

## SELECCION DEL DIAMETRO Y EL ESPESOR DE LAS CAÑERIAS EN SISTEMAS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Gloria Villaflor, Jorge Velasco, Jorge Flores y Eduardo Bisonard

*Instituto de Beneficio de Minerales (INBEMI)*  
*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta*  
*Avenida Bolivia 5150. (4400) Salta, Argentina*  
*Tel.: 0387-4255412, Fax: 4255451*  
*e-mail: [villaflo@unsa.edu.ar](mailto:villaflo@unsa.edu.ar), [inbemi@unsa.edu.ar](mailto:inbemi@unsa.edu.ar), [jeflores@unsa.edu.ar](mailto:jeflores@unsa.edu.ar),*

### RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un programa de computación aplicable al diseño y selección de sistemas de transporte de fluidos incompresibles o que pueden considerarse incompresibles (sistemas de ventilación industrial y descarga de gases de combustión), basado en la aplicación de los balances de masa y de energía mecánica en estado estacionario y en las condiciones de resistencia mecánica de las cañerías.

Para estos sistemas el programa permite resolver los casos de verificación, diseño y selección de sistemas de cañerías-bombas/ventilador. Los resultados obtenidos son presentados en forma de tablas o planillas de especificaciones que dan las características principales del sistema estudiado.

El programa posee bases de datos de distintos tipos de cañerías, referidas a materiales, diámetros, espesores, tensiones admisibles, factores de corrosión y eficiencia de junta, además de datos de coeficientes y longitudes equivalentes de válvulas y accesorios.

A través del programa se pueden calcular las pérdidas de carga en los tramos de succión y descarga, la altura neta a entregar y la potencia requerida por el sistema. Asimismo se puede realizar la selección de bombas (o ventiladores) y calcular el espesor del sistema de cañerías.

La resolución de sistemas de transporte mediante esta herramienta simplifica los cálculos evitando el empleo de ábacos, tablas, nomogramas, gráficos o sofisticados programas de simulación de procesos, lo que representa una apreciable ventaja para el proceso enseñanza y aprendizaje, ya que permite al alumno la simulación de situaciones problemáticas con un grado de complejidad creciente.

Además se logra una integración de los conocimientos de la currícula de ingeniería a través de los contenidos temáticos correspondientes a diseños de sistemas de flujo en conductos y diseño mecánico.

**Palabras Claves:** Cañerías, Diámetros, Espesores, Tensiones, Enseñanza.

## 1. INTRODUCCIÓN

La currícula de Ingeniería Química aborda, entre otros, los contenidos temáticos correspondientes a diseños de sistemas de flujo en conductos y diseño mecánico. Es por ello que, los problemas relacionados con la selección del diámetro y el espesor de las cañerías en sistemas de transporte de fluidos son muy comunes cuando es necesario transportar un fluido. Por ejemplo cuando se necesita establecer un cierto flujo de fluido entre equipos de procesamiento, entre un equipo y un tanque de almacenaje, etc.

Para resolver estos problemas se desarrolló un programa que se puede aplicar para el cálculo de sistemas de cañerías y equipos de bombeo (bombas) utilizados para el transporte de fluidos incompresibles (líquidos). También su uso puede extenderse para estudiar el transporte de fluidos compresibles (gases), cuando las condiciones de flujo permiten que éstos sean tratados como si fueran incompresibles, lo cual generalmente es admisible cuando las variaciones de la densidad del gas en el sistema son pequeñas (no mayores del 10 %). Estas condiciones se dan, por ejemplo, en los sistemas de ventilación localizada que usan ventiladores para aspirar el aire contaminado.

En todos los casos el programa resuelve el balance de energía mecánica y el balance de materia (ecuación de continuidad) para el caso de movimiento de fluidos incompresibles en estado estacionario.

### 1.1 Balances de materia y energía

El balance de energía mecánica entre dos puntos 1 y 2 de un sistema, tal como se indica en la Figura 1, entre los que se encuentra una bomba que suministra la energía mecánica necesaria para mantener un cierto flujo volumétrico constante de líquido (estado estacionario) es:

$$\frac{\bar{u}_1^2}{2g_c} + \frac{p_1}{\rho} + \frac{g}{g_c} z_1 + \Delta H = \frac{\bar{u}_2^2}{2g_c} + \frac{p_2}{\rho} + \frac{g}{g_c} z_2 + F \quad (1)$$

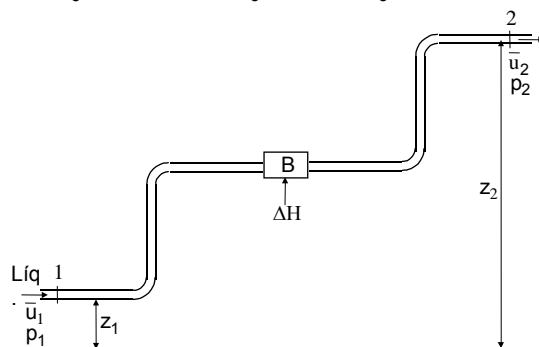


Figura 1 Sistema de transporte de líquidos

Siendo:

$\bar{u}$ : velocidad media de flujo, m/s

$g_c$ : constante dimensional =  $9,81 \text{ kg m/kg s}^2$

p: presión estática,  $\overrightarrow{\text{kg}}/\text{m}^2$

$\rho$ : densidad del fluido,  $\text{kg}/\text{m}^3$

g: aceleración de la gravedad =  $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

z: altura respecto a un nivel de referencia, m

$\Delta H$ : altura neta desarrollada o trabajo entregado por la bomba (considerado positivo),  $\overrightarrow{\text{kg}} \text{ m}/\text{kg}$

F: pérdida de energía mecánica por fricción,  $\overrightarrow{\text{kg}} \text{ m}/\text{kg}$

El balance de materia entre dichos puntos se reduce a:

$$Q = \overline{u}_1 A_1 = \overline{u}_2 A_2 = \text{cte.} \quad \rho = \text{cte} \quad (2)$$

Q: caudal volumétrico,  $\text{m}^3/\text{s}$

A: área de flujo,  $\text{m}^2$

Para resolver la Ecuación (1), la pérdida de energía mecánica por fricción (pérdida de carga) F, se calcula a partir de la ecuación de Fanning [1]:

$$F = \frac{4f L_T}{d} \frac{\overline{u}^2}{2g_c} \quad (3)$$

f: factor de fricción, adimensional

$L_T$ : longitud total de la cañería, m

d: diámetro del conducto, m

El factor de fricción, f, es calculado en función del número de Reynolds,  $Re = \rho d \overline{u} / \mu$  y de la rugosidad relativa del caño  $\varepsilon = k/d$ , utilizando correlaciones del tipo:  $f = f(Re, \varepsilon)$ . En este programa se utiliza la ecuación de Colebrook [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left( \frac{k/d}{3,7} + \frac{1,255}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

$\mu$ : viscosidad del fluido,  $\text{kg}/\text{m s}$

k: rugosidad absoluta de la cañería, m

La longitud total del conducto considerado es igual a la suma de la longitud real del mismo y de una longitud ficticia,  $L_e$ , denominada longitud equivalente de las válvulas y accesorios existentes en el sistema de transporte [1, 3]:

$$L_T = L + \sum L_e \quad (5)$$

La potencia de bombeo  $P_b$  en Hp, se calcula a partir de la altura neta desarrollada y de la eficiencia de la bomba,  $\eta$ :

$$P_b = \frac{Q \Delta H \rho}{75 \eta} \quad (6)$$

## 1.2 Diseño de un sistema de bombeo

El sistema se diseña calculando el diámetro de las cañerías, el espesor de las mismas y la bomba necesaria tales que, transportando un caudal dado hagan mínimo el costo total anual de la instalación. O bien, el cálculo puede hacerse utilizando datos publicados por la bibliografía que establecen, en base a la vasta experiencia acumulada, los rangos de valores de la velocidad de flujo o de la pérdida de carga, dentro de los cuales se encuentra el diámetro óptimo.

El costo total anual de la instalación se calcula como:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Costo total} \\ \text{anual de la} \\ \text{instalación} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Costo de inversión} \\ \text{anual de cañería} \\ \text{y accesorios} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Costo de inversión} \\ \text{anual del equipo} \\ \text{de bombeo} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Costo de} \\ \text{operación} \\ \text{anual} \end{array} \right] \quad (7)$$

$$C_f = (C_c + C_a + C_{\text{eq. bombeo}}) / A_{\text{amort.}} \quad (8)$$

$C_f$ : costos de inversión anual o costo fijo, \$/año:

$C_c, C_{\text{acc}}, C_{\text{eq. bombeo}}$ : costo de cañerías, accesorios y del equipo de bombeo, \$

$A_{\text{amort}}$ : años de amortización, años

$C_{\text{energ}}$ : costo de operación anual, \$/año

$$C_{\text{energ}} = \frac{0,735 P_b}{\eta_{\text{me}}} C_{\text{kWh}} N_a$$

$C_{\text{kWh}}$ : costo energía eléctrica, \$/kWh;  $N_a$ : horas de operación anuales, h/año;

$\eta_{\text{me}}$ : eficiencia del motor eléctrico, adim

## 2. CALCULO DEL ESPESOR DE LAS CAÑERIAS

Las cañerías para conductos de fluidos están sujetas a presiones internas que pueden ocasionar fallas de la tubería, por lo que los caños deben tener un espesor que limite estas fallas y que garantice la seguridad de los mismos.

El espesor de un caño se calcula por medio de la siguiente ecuación, según el Código ASME [4], obtenida a partir del análisis de los esfuerzos actuantes sobre el mismo:

$$t = \frac{p_i d_i}{2 \sigma_{\text{adm}} E} + c \quad (9)$$

Donde:

$t$ : espesor del caño, mm.

$p_i$ : presión interna del fluido (presión de diseño), kg/cm<sup>2</sup>.

$\sigma_{\text{adm}}$ : tensión admisible del material del caño a la temperatura de trabajo, kg/cm<sup>2</sup>.

$d_i$ : diámetro interno del caño, mm.

$E$ : factor de eficiencia de junta, adimensional.

$c$ : factor de corrosión, mm.

El valor obtenido del espesor sirve para adoptar el espesor comercial que más se acerca al calculado.

Con respecto a la presión, se pueden distinguir las siguientes:

Presión de Operación: es la identificada como la presión de trabajo y es la presión manométrica a la cual está sometida la cañería en condiciones de operación normal.

Presión de diseño: es el valor a utilizar en la ecuación de cálculo del espesor del caño.

Presión de trabajo máxima admisible: es la presión máxima a la que puede someterse la cañería, en condiciones de operación y se la obtiene despejándola de la ecuación del espesor real de la cañería.

**TENSIONES ADMISIBLES**

Los valores de las tensiones admisibles se encuentran tabulados para distintos materiales y temperaturas de trabajo [4, 5].

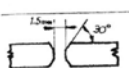
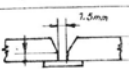
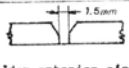
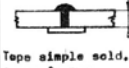
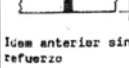
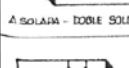
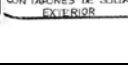
**EFICIENCIAS DE JUNTA**

Los caños pueden ser fabricados con o sin costura.

Para el caso de los caños con costura se debe considerar un factor denominado eficiencia de junta, que tiene en cuenta el presunto debilitamiento que ocurre en las juntas del mismo por el uso de soldaduras, produciendo una reducción de la resistencia, ya sea en la soldadura misma o en zonas adyacentes a ella.

El Código ASME [4, 6] especifica las tolerancias de estos factores, indicando la eficiencia de las juntas para varios tipos de soldadura, con o sin revenido de las costuras e inspecciones radiográficas. En la Tabla 1 se indican algunos valores de eficiencias de junta [4, 6].

Tabla 1 Eficiencias de Juntas soldadas

Tipo de Junta	Limitaciones	Eficiencia	Radiogr.	Tret. Térmico	Efic. máxima
 A tope doble sold. Tipo "X" o "U"	Ninguna	0,8	NO	NO	0,8
 A TOPE SIMPLE SOLD. TIPOS U Y V	Junta longitudinal Hasta 32 mm (1 1/4") Sin limitaciones de espesor para juntas circunferenc.	0,8	NO SI SI	SI NO SI	0,85 0,90 0,95
 Idem anterior sin refuerzos	Unicamente juntas circunf. Hasta espesor de 15,8 mm.- (5/8").-	0,7	NO NO	NO SI	0,70 0,75
 Tope simple sold. con refuerzo	Junta longitudinal de planchas menores de 6,2 mm ( 1/4") de espesor	0,8	NO SI SI	SI NO SI	0,85 0,90 0,95
 Idem anterior sin refuerzo	Junta circunfer.- Idem anterior	0,7	NO NO	NO SI	0,70 0,75
 A SOLAPA - DOBLE SOLD.	Junta Longitudinales Menor 9,5 mm (3/8") espesor Junta circunferenciales Menor 16 mm (5/8") espesor	0,65	NO NO	NO SI	0,65 0,70
 A SOLAPA SIMPLE SOLD. CON TAPONES DE SOLDAD. EXTERIOR	Junta circunferenciales unicamente esp. menor 16 mm Agregado de extremos menor 24" de diámetro exterior o paredes cilindr. de < 16 mm	0,60	NO NO	NO SI	0,60 0,65

### FACTOR DE CORROSION

Para las cañerías construidas con un material sujeto a perder su espesor por efecto de la corrosión, erosión o abrasión mecánica, se deberá aumentar el espesor de las mismas a fin de incrementar su duración efectiva.

Para cañerías donde el rango de corrosión es pronosticable, el alargamiento de vida de las mismas, será determinado por la corrosión admisible adoptada, que se puede encontrar en la bibliografía especializada [1, 4].

Si el efecto de la corrosión no se puede determinar, el Código ASME [4] establece un valor de 1,6 mm, valor que es usualmente satisfactorio, correspondiente a 0,127 mm/año para una vida útil de 12 años.

### VERIFICACION DE LA PRESION

Si se quiere determinar la presión admisible para un determinado espesor elegido, se tiene:

$$p_i = \frac{2 \sigma_{adm} E (t - c)}{d_i} \quad (10)$$

Este valor de la presión debe ser mayor que la presión que realmente debe soportar la cañería.

### 3. EJEMPLO

Se debe especificar la bomba centrífuga a utilizar en una planta de destilación de petróleo crudo para bombear el crudo desde un acumulador hasta la columna de destilación, pasando por un horno tubular tal como se indica en la Figura 2. Diseñar las cañerías de succión y descarga, determinando los diámetros y el espesor de los mismos. Datos a considerar:

Caudal a bombear: 135 m<sup>3</sup>/h (medido en condiciones de bombeo).

Propiedades del crudo desde la bomba al horno, a temperatura de bombeo, 140 °C:

Densidad: 0,77 g/cm<sup>3</sup>, viscosidad: 1,30 cp, presión de vapor: 1,50  $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  man.

Línea de succión: 40 m, con 6 codos de 90° y 1 válvula esclusa (VE).

Línea de descarga: 85 m, con 8 codos de 90°, 1 válvula de retención (VR), 1 válvula globo (VG), 2 VE y 1 válvula reguladora de caudal (VRC) (pérdida de carga estimada de 3,90  $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ ).

Alturas del acumulador sobre el nivel del piso: nivel mínimo = 5,70 m y nivel máximo = 7,70 m.

Altura de entrada a la columna = 12,35 m. Eficiencia de la bomba  $\eta = 0,725$ .

Presión en la cámara de vapor del acumulador,  $p_1 = 1,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  man. ( $p_{1\text{máx}} = 3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  man).

Presión en la zona flash de la columna,  $p_2 = 0,7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  man.

Caída de presión en el horno y línea de transferencia a la columna, obtenida al diseñar el

mismo es:  $16,7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ . NPSH requerido por la bomba: 10 ft (proporcionado por el fabricante).

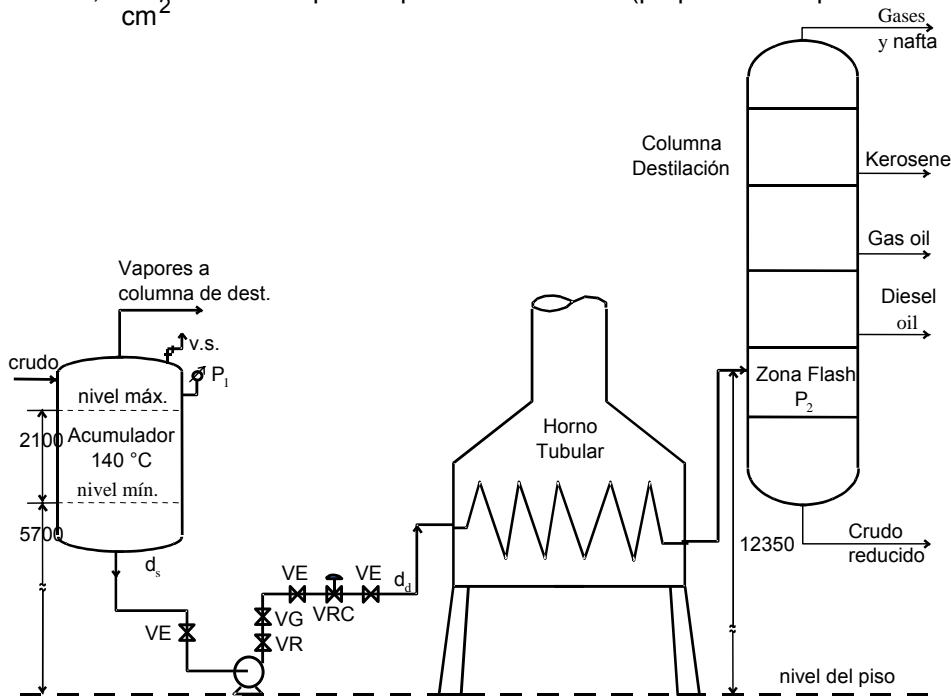


Figura 2 Sistema de bombeo-columna de destilación. Diagrama no en escala. (Medidas en mm)

Microsoft Excel - Calculo del espesor de cañerías2.xls

$$t = \frac{p_i d_i}{2 \sigma_{adm} E} + c$$

DATOS		TENSIONES ADMISIBLES		FACTOR DE EFICIENCIA DE JUNTA		FACTOR DE CORROSION	
Presión de trabajo, P (kg/c)	22,9	Tipo de Acero	Temp. $\sigma$ , psi	$\sigma$ , kg/cm <sup>2</sup>	Tipo de Junta	E, adimensional	Factor de Corrosión
Presión de diseño, P1 (kg/c)	29,7	SA 199 Gr T3b	371	15000	A tope doble tipos	0,8	FC 1
Temp trab, T (°C)	140		371	15000	A tope simple tipo	0,8	FC 2
Temp max adms, Tmax (°C)	180	SA 209 Gr T1	371	13750	A tope simple tipo	0,7	FC 3
Tensión adms, $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	1020		371	13750	A tope simple con	0,8	FC 4
		SA 210 Gr T2	399	13750	A tope simple sin	0,7	
			343	16250	A solape doble so	0,85	
		SA 333 Gr 3	399	15000	A solape simple s	0,8	
			371	15000			
		SA 334 Gr 3	343	16250			
			371	15000			
			399	15000			
		SA 335 Gr P1	343	13750			
			371	13750			
			399	13750			
		SA 369 Gr FP1	343	13750			
			371	13750			
			399	13750			
		SA 423 Gr 1	343	15000			
			371	15000			
			399	15000			
		SA 210 Gr TP30	315	14350			
			371	14200			
			426	14000			
		SA 210 Gr TP3R	315	13600			
			371	13250			
			426	12700			
		SA 430 Gr FP31	315	11900			
			371	11300			
			426	10800			
		SA 210 Gr TP34	315	12600			
			371	12200			
			426	11900			
		SA 269 Gr TP40	315	12400			
			371	12000			
			426	11100			

Lista de Hoja1 / Hoja2 / Hoja3

Figura 3 Hoja de salida del programa desarrollado

En la Figura 3 se muestra una de las planillas de resultados, correspondiente al ejemplo considerado, donde además se incluyen algunos datos de corrosión tomados de la bibliografía [1, 4].

#### 4. RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran los resultados del programa para el ejemplo seleccionado, resumidos en una planilla de especificaciones. Para otros problemas, los resultados se presentan ya sea como planillas o como tablas. Por ejemplo en el caso del diseño de una instalación de bombeo, el programa da como resultado una tabla con las cañerías y las bombas correspondientes que resolverían el problema.

Tabla 2 Planilla de especificaciones de la bomba correspondiente al ejemplo

Planilla de especificaciones	
Tipo de servicio	Bombeo de crudo
Número de bombas requerido	2
Tipo de impulsor en uso regular	Motor eléctrico
Tipo de impulsor como repuesto	Turbina de vapor
Requerimientos de proceso	
Fluido	Petroleo crudo
Calidad de fluido (corrosivo o no)	Corrosivo
Compuestos corrosivos	Compuestos sulfurados
Densidad del fluido a 15 °C, g/cm <sup>3</sup>	0,85
Temperatura de bombeo, °C	140
Densidad a temperatura de bombeo, g/cm <sup>3</sup>	0,77
Viscosidad a temperatura de bombeo, cp	1,30
Presión de vapor (a temp. de bombeo) $\bar{kg}/cm^2$ man.	1,50
Condiciones de succión y descarga	
Presión de succión, $\bar{kg}/cm^2$ man.	1,9
Altura neta positiva de succión (NPSH), m	5,1
Presión de succión máxima, $\bar{kg}/cm^2$ man.	3,6
Presión de descarga, $\bar{kg}/cm^2$ man.	22,8
Datos hidráulicos de diseño	
Presión diferencial desarrollada, $\bar{kg}/cm^2$	20,9
Altura neta desarrollada ( $\Delta H$ ), m	272,1
Caudal a temperatura de bombeo, l/h	135
Datos de diseño y construcción	
Cañería de acero tipo SA 213, d <sub>i</sub> , mm	154,05
Espesor, mm	3,77
Tipo de bomba	Centrífuga
Temperatura de diseño de la carcasa, °C	190
Presión de diseño de la carcasa, $\bar{kg}/cm^2$ man.	28,7
Corriente: Volts - ciclos - fases	380 V - 50 Hz - trifásica

## **5. CONCLUSIONES**

El programa desarrollado es de gran versatilidad, fácil de usar, interactivo y confiable. No necesita de grandes requerimientos de hardware.

Es útil como herramienta de uso frecuente en el campo técnico y profesional como así también en el sector educativo, además permite realizar la estima y actualización de los costos del sistema diseñado en forma rápida y sencilla.

Este programa, trata de satisfacer una necesidad real y cotidiana, al contar con algoritmos computacionales que permiten resolver directamente la ecuación de Colebrook para calcular el factor de fricción y calcular el espesor del sistema de cañerías, resolviendo directamente la ecuación propuesta por el Código ASME.

La resolución de sistemas de transporte mediante esta herramienta computacional simplifica la tarea y evita el empleo de ábacos, tablas, nomogramas, gráficos o sofisticados programas de simulación de procesos, lo que representa una apreciable diferencia de costo.

Permite lograr un aprendizaje significativo de los contenidos temáticos correspondientes a diseños de sistemas de flujo en conductos y diseño mecánico que forman parte de la currícula de Ingeniería Química.

## **6. REFERENCIAS**

- [1] Perry, R., *Chemical Engineers' Handbook*, Mc Graw Hill Book Company, 4<sup>th</sup> Edition, 2000.
- [2] McKetta J. Ed., *Piping Design Handbook*, Marcel Dekker, Inc. New York. 1992.
- [3] Pocoví, R., *Ventilación Industrial*, Ediciones Magna Publicaciones, Salta, 1999.
- [4] Gentile, Sebastián, *Instalaciones Industriales, Recipientes de Presión*, Tomos 3, 6 y 7, Bernal, INDUSTEC, Buenos Aires, 1978.
- [5] Spotts, M.E; Shoup, T.E. *Elementos de máquinas*, Prentice Hall Pearson Educación, México, 2002.
- [6] Rase, H.I., Barrow, M.H., *Ingeniería de Proyecto para Plantas de Proceso*, CECSA, México, 1988.