16 de 3/32" de diámetro. El amperaje para soldar debe estar entre 55-70 de preferencia. También puede usarse un cordón con un máximo de 1/8" de diámetro.
- ✓ Las válvulas para direccionar flujos deben ser de tipo bola; tipo compuerta para manejar vapor y gases; y tipo aguja para la dosificación del alimento a los evaporadores. Se pueden instalar, como alternativa a las válvulas de aguja, válvulas tipo globo.
- ✓ Durante la operación mantener el nivel del líquido en los efectos a 1/3 de la altura de la calandria para lograr su máximo rendimiento en evaporación.

8. Bibliografía

- [1] G. V. Reklaitis and D. R. Schneider, *Balances de Materia y Energía*, primera edición ed. México: Nueva Editorial Interamericana, 1986.
- [2] R. C. Reid, J. M. Prausnitz, and B. E. Poling, *The Properties of gases and liquids*, fourth edition ed., B. Sun and G. H. Fleck, Eds. McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [3] M. Cesca, *Modelo Dinámico de la Evaporación Múltiple*, Argentina.
- [4] V. Echeverri, *Control de los Evaporadores de los Laboratorios de Procesos Productivos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales*, Colombia, 2005.
- [5] N. R. C. of the United States of America, *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*, C. J. West and C. Hull, Eds. New York and London: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1933, vol. 5.
- [6] E. Hugot, *Handbook of Cane Sugar Engineering*, Ed. Elsevier, Third edition, 1986.
- [7] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriot, *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, cuarta edición en español ed. España: McGraw-Hill, 1999.
- [8] K. A. Al-Shayji, "Modeling, simulation, and optimization of large-scale commercial desalination plants," Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, U.S.A., April 1998.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



- [9] J. Kestin, H. Khalifa, and R. Correi, Tables of the Dynamic and Kinematic Viscosity of Aqueous NaOH Solutions in the Temperature Range 20-150 °C and the Pressure Range 0,1 a 5,0 MPa, Division of Engineering, Brown University, Providence, RI 02912, U.S.A.
- [10] Peter Rein, Cane Sugar Engineering, Ed. Verlag Dr. Albert Bartens, 2007.
- [11] R. W. Serth, Process Heat Transfer: Principles and Application, first edition, Ed. Elsevier, 2007.
- [12] Donald Kern, Procesos de Transferencia de Calor, Trigésima primera reimpresión, Ed. CECSA, México, 1999.
- [13] Frank M. White, Fluid Mechanics, Fourth Edition, Ed. Mc. Graw-Hill, University of Rhode Island, U.S.A.
- [14] Wikipedia, Wikipedia The Free Encyclopedia, Steel.
- [15] Meygesy, Manual de Recipientes a Presión: Cálculo y Diseño, Versión Española, Ed. LIMUSA, México, 1989.
- [16] Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc., Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Eight edition, New York, U.S.A., 1999.
- [17] Paul E. Milton, Handbook of Evaporation Technology, Noyes Publications, New Jersey, U.S.A., 1986.