

Dimensionamiento de intercambiadores de calor de coraza y tubos, con ayuda de computador

En este trabajo se plantea el problema de optimizar el diseño de un intercambiador de calor del tipo coraza y tubos, y se propone un método para resolverlo, con base en la técnica del "estudio paramétrico de la respuesta". Además, se muestra la necesidad de utilizar el computador como herramienta para implementar dicho método, y se describe un programa escrito con tal fin.

GABRIEL EDUARDO ROCHA CAMINO
Ingeniero Químico
HERMES A. RANGEL JARA
Ingeniero Químico
Profesor, Fac. Ingeniería
Universidad Nacional

Como parte principal del proyecto de grado "Dimensionamiento de Equipos para Transferencia de Calor con Ayuda de Computador" (2) se implementaron en el computador de la Universidad, métodos para apreciar y dimensionar intercambiadores de calor de coraza y tubos, de placas paralelas y de tubos concéntricos, para servicios sin cambios parciales de fase, y para realizar cálculos preliminares de evaporadores químicos. Además, se desarrolló e implementó un modelo que permite simular equipos de coraza y tubos.

Por limitaciones de espacio, en este artículo se describe solamente una parte del trabajo realizado: El desarrollo e implementación en computador de un método para dimensionamiento de intercambiadores de calor del tipo coraza y tubos, con aproximación al óptimo termohidráulico. En general, el tratamiento se limita a la parte térmica-hidráulica del problema; sin embargo, se hace respetando las normas mecánicas de fabricación establecidas por los principales constructores de estos equipos (Tubular Exchanger Manufacturers Association, TEMA (3), de modo que las unidades calculadas por el programa quedan listas para el diseño mecánico.

JUSTIFICACION

Debido a que un intercambiador de calor no tiene partes móviles se puede desarrollar la impresión errónea que su diseño es simple y directo; en realidad, hay una cantidad casi ilimitada de alternativas para seleccionar uno de estos equipos para una corriente de proceso, aún cuando, usualmente, sólo hay un "mejor" diseño. En general, la única forma segura es diseñar varios intercambiadores, cubriendo todo el intervalo de condiciones de proceso, en orden a obtener datos suficientes para realizar la selección de un equipo próximo al óptimo; cuando el número de factores y los intervalos a considerar son grandes, la cantidad de diseños requeridos puede ser enorme.

Por otra parte, en el diseño de equipos para transferencia de calor es necesario realizar abundantes y dispendiosas tareas de cálculo, debido

fundamentalmente a los requerimientos de las numerosas expresiones matemáticas que describen el comportamiento de estas unidades. Con frecuencia se acude a métodos simplificados con el fin de reducir el esfuerzo de cálculo por parte del ingeniero; esos métodos casi siempre proporcionan soluciones de aplicación limitada, e involucran elevados "factores de seguridad" para compensar las "no idealidades" de las suposiciones que los soportan.

Un mal diseño puede surgir por errores del diseñador en la selección de materiales o condiciones de proceso, pero la mayoría de las veces se debe a la utilización de métodos de cálculo inapropiados, o a la especificación de factores de sobrediseño excesivos, y a la no consideración de algunos parámetros que influyen decisivamente en el funcionamiento de los equipos.

Se plantean entonces las ventajas de la utilización del computador como herramienta de diseño, debidas básicamente a la rapidez con que se pueden realizar los cálculos y a la disponibilidad, prácticamente inmediata, de gran cantidad de información almacenada en la memoria de los computadores. La principal de esas ventajas radica en la posibilidad de emplear métodos de diseño más rigurosos que los tradicionales y obtener soluciones a problemas que antes no se resolvían con base en ciertas suposiciones simplificadas no siempre muy ajustadas a la realidad; la utilización de mejores métodos para modelar el funcionamiento de los equipos (coeficientes de transferencia, diferencias de temperatura, carga de calor, caídas de presión, factores de obstrucción, etc.), unida al uso de sofisticadas técnicas numéricas de investigación operacional, permite alcanzar al diseñador mejores resultados, con respecto a algún criterio técnico o económico, con menores factores de seguridad y un alto nivel de confiabilidad.

Puesto en otros términos, por medio de programas de computador se pueden emplear métodos y modelos más rigurosos y tener en cuenta muchos más factores que con el uso de técnicas manuales de cálculo; además, es posible probar más configuraciones, en orden a encontrar el conjunto de parámetros que satisfaga todas las condiciones del problema en la forma más eficiente, al menor costo o con la mayor ganancia posible.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En términos generales, dimensionar un intercambiador significa determinar los parámetros de construcción para un equipo desconocido, partiendo de unas condiciones de proceso dadas. En otras palabras, para el dimensionamiento de un intercambiador las condiciones de proceso dadas, esto es, carga de calor, flujos, temperaturas, caídas de presión permitidas y factor de obstrucción requerido, están establecidas; la tarea con-

siste en definir las especificaciones geométricas óptimas del equipo, mientras se respetan la información sobre el proceso y las restricciones impuestas por las normas de construcción.

Desde el punto de vista térmico-hidráulico, el intercambiador óptimo es aquel que utilizando al máximo las caídas de presión permitidas, satisfaga los requerimientos de transferencia de calor con la menor área posible; dicho intercambiador, al menos en teoría, tendría un factor de sobrediseño igual a cero (este factor se define como la fracción por la cual el coeficiente requerido de diseño supera al coeficiente real de diseño), y factores de utilización de las caídas de presión unitarios; en la práctica, debido a la naturaleza discreta de la mayoría de las variables geométricas de diseño, los equipos óptimos tienen factores de sobrediseño positivos (usualmente 0.1-0.2) y factores de utilización de las caídas de presión por debajo de la unidad.

Tomando las especificaciones del proceso como base, el diseñador tiene libertad para seleccionar e investigar los efectos de la geometría básica y los elementos de construcción sobre el diseño. Normalmente estos elementos son numerosos y poseen interrelaciones complejas; en el caso de equipos de coraza y tubos se incluyen el tipo de construcción, el tipo, tamaño y disposición de la coraza, el tipo, longitud, diámetro, calibre, arreglo y espaciamiento de los tubos, la geometría de los deflectores, etc.

Indudablemente, la solución a este problema debe emprenderse empleando una técnica numérica de cálculo. El uso de técnicas analíticas requiere, que se pueda expresar la función objetivo en forma de ecuación en términos de las variables independientes; dicha ecuación debe corresponder a una función diferenciable y continua, al igual que sus derivadas con respecto a todas las variables independientes; además, estas últimas se deben poder solucionar simultáneamente.

En el caso de intercambiadores de calor industriales es prácticamente imposible escribir un modelo matemático que satisfaga estas condiciones y sea suficientemente representativo de la situación real, dado que la mayoría de las variables que intervienen están fuertemente ligadas, a través de relaciones que muchas veces son de carácter discreto (como las normas de construcción, por ejemplo), o no son diferenciables (como la ecuación del factor térmico) o no están en forma de ecuación (como las tablas de conteo de tubos); suponiendo que se pudiera obtener, la función objetivo sería tremendamente complicada, y sólo serviría para un caso específico, debiendo replantearse en caso que se modificaran los términos del problema (para optar por el uso de tubos con aletas en lugar de los lisos, por ejemplo), o cuando se encontrara alguna situación especial durante el cálculo (como cam-

bios en el régimen de flujo o cambio de fase de un fluido, etc.).

Aparte de las condiciones de proceso, en el dimensionamiento interviene un número grande de parámetros geométricos; por esa razón no es práctica la realización de un estudio factorial completo de las variables con propósitos de optimización. Júzguese la magnitud del problema, teniendo en cuenta que, usando solamente valores normalizados, hay más de 40 tamaños de coraza, 5 longitudes de tubo, 17 combinaciones de diámetro-arreglo-espaciado de los tubos, entre 6 y 10 opciones para escoger el número de pasos por los tubos y, prácticamente, una cantidad ilimitada para elegir la combinación espaciado-porcentaje de corte de los deflectores, sin contar con que hay dos posibles localizaciones de los fluidos con relación a los tubos y la coraza, etc. Naturalmente, en la mayoría de los problemas no es necesario tener en cuenta todas las opciones: La disponibilidad de materiales y equipos y la experiencia y juicio del ingeniero con frecuencia permiten restringir bastante el número total de opciones a considerar. Descartado el factorial, es necesario pensar en otro método numérico de optimización, ya que, de todos modos, los problemas siguen siendo demasiado grandes en soluciones potenciales para intentar una solución de tipo manual.

FORMULACION DEL ALGORITMO DE CALCULO

Debido a que los factores que mejoran la transferencia de calor (y por ende, reducen los requerimientos de superficie del equipo), también incrementan la pérdida de carga de los fluidos, es posible realizar el dimensionamiento combinándolos adecuadamente, en procura de utilizar al máximo las caídas de presión disponibles. Para poder hallar la combinación óptima, sin necesidad de probarlas todas, se debe conocer de antemano, al menos en forma cualitativa, el efecto de cada uno de los parámetros sobre el diseño global; así, se puede partir de una configuración geométrica cualquiera, y proceder con una serie de apreciaciones, después de cada una de las cuales se cambia algún parámetro en la dirección adecuada, en orden a obtener cada vez una mejor unidad para apreciar y decidir el siguiente cambio. Esta es la filosofía del método que se propone; en esencia, es lo que se conoce como un "estudio paramétrico de la respuesta". El algoritmo comprende las siguientes operaciones:

1. Determinar la carga de calor, mediante un balance de energía.
2. Determinar la media logarítmica de las diferencias de temperatura en los terminales del equipo.
3. Determinar el número de corazas en serie. Este se relaciona en forma directa con el

menor valor que puede tener el factor térmico para que el equipo sea operable y depende, básicamente, de las temperaturas de proceso.

4. Determinar el mínimo número de corazas en paralelo. Este lo fijan los requerimientos de caída de presión. Para encontrarlo, se toma la mayor coraza, configurada para minimizar las pérdidas de carga, y se calculan éstas; si el resultado para una o ambas corrientes supera los límites establecidos, no es posible manejar el servicio, a menos que se dividan los flujos, lo que equivale a añadir corazas en paralelo. Este procedimiento se repite, agregando una coraza cada vez, hasta que las dos caídas estén por debajo de las máximas toleradas.
5. Determinar el mínimo tamaño de coraza. Este también está asociado con los requerimientos de caída de presión. Se encuentra calculando las pérdidas de carga de las dos corrientes para los distintos diámetros de coraza, empezando por el más pequeño e incrementándolo progresivamente (utilizando siempre las configuraciones que rindan las menores pérdidas) hasta hallar la primera que permita que ambas estén por debajo de las permitidas. Ese es, incondicionalmente, el tamaño de coraza más pequeño que se puede utilizar.
6. Maximizar la transferencia de calor. En esta fase se cambian las configuraciones de las unidades ensayadas cada vez por las que rindan mayores caídas de presión, con lo que también se consiguen los menores requerimientos de área. Se comienza con el resultado encontrado en el paso anterior, y se incrementa progresivamente el tamaño de coraza, hasta encontrar el primero que satisfaga la carga de calor requerida. En este punto se tendrá un equipo que cumple todas las condiciones de proceso con la menor área posible, y el cálculo habrá terminado.

Conviene enfatizar aquí que, dentro de cada una de estas etapas, sólo se debe alterar un parámetro cada vez, y siempre respetando las normas de construcción y los requerimientos estructurales. De otro modo el procedimiento de cálculo puede tomar más tiempo, o conducir a soluciones erróneas o a resultados que no sean prácticos o que requieran ajustes extras para poderlos utilizar. Si bien con el algoritmo descrito se maximiza la utilización de las caídas de presión y se llega a un equipo que cumple la carga de calor, esto no necesariamente significa que siempre se consiga que el factor de sobrediseño tienda a cero y que el factor de utilización de las caídas de presión tienda a la unidad. Hay, por ejemplo, casos en los que los coeficientes son inherentemente bajos (flujo laminar o gases a baja presión) y casi siempre el diseño final no utiliza al máximo las caídas, ya que el área del equipo se debe extender, en la última etapa del cálculo, para

satisfacer los requerimientos de transferencia de calor. También es frecuente la situación opuesta, en la que se configuran unidades en orden a utilizar totalmente las caídas disponibles, pero resultan demasiado grandes, con factores de sobrediseño térmico muy elevados; esta es una situación altamente indeseable, ya que se localiza superficie que no se necesita, y se presenta cuando se han especificado valores muy altos para las caídas permitidas.

IMPLEMENTACION EN EL COMPUTADOR

Si se conoce la forma como cierto parámetro afecta el diseño, se le puede incluir en el proceso de optimización como variable independiente. Sin embargo, no es práctico incluir en el algoritmo todas las variables posibles, ya que implementarlo en computador representaría enormes esfuerzos de programación y largos períodos para depuración, y el resultado seguramente sería un programa demasiado grande y lento. Otra razón para no hacerlo es que se debe permitir que el diseñador fije de antemano algunos parámetros de diseño (como los tipos de intercambiador, de deflectores y de tubos, las tolerancias de fabricación, y el calibre de los tubos, entre otros), con base en la disponibilidad en el mercado, experiencias previas, requerimientos estructurales, políticas de planta en cuanto a estandarización, etc.

Resulta entonces más conveniente utilizar la técnica descrita antes dentro de un factorial en el que se incluyan los parámetros fijos; de este modo, para cada combinación de éstos se determinan los valores óptimos de los demás parámetros y, al final, el diseñador puede elegir la combinación que mejor resultado global proporcione.

En el programa OPTERM se ha implementado el método propuesto (este programa hace parte de la librería calor, creada durante el proyecto, que se encuentra cargada en uno de los discos del Centro de Cálculo de la Universidad). OPTERM determina el menor número de bancos de intercambiadores en paralelo, con el menor número de corazas por banco, y con la menor superficie total de transferencia, para cumplir cierta carga de calor, utilizando lo más eficientemente posible las caídas de presión disponibles y respetando las normas de fabricación de la TEMA.

En la investigación paramétrica de la respuesta se incluyeron el diámetro de la coraza, el número de pasos por los tubos, y el número, espaciamiento y porcentaje de corte de los deflectores como variables independientes; además, la investigación se puede hacer para una serie de combinaciones de otros parámetros geométricos, tales como longitud, diámetro, arreglo, peso y calibre de los tubos, lo cual permite incluirlos también como variables de optimización. Si se desea, es posible optimizar también otros parámetros, co-

mo el tipo de intercambiador, de tubos o de deflectores, realizando distintas corridas del programa, empleando cada vez las correlaciones adecuadas para cada situación.

Las principales características de OPTERM se resumen enseguida:

- A pesar de la complejidad de su organización interna y la multiplicidad de opciones que suministra, el programa es de utilización muy sencilla, aún por personas sin conocimientos en el área de Sistemas. OPTERM depende del módulo de mando del Paquete CALOR, que se diseñó de modo que facilita el empleo de cualquier programa sin necesidad de que el usuario tenga que entregarlo en tarjetas ni escribir las instrucciones de control del sistema operacional requeridas para compilarlos, enlazarlos y ejecutarlos.
- OPTERM se escribió con estructura modular para permitir que se cambien con facilidad los procedimientos de cálculo que se desee, en orden a actualizar el programa o a realizar cálculos comparativos a través de distintos métodos o correlaciones; esto hace posible manejar diferentes geometrías sin tener que modificar la estructura del programa (basta enlazar con él, los módulos de cálculo apropiados, de acuerdo con el caso que se esté estudiando).
- Se ha puesto énfasis en la intervención del diseñador dentro del proceso de cálculo de los equipos; así, OPTERM le permite que suministre una cantidad variable de datos, y la opción de definir algunos valores, o dejarlos libres para que el programa use los que tiene definidos internamente (éstos se establecieron al escribir el programa, de acuerdo con recomendaciones de la literatura sobre el tema). El usuario puede imponer condiciones o restricciones acerca del proceso y/o las características de construcción de las unidades, de modo que el programa puede manejar problemas reales y proporcionar soluciones reales, directamente utilizables. Además, como se mencionó, si bien se han considerado gran cantidad de variables de optimización, hay otras que se dejan por fuera, a juicio del diseñador, quien debe definirlos en la etapa de análisis preliminar del problema, o hacer varias corridas con distintos datos para tomar la decisión con base en los resultados finales. Así, la aproximación a las mejores soluciones depende grandemente del usuario.
- La cantidad de datos que es necesario entregar al programa se ha reducido considerablemente con la creación de archivos con información sobre dimensiones de tubos, geometría del lado de la coraza, normas de construcción y tablas de conteo de tubos; estos archivos se conectan automáticamente

con OPTERM cuando se ejecuta el módulo de mando. No obstante, si lo desea, el diseñador puede emplear sus propios archivos de datos.

- Prácticamente todos los procedimientos que comprenden el programa y los subprogramas se han equipado con rutinas para validación de los datos y búsqueda de inconsistencias en los resultados intermedios; además, existen comandos para emisión de mensajes de advertencia o error, que se activan cuando se encuentran casos especiales, como por ejemplo, una diferencia de temperatura muy pequeña o negativa.
- OPTERM posee una opción de seguimiento, que permite conocer la secuencia de cálculo empleada para resolver cada problema, mediante mensajes que se producen cuando se ejecutan ciertas instrucciones ubicadas en sitios estratégicos del programa. También existe la opción de impresión de resultados intermedios.
- El siguiente diagrama ilustra, de manera muy general, las operaciones de Entrada/Proceso/Salida realizadas por el programa.

EJEMPLO

A manera de ilustración del programa, se realizó la solución del siguiente problema, planteado con base en (1) (Págs. 186-189):

43800 lbm/hr de una kerosena de 42 API salen del fondo de una columna de destilación a 390 F y deben enfriarse a 200 F, mediante 149000 lbm/hr de crudo de 34 API, que viene del tanque de almacenamiento a 100 F y se calienta a 170 F.

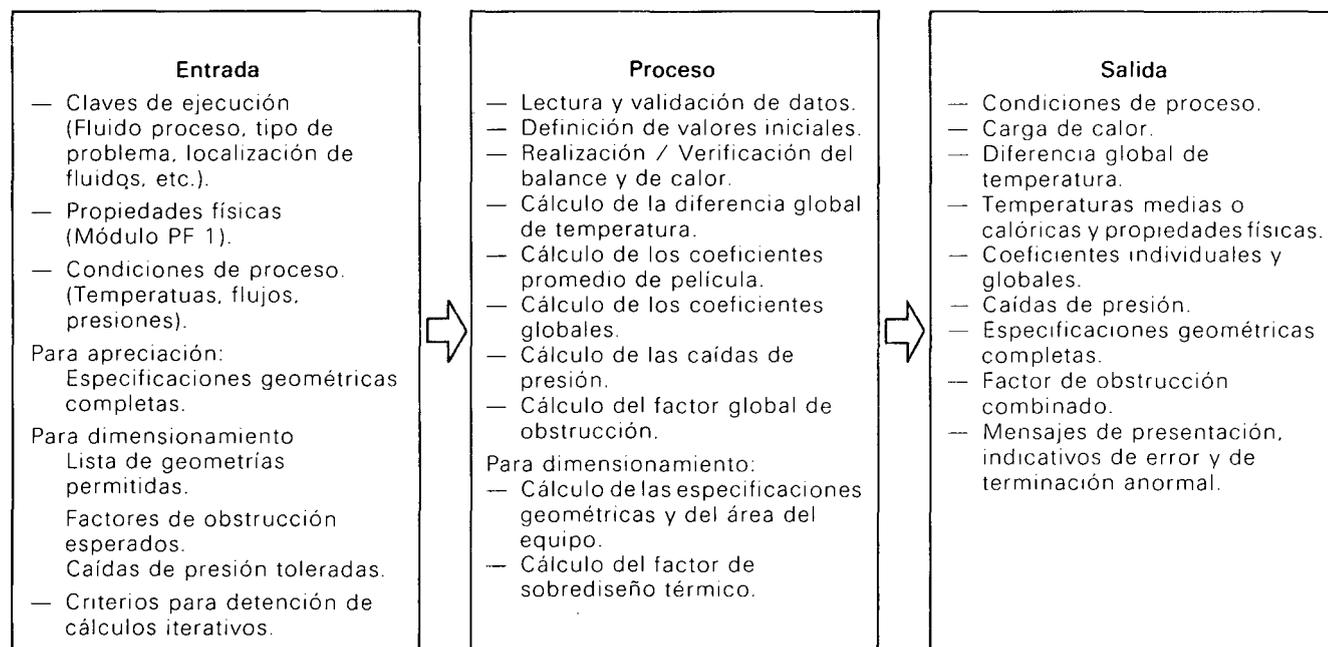
Se permite una caída de presión de 10 psi en las dos corrientes, y debe considerarse un factor de obstrucción combinado de 0.003 hr ft² F/BTU. El equipo debe estar sujeto a las siguientes restricciones geométricas:

- La coraza debe tener un diámetro estándar entre 12 y 39 in.
- La longitud de los tubos debe ser un número par de pies entre 8 y 20.
- Los tubos deben ser de 14 BWG, de 3/4 in con paso de 1 in o de 1 in con paso de 1-1/4 in, arreglados en cuadro o en triángulo.
- El equipo debe tener un paso o un número par de pasos por los tubos, no mayor de 8.

El problema se resolvió utilizando las tablas de cuenta de tubos de Kern; las correlaciones usadas para predecir coeficientes, caídas de presión y propiedades físicas fueron las mismas empleadas en la referencia de la que se tomó el problema (esto se hizo con el fin de poder comparar resultados; conviene mencionar que en el paquete de programas desarrollado en el proyecto, se montaron varios módulos con correlaciones más exactas que las de Kern).

Las siguientes páginas contienen parte del listado de resultados que produjo el programa. En las dos primeras, OPTERM reproduce el enunciado del problema; en las demás presenta un resumen de los resultados para los 56 diseños realizados, uno para cada combinación de longitud-diámetro-arreglo-paso-calibre de los tubos y para cada localización de los fluidos con respecto a los tubos y a la coraza (los 28 primeros corresponden a la ubicación del crudo dentro de los tubos).

Programas para cálculo de intercambiadores Operaciones de entrada/proceso/salida



De acuerdo con estos resultados, el área mínima es de 452.4 ft², que corresponde a un equipo 1-6 con 192 tubos de 16 ft de largo y 3/4 in de diámetro, arreglados en cuadro con paso de 1 in, dentro de una coraza de 19-1/4 in con 22 deflectores (décimo diseño en la lista). Este equipo no aprovecha cerca del 30% de la caída disponible para la corriente de kerosena, en tanto que para algunos otros, se calcularon caídas más próximas a las toleradas; sin embargo, nótese que tales equipos resultan sobreespecificados, con factores de sobrediseño de 20 ó 30% y más. Es probable que la caída de presión para la kerosena se haya establecido muy alta.

En general, se puede observar que resultan diseños considerablemente más compactos cuando se envía el crudo por la coraza; esto lo habría podido anticipar el usuario, pues se debe a que la viscosidad de este fluido es cerca de nueve veces mayor que la de la kerosena, lo cual hace que controle la transferencia de calor a pesar de tener un flujo másico casi cuatro veces más grande que el de aquélla.

Un ejemplo típico de diseño completamente desbalanceado es el que se resume en la penúltima hoja de resultados, con tubos de 16 ft de largo y 3/4 in de diámetro, arreglados en cuadro con 1 in de paso, y con el crudo fluyendo por ellos, para lo cual se calculó un área de

1162.4 ft², que es más del doble de la mínima, con sólo un 20% de utilización de la caída de presión disponible para la kerosena.

Nótese en los listados, que OPTERM ha calculado para un gran número de los casos, caídas de presión sobre los 10 psi permitidas, así como algunos factores de sobrediseño negativos. Esto se debe a que se han dado instrucciones al programa para que acepte diseños con caídas de presión entre 0 y 110% de las permitidas, y factores de sobrediseño térmico entre -5 y 100% (estos límites los fija el usuario al alimentar los datos al programa), y se justifica plenamente si se tiene en cuenta que las correlaciones utilizadas para calcular las caídas de presión y los coeficientes de película son extremadamente conservadoras, con más de 100% de desviación del lado seguro.

Si bien este problema corresponde al diseño de un equipo pequeño, el ejemplo demuestra la utilidad del programa, la cual se ve aumentada notablemente en los casos complejos de instalaciones grandes o con requerimientos poco usuales, en las que los costos involucrados son muy altos. En forma manual sería muy engorroso y poco confiable calcular siquiera diez de estos diseños, y menos aún si se utilizan métodos refinados para estimar los coeficientes y las caídas de presión.

DIMENSIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR
DE CORAZA Y TUBOS, SIN CAMBIO DE FASE
APROXIMACION AL OPTIMO TERMOHIDRAULICO

TIPO DE CONSTRUCCION CABEZAL FLOTANTE
MATERIAL DE CONSTRUCCION ACERO AL CARBONO
PRESION DE DISEÑO (PSIA) 100.0

TAMANOS DE CORAZA PERMITIDOS (DIAMETRO NOMINAL, IN):

12.00	13.25	15.25	17.25	19.25	21.25	23.25	25.00	27.00	29.00
31.00	33.00	35.00	37.00	39.00					

LONGITUDES DE TUBO PERMITIDAS (IN):

8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ARREGLOS A CONSIDERAR (1: CUADRO; 2: DELTA; 3: ROMBO, DIMENSIONES EN PULG.)

D.E. TUBOS	ARREGLO	PASO	B # G	
1	0.7500	2	1.0000	14
2	0.7500	1	1.0000	14
3	1.0000	2	1.2500	14
4	1.0000	1	1.2500	14

SE PERMITE UNA CAIDA DE PRESION DE 10.0 PSI PARA LA CORRIENTE FRIA, Y DE 10.0 PSI PARA LA CALIENTE. SE PREVEN FACTORES DE OBSTRUCCION DE 0.00150 Y 0.00150 RESPECTIVAMENTE.

LA VELOCIDAD POR LOS TUBOS NO DEBE SUPERAR LOS 20.0 FPS.

SE PERMITE 1 O UN NUMERO PAR DE PASOS POR LOS TUBOS, NO MAYOR DE 8.

SE CONSIDERA BIEN BALANCEADO UN EQUIPO CON FACTOR DE SOBREDISEÑO ENTRE -5.00 Y

10.00 % CAIDA DE PRESION PARA EL FLUIDO CALIENTE ENTRE 0.90 Y 1.10 VECES LA PERMITIDA, Y PARA EL FLUIDO FRIO ENTRE 0.90 Y 1.10 VECES LA PERMITIDA.

LOS DATOS PARA EVALUACION DE COSTOS SON:

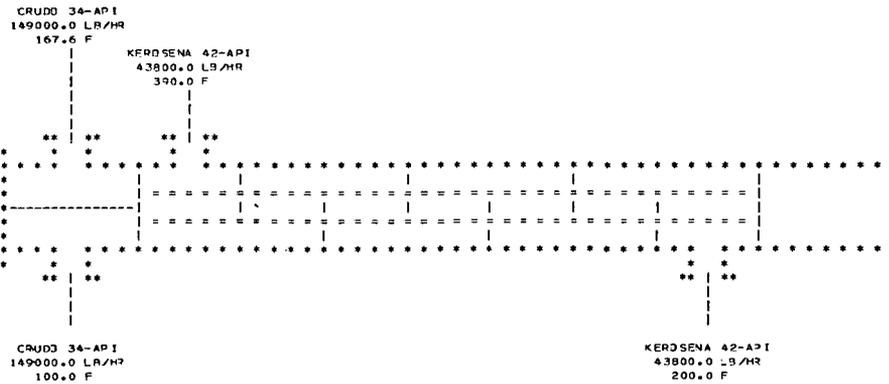
TIEMPO DE OPERACION	HR/ANO	8000.
COSTO DE LA ELECTRICIDAD	US\$/KWH	0.040
EFICIENCIA PROM. DE LA BOQUERA	FRACC.	0.850
TASA DE INTERES SOBRE EL CAPITAL	%	0.240
PERIODO DE AMORTIZACION	ANOS	10
FACTOR DE MANTENIMIENTO	FRACC.	0.060
FACTOR DE SEGUROS	FRACC.	0.001

LOCALIZACION FLUIDO		CORAZA		TUBOS
FLUJO MASICO	LB/HR	KEROSENA 42-API	43800.0	CRUDO 34-API
TEMPERATURA DE ENTRADA	F		390.000	149000.0
TEMPERATURA DE SALIDA	F		200.000	167.553
PRESION DE OPERACION	PSIA		123.4	246.0

CARGA DE CALOR BTU/HR 4922242.0

MLDT F 153.15

CORAZAS EN SERIE/BANCO: 1
DIF. GLOBAL DE TEMP. (CORREGIDA) F 137.40



RESUMEN DE RESULTADOS

LONGITUD TUBOS (FT)	DIAMETRO TUBOS (A) (IN)	ARREGLO (B)	PASO TUBOS (IN)	CALIBRE BWG (C)	PASOS POR TUBOS (D)	TUBOS POR CORAZA	BANCOS EN PARALELO	DIAMETRO CORAZA (E) (IN)	PASOS POR CORAZA	DEFLECTORES POR CORAZA	% CORTE DEFLECTORES	
1	8.00	0.750	2	1.0000	14	8	326	1	23.25	1	16	16.82
2	8.00	0.750	1	1.0000	14	8	346	1	25.00	1	18	16.00
3	8.00	1.000	2	1.2500	14	8	296	1	27.00	1	14	16.45
4	8.00	1.000	1	1.2500	14	8	358	1	31.00	1	15	16.00
5	10.00	0.750	2	1.0000	14	8	260	1	21.25	1	18	19.30
6	10.00	0.750	1	1.0000	14	8	234	1	21.25	1	20	18.30
7	10.00	1.000	2	1.2500	14	8	202	1	23.25	1	16	19.52
8	10.00	1.000	1	1.2500	14	8	222	1	25.00	1	19	16.32
9	12.00	0.750	2	1.0000	14	6	216	1	19.25	1	20	20.85
10	12.00	0.750	1	1.0000	14	6	192	1	19.25	1	22	19.95
11	12.00	1.000	2	1.2500	14	8	160	1	21.25	1	18	20.92
12	12.00	1.000	1	1.2500	14	8	184	1	23.25	1	21	18.76

CAIDA PRESION LADO TUBOS (PSI)	CAIDA PRESION LADO CORAZA (PSI)	COEF. PELICULA LADO TUBOS (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. PELICULA LADO CORAZA (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL LIMPIO (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL DISEÑO (BTU/HR*FT ² *F)	AREA/CORAZA (FT ²)	FDSO (E)	COSTO FIJO (US\$/ANO)	COSTO TOTAL (US\$/ANO)	
1	4.45	10.15	194.6	183.1	91.9	69.5	515.2	3.6	2238.5	2920.7
2	4.03	9.61	185.9	169.3	86.2	65.9	543.5	3.9	2321.6	2963.8
3	1.21	9.40	122.7	173.4	70.5	59.8	599.0	-2.7	2483.2	3057.9
4	0.80	7.02	102.1	145.9	59.1	47.8	749.8	5.1	2914.8	3362.0
5	7.80	10.20	234.1	184.8	103.4	70.2	510.5	9.9	2224.6	2975.3
6	9.44	9.83	254.8	174.7	100.7	78.0	459.5	-0.8	2073.0	2834.0
7	2.58	10.17	161.9	185.8	84.5	67.7	528.8	-0.4	2278.6	2925.5
8	2.17	10.70	149.6	167.2	77.3	61.6	581.2	1.8	2431.5	3101.2
9	5.42	10.58	214.0	184.1	96.3	70.4	508.9	6.1	2220.0	2946.5
10	6.70	9.92	235.3	174.2	97.4	79.2	452.4	-4.8	2051.8	2764.6
11	4.38	10.87	195.1	187.5	93.2	71.3	502.7	2.2	2201.4	2924.5
12	3.38	10.74	173.7	169.4	83.6	62.0	578.1	7.8	2422.4	3118.3

(A) DIMENSIONES NOMINALES
(B) 1: CUADRO; 2: DELTA; 3: ROMBO
(C) BIRMINGHAM WIRE GAGE
(D) DATO PARA CADA CORAZA
(E) FACTOR DE SOBREDISEÑO

RESUMEN DE RESULTADOS

LONGITUD TUBOS (FT)	DIAMETRO TUBOS (A) (IN)	APREGLO (B)	PASO TUBOS (IN)	CALIBRE BWG (C)	PASOS POR TUBOS (D)	TUBOS POR CORAZA	BANCOS EN PARALELO	DIAMETRO CORAZA (E) (IN)	PASOS POR CORAZA	DEFLECTORES POR CORAZA	% CORTE DEFLECTORES	
1	14.00	0.750	2	1.0000	14	6	172	1	17.25	1	21	24.08
2	14.00	0.750	1	1.0000	14	6	192	1	19.25	1	25	20.18
3	14.00	1.000	2	1.2500	14	8	128	1	19.25	1	19	23.90
4	14.00	1.000	1	1.2500	14	8	148	1	21.25	1	22	20.44
5	16.00	0.750	2	1.0000	14	6	172	1	17.25	1	23	24.94
6	16.00	0.750	1	1.0000	14	4	158	1	17.25	1	26	22.66
7	16.00	1.000	2	1.2500	14	8	128	1	19.25	1	21	24.56
8	16.00	1.000	1	1.2500	14	8	116	1	19.25	1	24	22.20
9	18.00	0.750	2	1.0000	14	6	172	1	17.25	1	25	25.69
10	18.00	0.750	1	1.0000	14	4	158	1	17.25	1	28	23.41
11	18.00	1.000	2	1.2500	14	6	104	1	17.25	1	22	28.82
12	19.00	1.000	1	1.2500	14	8	116	1	19.25	1	26	22.79

CAIDA PRESION LADO TUBOS (PSI)	CAIDA PRESTON LADO CORAZA (PSI)	COEF. PELICULA LADO TUBOS (BTU/HR*F T2*F)	COEF. PELICULA LADO CORAZA (BTU/HR*F T2*F)	COEF. GLOBAL LIMPIO (BTU/HR*F T2*F)	COEF. GLOBAL DISENO (BTU/HR*F T2*F)	AREA/ CORAZA (FT2)	FDSO (E)	COSTO FIJO (US\$/ANO)	COSTO TOTAL (US\$/ANO)	
1	9.12	10.08	257.2	185.7	104.7	75.8	472.8	5.1	2112.8	2882.3
2	7.49	10.93	234.6	170.2	95.0	67.9	527.8	9.8	2275.5	3062.5
3	7.23	10.41	233.4	189.1	101.6	76.4	469.1	2.0	2101.9	2854.0
4	5.51	9.89	207.0	166.0	89.9	66.0	542.4	7.2	2318.5	3006.2
5	9.99	10.22	256.2	185.7	104.5	66.3	540.4	20.0	2312.4	3106.9
6	3.72	10.36	196.3	172.9	89.6	72.2	496.4	-2.1	2182.8	2862.6
7	7.83	10.82	232.7	184.0	109.0	66.8	536.2	15.1	2300.1	3088.0
8	9.35	10.76	251.9	171.3	99.3	73.7	485.9	3.7	2151.8	2966.1
9	10.87	10.43	255.7	180.5	102.8	58.9	607.9	33.3	2508.9	3332.8
10	4.06	10.31	196.0	165.0	87.4	64.2	558.4	8.0	2365.2	3048.2
11	5.43	10.77	216.9	188.6	98.2	73.1	490.1	3.8	2164.2	2902.2
12	10.06	10.89	251.1	171.4	99.1	65.5	546.6	16.6	2330.8	3165.9

(A) DIMENSIONES NOMINALES
 (B) 1: CUADRO; 2: DELTA; 3: ROMBO
 (C) BIRMINGHAM WIRE GAGE
 (D) DATO PARA CADA CORAZA
 (E) FACTOR DE SOBREDISENO

RESUMEN DE RESULTADOS

LONGITUD TUBOS (FT)	DIAMETRO TUBOS (A) (IN)	APREGLO (B)	PASO TUBOS (IN)	CALIBRE BWG (C)	PASOS POR TUBOS (D)	TUBOS POR CORAZA	BANCOS EN PARALELO	DIAMETRO CORAZA (E) (IN)	PASOS POR CORAZA	DEFLECTORES POR CORAZA	% CORTE DEFLECTORES	
1	8.00	0.750	2	1.0000	14	6	474	1	27.00	1	17	16.00
2	8.00	0.750	1	1.0000	14	6	458	1	29.00	1	16	16.00
3	8.00	1.000	2	1.2500	14	8	316	1	29.00	1	16	16.00
4	8.00	1.000	1	1.2500	14	8	358	1	31.00	1	15	16.00
5	10.00	0.750	2	1.0000	14	4	352	1	23.25	1	25	16.00
6	10.00	0.750	1	1.0000	14	4	370	1	25.00	1	24	16.00
7	10.00	1.000	2	1.2500	14	6	212	1	23.25	1	25	16.00
8	10.00	1.000	1	1.2500	14	6	258	1	27.00	1	22	16.00
9	12.00	0.750	2	1.0000	14	4	352	1	23.25	1	30	16.00
10	12.00	0.750	1	1.0000	14	4	308	1	23.25	1	30	16.00
11	12.00	1.000	2	1.2500	14	4	212	1	23.25	1	30	16.00
12	12.00	1.000	1	1.2500	14	6	226	1	25.00	1	28	16.00

CAIDA PRESION LADO TUBOS (PSI)	CAIDA PRESTON LADO CORAZA (PSI)	COEF. PELICULA LADO TUBOS (BTU/HR*F T2*F)	COEF. PELICULA LADO CORAZA (BTU/HR*F T2*F)	COEF. GLOBAL LIMPIO (BTU/HR*F T2*F)	COEF. GLOBAL DISENO (BTU/HR*F T2*F)	AREA/ CORAZA (FT2)	FDSO (E)	COSTO FIJO (US\$/ANO)	COSTO TOTAL (US\$/ANO)	
1	10.51	1.02	121.0	130.2	61.6	48.1	744.6	8.1	2899.9	3536.5
2	13.82	0.59	121.4	105.2	55.5	48.7	735.1	-2.4	2873.2	3519.4
3	10.50	1.22	129.0	136.8	65.2	661.8	0.8	2664.2	3304.2	
4	8.37	0.67	113.5	109.7	55.0	47.8	749.8	-1.2	2914.8	3418.8
5	6.72	2.30	108.2	154.9	62.6	51.8	691.1	1.7	2748.0	3187.2
6	6.16	1.40	101.5	127.8	55.7	49.3	726.5	-3.2	2848.7	3237.4
7	10.89	3.40	143.5	174.7	77.2	64.5	555.0	-2.9	2355.3	3060.9
8	7.15	1.47	114.0	129.0	59.5	51.1	701.6	-1.1	2777.9	3225.9
9	7.38	2.67	107.9	155.0	62.5	43.2	829.4	21.8	3139.2	3624.5
10	9.51	1.95	123.6	136.1	63.6	49.4	725.7	8.2	2846.4	3442.8
11	3.84	4.08	97.1	177.1	61.7	53.8	666.0	-3.3	2676.2	2981.5
12	10.81	2.19	133.6	138.8	65.8	50.5	710.0	10.3	2801.8	3479.0

(A) DIMENSIONES NOMINALES
 (B) 1: CUADRO; 2: DELTA; 3: ROMBO
 (C) BIRMINGHAM WIRE GAGE
 (D) DATO PARA CADA CORAZA
 (E) FACTOR DE SOBREDISENO

RESUMEN DE RESULTADOS

LONGITUD TUBOS (FT)	DIAMETRO TUBOS (IN)	APREGLO (B)	PASO TUBOS (IN)	CALIBRE BWG (C)	PASOS POR TUBOS (D)	TUBOS POR CORAZA	BANCOS EN PARALELO	DIAMETRO CORAZA (E) (IN)	PASOS POR CORAZA	DEFLECTORES POR CORAZA	% CORTE DEFLECTORES	
1	14.00	0.750	2	1.0000	14	4	352	1	23.25	1	36	16.00
2	14.00	0.750	1	1.3000	14	4	303	1	23.25	1	36	16.00
3	14.00	1.000	2	1.2500	14	4	140	1	19.25	1	43	16.00
4	14.00	1.000	1	1.2500	14	4	158	1	21.25	1	39	16.00
5	16.00	0.750	2	1.0000	14	2	250	1	19.25	1	49	16.00
6	16.00	0.750	1	1.0000	14	4	370	1	25.00	1	38	16.00
7	16.00	1.000	2	1.2500	14	4	140	1	19.25	1	48	16.00
8	16.00	1.000	1	1.2500	14	4	158	1	21.25	1	45	16.00
9	18.00	0.750	2	1.0000	14	2	135	1	17.25	1	58	16.00
10	18.00	0.750	1	1.0000	14	2	166	1	17.25	1	62	16.00
11	18.00	1.000	2	1.2500	14	4	140	1	19.25	1	52	16.00
12	18.00	1.000	1	1.2500	14	4	158	1	21.25	1	50	16.00

CAIDA PRESION LADO TUBOS (PSI)	CAIDA PRESION LADO CORAZA (PSI)	COEF. PELICULA LADO TUBOS (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. PELICULA LADO CORAZA (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL LIMPIO (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL DISENO (BTU/HR*FT ² *F)	AREA/CORAZA (FT ²)	FDSO (E)	COSTO FIJO (US\$/ANO)	COSTO TOTAL (US\$/ANO)	
1	9.25	3.37	107.7	157.4	62.8	37.0	967.6	42.8	3525.4	4075.6
2	10.63	2.46	123.4	138.0	64.0	42.3	846.7	26.8	3187.8	3859.7
3	8.93	9.73	145.2	218.2	95.2	69.8	513.1	-2.8	2232.3	2947.6
4	7.32	4.82	128.7	168.9	71.6	61.9	579.1	-4.7	2425.4	2949.8
5	2.47	7.43	70.8	196.4	51.3	45.6	785.4	-2.5	3015.4	3306.6
6	8.36	2.10	100.8	127.9	55.5	30.8	1162.4	54.4	4064.1	4595.8
7	9.75	10.41	144.8	215.8	84.7	61.1	586.4	10.5	2446.7	3223.5
8	7.83	5.52	128.4	168.9	71.5	54.1	661.8	8.8	2664.2	3232.1
9	4.25	10.66	96.2	211.8	65.0	51.7	692.7	5.1	2752.5	3211.4
10	5.75	9.32	115.4	193.7	73.9	61.1	586.7	-4.3	2447.5	2968.5
11	10.57	10.54	144.4	211.0	93.3	54.3	659.7	23.3	2658.2	3485.5
12	8.49	6.00	128.1	168.9	71.5	48.1	744.6	22.3	2899.9	3515.9

(A) DIMENSIONES NOMINALES
 (B) 1: CUADRO; 2: DELTA; 3: ROMBO
 (C) BIRMINGHAM WIRE GAGE
 (D) DATO PARA CADA CORAZA
 (E) FACTOR DE SOBREDISENO

RESUMEN DE RESULTADOS

LONGITUD TUBOS (FT)	DIAMETRO TUBOS (IN)	APREGLO (B)	PASO TUBOS (IN)	CALIBRE BWG (C)	PASOS POR TUBOS (D)	TUBOS POR CORAZA	BANCOS EN PARALELO	DIAMETRO CORAZA (E) (IN)	PASOS POR CORAZA	DEFLECTORES POR CORAZA	% CORTE DEFLECTORES	
1	20.00	0.750	2	1.0000	14	4	122	1	15.25	1	26	30.50
2	20.00	0.750	1	1.0000	14	4	116	1	15.25	1	29	27.59
3	20.00	1.000	2	1.2500	14	6	104	1	17.25	1	23	30.48
4	20.00	1.000	1	1.2500	14	6	90	1	17.25	1	26	27.24

CAIDA PRESION LADO TUBOS (PSI)	CAIDA PRESION LADO CORAZA (PSI)	COEF. PELICULA LADO TUBOS (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. PELICULA LADO CORAZA (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL LIMPIO (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL DISENO (BTU/HR*FT ² *F)	AREA/CORAZA (FT ²)	FDSO (E)	COSTO FIJO (US\$/ANO)	COSTO TOTAL (US\$/ANO)	
1	7.09	10.89	242.1	185.3	102.0	74.8	479.1	4.4	2131.5	2908.1
2	7.73	10.58	251.9	174.9	100.3	78.6	455.5	-1.9	2061.2	2832.5
3	5.82	10.08	215.4	183.5	96.7	65.8	544.5	13.9	2324.6	3029.5
4	7.61	9.90	243.5	171.2	97.8	76.0	471.2	-0.5	2108.1	2837.7

(A) DIMENSIONES NOMINALES
 (B) 1: CUADRO; 2: DELTA; 3: ROMBO
 (C) BIRMINGHAM WIRE GAGE
 (D) DATO PARA CADA CORAZA
 (E) FACTOR DE SOBREDISENO

RESUMEN DE RESULTADOS

LONGITUD TUBOS (FT)	DIAMETRO TUBOS (A) (IN)	ARREGLO (B)	PASO TUBOS (IN)	CALIBRE B.W.G. (C)	PASOS POR TUBOS (D)	TUBOS POR CORAZA	BANCOS EN PARALELO	DIAMETRO CORAZA (E) (IN)	PASOS POR CORAZA	DEFLECTORES POR CORAZA	% CORTE DEFLECTORES	
1	20.00	0.750	2	1.0000	14	2	139	1	15.25	1	59	17.47
2	20.00	0.750	1	1.0000	14	2	155	1	17.25	1	69	16.00
3	20.00	1.000	2	1.2500	14	2	152	1	19.25	1	56	16.00
4	20.00	1.000	1	1.2500	14	4	158	1	21.25	1	56	16.00

CAIDA LADO TUBOS (PSI)	PRESION LADO TUBOS (PSI)	CAIDA LADO CORAZA (PSI)	PRESION LADO CORAZA (PSI)	COEF. PELICULA LADO TUBOS (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. PELICULA LADO CORAZA (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL LIMPIO (BTU/HR*FT ² *F)	COEF. GLOBAL DISEÑO (BTU/HR*FT ² *F)	AREA CORAZA (FT ²)	FDSO (E)	COSTO FIJO (US\$/ANO)	COSTO TOTAL (US\$/ANO)
1	7.95	10.50	139.9	214.2	82.7	66.1	541.9	0.2	2317.0	2990.3	
2	5.26	10.41	115.3	193.7	73.8	55.0	651.9	6.3	2635.6	3208.0	
3	1.40	10.74	65.0	212.2	49.1	45.0	795.9	-5.0	3044.9	3338.7	
4	9.15	6.82	127.9	169.0	71.4	43.3	827.3	35.8	3133.4	3804.2	

(A) DIMENSIONES NOMINALES
 (B) 1: CUADRO; 2: DELTA; 3: RONDO
 (C) BIRMINGHAM WIRE GAGE
 (D) DATO PARA CADA CORAZA
 (E) FACTOR DE SOBREDISEÑO

*** TERMINA EJECUCION PROGRAMA OPTERM. ***

CONCLUSIONES

El programa descrito puede reportar considerables beneficios. Merecen mención los siguientes:

- Se puede emplear para realizar verdaderas operaciones de dimensionamiento de equipos industriales. Mediante su uso se puede recomendar el equipo más económico o compacto que cumpla los requerimientos de proceso y fabricación para un servicio dado.
- Representa una herramienta poderosa que permite efectuar con rapidez y eficiencia los cálculos asociados con el dimensionamiento y optimización de estos intercambiadores; la principal demora en el cálculo radica ahora en la recolección y preparación de los datos para alimentar el programa.
- El programa permite al diseñador examinar diversas alternativas para un mismo servicio; su tiempo puede ser usado en forma más efectiva, dejando las operaciones repetidas al computador, mientras él se dedica a analizar

los resultados obtenidos con miras a mejorarlos.

Mediante el programa se sustituyen los métodos de dimensionamiento convencionales, dando lugar a métodos más refinados, que describen más exactamente lo que ocurre dentro del equipo. Esto redundará en un diseño más exacto y confiable, y garantiza que las unidades dimensionadas tengan un funcionamiento eficiente y económico. No obstante, la intervención del diseñador en el proceso de cálculo es fundamental para la calidad de los resultados, dado que en éste hay consideraciones que son difíciles de cuantificar o de expresar en forma de relación matemática, como sucede, por ejemplo, con consideraciones como las características de obstrucción de los fluidos y su sensibilidad térmica, y con aspectos que involucran factores no relacionados con el funcionamiento en sí de los equipos, tales como facilidad de limpieza, complejidad de fabricación, etc.

BIBLIOGRAFIA

1. KERN, D. Q. Procesos de Transferencia de Calor. CECSA. México, 1978.
2. ROCHA, G. Dimensionamiento de Equipos para Transferencia de Calor con ayuda de computador. Universidad Nacional. Proyecto de Grado Ingeniería Química. Bogotá, 1984.
3. — Standards of the Tubular Exchangers Manufacturers Association. 5th ed. Tubular Exchangers Manufacturers Association, Inc. New York, 1968.