4 INTERCAMBIADORES DE CARCASA Y TUBOS

4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El diseño y construcción de los primeros intercambiadores de carcasa y tubos se inicio en los primeros años del siglo cuando se construyeron la primeras plantas de producción de energía eléctrica y eran necesarios grandes intercambiadores como condensadores y calentadores de agua. Actualmente se siguen utilizando intercambiadores de carcasa y tubos para este servicio aunque su diseño se ha sofisticado bastante.

En la industria también se empezó ha utilizar a principios de siglo con el desarrollo de la industria del petróleo que requería donde se utilizaron como calentadores, reboilers y condensadores para servicios con productos orgánicos normalmente bastante sucios y a altas temperaturas y presión. Desde el principio los problemas que presentaban estos intercambiadores no eran problemas de transferencia de calor o pérdida de carga, que se fueron estimando con la practica, sino más bien problemas con los materiales de construcción como los ocasionados por el stress térmico o problemas con las juntas entre los tubos y la placa de tubular. Hoy en día, aunque se ha avanzado mucho en este sentido estos problemas siguen ocasionado las averiasen estos equipos.

En los años 20 la tecnología de los intercambiadores de carcasa y tubos estaba bastante desarrollada y grandes unidades de hasta 500 m^2 fueron construidas para la creciente industria del petróleo.

Con la implantación de estos equipos surgió la necesidad de elaborar standards para el diseño mecánico tanto por cuestiones de seguridad, control de calidad y uniformidad de equipos. El primer de estos documentos fue TEMA del año 1941. Hoy en día con su sexta edición se sigue considerando el standard en todo el mundo.

Entre los años 40 y 50 se llevo a cabo una intensa labor de investigación que permitió establecer la bases de calculo de estos intercambiadores para los diversos servicios y resolver la mayoría de los problemas mecánicos en la construcción.

La construcción de los intercambiadores de carcasa y tubos se ha ido desarrollando a lo largo de los años y se han convertido en los intercambiadores más ampliamente utilizados por su construcción robusta y por la gran variedad de diseños y condiciones de operación a las que pueden acomodarse, en particular:

Se pude utilizar en procesos sin cambio de fase, condensación y ebullición en posición horizontal y vertical y tanto por el lado de tubos como del lado carcasa.

Pueden soportar tanto condiciones de vacío como alta presión.

La pérdida de carga se puede acomodar en un amplio intervalo y de manera independiente para cada uno de los fluidos.

El stress térmico se puede eliminar con un diseño adecuado.

El tamaño puede ir desde unidades muy pequeñas hasta unidades de 5000 m^2.

Se pueden utilizar gran variedad de materiales en función de las necesidades de construcción.

Permiten la utilización de superficies extendidas.

El haz de tubos se puede extraer para limpiar y reparar

4.2 DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE CARCASA Y TUBOS TIPO TEMA

4.2.1 PRÁCTICA RECOMENDADA PARA LA DESIGNACIÓN DEL TIPO Y TAMAÑO DE UN INTERCAMBIADOR

4.2.1.1 Dimensiones

Las dimensiones de un intercambiador vienen definidas por números que representan el diámetro de la carcasa y la longitud de los tubos.

4.2.1.1.1 Diámetro nominal

Es el diámetro interior de la envolvente generalmente en pulgadas. En el caso de evaporadores tipo KETTLE deben aparecer dos diámetros (del haz y envolvente respectivamente).

4.2.1.1.2 Longitud nominal

Es la longitud total de los tubos, generalmente en pulgadas. Para tubos en "U" solo se considerará la longitud recta de los mismos, excluyendo la zona curva.

4.2.1.2 TIPOS

La designación del tipo de un intercambiador se hace mediante tres letras, que describe el tipo de cabezal frontal, tipo de envolvente y tipo de cabezal de retorno.

4.3 CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO

4.3.1 SELECCION DEL TIPO TEMA

4.3.1.1 Tipo de haz tubular

a) Placa tubular fija. Este tipo de construcción es probablemente la utilizada con mayor frecuencia. La construcción es simple y económica y el interior de los puede limpiarse mecánica y químicamente. Sin embargo, la superficie exterior de los tubos solo se puede limpiar mediante limpieza química. Además, si hay diferencia de temperaturas entre los materiales del tubo y de la carcasa presenta problemas de stress térmico. Si la presión en la carcasa es reducida este problema se puede solucionar con la colocación de fuelles de expansión en la carcasa.

b) Tubos en U. Este tipo de construcción resulta ligeramente más cara que la anterior. El haz de tubos se puede extraer de la carcasa para limpieza o mantenimiento. La limpieza mecánica del interior de los tubos no es muy efectiva por lo que se utiliza cuando el fluido interior es limpio. La expansión térmica de los tubos no presenta problemas pero presenta el inconveniente que resulta complicado reemplazar un tubo en caso de ruptura. Para llegar a los tubos centrales se debe desmontar todo el haz tubular.

c) Cabezal flotante o extraible. Este tipo de construcción se utilIza en servicios sucios asociados a altas temperaturas y presiones. Económicamente resulta aproximadamente un 25 % más caro que la placa tubular fija. El haz tubular consiste en tubos rectos asegurados en cada extremo con una placa tubular. En la parte posterior se cierran los tubos mediante el cabezal flotante. El haz tubular se puede extraer con facilidad para limpieza y mantenimiento. Los tubos pueden ser limpiados mecánicamente tanto por la parte exterior como interior de los tubos.

4.3.1.2 Extremos del intercambiador

El tipo más económico de fondos es generalmente el integral bombeado (tipo B/M). Presenta el inconveniente de que para tener acceso a las placas de tubos, es necesario desmontarlo de dichas placas y de las líneas que entran y salen del equipo. Se sugiere el empleo del tipo B/M cuando no se requiere una limpieza muy frecuente por el interior de los tubos. El problema anterior queda subsanado mediante el empleo de fondos desmontables (tipos A/L/N) no obstante debe tenerse en cuenta que su coste es más elevado.

El distribuidor integral y fondo desmontable (tipos C/N) se emplean generalmente para servicios de alta presión y temperatura, en los que la reducción en el número de bridas puede ser ventajosa.

La disposición con placas tubulares fijas (tipos L/M/N) es una construcción rígida, las placas de tubos están soldadas a la envolvente. No obstante, debe tenerse en cuenta que el exterior de los tubos es inaccesible, por lo que solo deberá emplearse este tipo de equipos, cuando el fluido que circule por el exterior de los tubos sea muy limpio o sea factible la limpieza química. Sin embargo, cualquier fuga en tubos permite fácilmente su taponamiento o reposición.

El fondo flotante tipo P se emplea solamente para bajas presiones, y cuando el fluido que circula por la carcasa no represente peligro al producirse una fuga del mismo (por ejemplo agua). Debe prestarse considerable atención al acabado de todas las superficies componentes precisamente para evitar las fugas. La corrosión en las superficies de deslizamiento ocasiona con frecuencia problemas adicionales. Similares comentarios a los hechos para la cabeza flotante tipo P podrían hacerse para los de tipo W aunque esta tiene la ventaja de que en caso de funcionar como cabezal de salida, la conexión para éste no es necesario que vaya en la tapa, sino que puede colocarse, con las ventajas que esto representa, en una dirección radial.

Los tipos de carcasa flotante más frecuentemente empleados son los S y T. El tipo S presenta la ventaja frente al tipo T de que la distancia entre el haz tubular y el interior de la envolvente es mínima y como inconveniente frente al citado tipo T, que es necesario desmontar la cabeza flotante para poder extraer el haz.

En los intercambiadores con cabeza flotante tipo T puede extraerse el haz sin necesidad de desmontar la cabeza flotante; su principal inconveniente es que a igual diámetro de haz que en el tipo S, requiere mayor diámetro de carcasa.

Cuando se diseñe un intercambiador con cabeza flotante S o T con un solo paso por tubos es necesario colocar una junta de expansión en la conexión de salida para evitar los efectos de la expansión diferencial de los tubos. La construcción con tubos en "U" presenta como ventaja fundamental ante los tipos de cabeza flotante, la de su menor coste, ya que tiene una sola placa de tubos y menor número de bridas. Su principal desventaja, estriba en la dificultad de limpieza mecánica del interior de los tubos por lo que su uso debe restringirse a aquellos casos en que el fluido que circule por ellos sea limpio.

4.3.1.3 Tipos de envolvente

La más empleada, es la de un solo paso (tipo E) con varias disposiciones de deflectores. Ocasionalmente, puede emplearse envolventes con dos pasos (tipo F) conseguidos mediante el empleo de deflector longitudinal. Se emplea cuando se requiere una contracorriente pura con dos pasos por los tubos. La perdida de carga es 8 veces la del tipo E y además presenta muchos problemas de fugas a través del

deflector longitudinal por lo que su utilización esta restringida a los casos en que una contracorriente pura es necesaria.

Para los intercambiadores con haz extraible, este deflector esta unido a la envolvente mediante laminillas de acero inoxidable que se ajustan a presión. Cuando la caída de presión en la envolvente del intercambiador es alta puede producirse un by-pass a través de estas laminillas, esta es la razón por la cual la caída de presión máxima recomendada con este tipo de envolventes es de 0,4 Kg/cm^2 aproximadamente.

Las disposiciones con flujos partido y dividido (tipos G, H y J) se emplean fundamentalmente para servicios de condensación, evaporación y enfriamiento de gases, en los que las pérdidas de carga máximas permisibles son muy bajas. Las del tipo G y H tienen una perdida de carga del mismo orden que las del tipo E pero la efectividad térmica es mucho mayor. Se utilizan normalmente en reboilers aunque también se pueden utilizar en flujos sin cambio de fase. Las de tipo J tienen una entrada y dos salidas proporcionando una pérdida de carga que es 1/8 de la del tipo E. Se utiliza básicamente en aplicaciones a baja presión como son los enfriadores de gases.

La envolvente tipo KETTLE se emplea exclusivamente para procesos de vaporización. El diámetro de la envolvente, suele ser 1,6 a 1,8 veces el diámetro del haz, para permitir una adecuada separación del vapor de la mezcla en ebullición.

Las de tipo X son las últimas que se ha incorporado al standard TEMA. Es una envolvente sin deflectores con un flujo cruzado con unas pérdidas de carga muy baja que se utilizan para condensar vapores a presión.

En ocasiones suele recurrirse al empleo de juntas de expansión en la envolvente, para impedir que la dilatación diferencial de los tubos repercuta en esfuerzos excesivos sobre ellos mismos y sobre la envolvente.

Este tema es de gran importancia en los intercambiadores de placas fijas donde la dilatación diferencial es más acusada, el diseñador deberá calcular siempre esta dilatación y los esfuerzos que genera para decidir sobre la colocación de la citada junta de expansión.

4.3.2 DIMENSIONES RECOMENDADAS

Un diseño óptimo puede no tener en cuenta dimensiones recomendadas, razón por la cual puede en ocasiones no resultar el más económico. El empleo de estas dimensiones recomendadas puede reducir los costos y plazos de entrega al permitir la estandarización de materiales y reducir el número de elementos diferentes en stock. A continuación pasamos a discutir las dimensiones recomendadas más importantes a tener en cuenta en un buen diseño térmico.

4.3.2.1 Diámetro de tubos

Mientras menor sea el diámetro del tubo, menor será el coste del intercambiador ya que a menor diámetro de tubos, mayor número de ellos pueden ser acomodados en un diámetro determinado de carcasa para un paso entre tubos dado.

El diámetro inferior de los tubos, está limitado generalmente por consideraciones de limpieza.

Los tubos con diámetro interior inferior a 0,5 pulgadas (12,7 mm) no pueden ser limpiados mecánicamente ni con agua a presión. Esto quiere decir, que el mínimo diámetro externo de los tubos a emplear deben ser de 3/4". Para tubos en "U" el mínimo diámetro exterior permitido para limpieza mecánica es de 1" debido a la curvatura. A veces existen consideraciones de pérdidas de carga que obligan a utilizar tubos de mayor diámetro.

La elección final depende de un compromiso entre el diseño térmico óptimo y la accesibilidad y estandarización de las dimensiones del tubo.

4.3.2.2 Espesor del tubo

El espesor de pared del tubo, debe ser suficiente para soportar las presiones interior y exterior en servicio, tensiones longitudinales, consideraciones mecánicas y corrosión. No obstante, el espesor requerido para soportar las presiones y tensiones longitudinales hasta 30 Kg/cm^2 son pequeños comparados con el requerido por corrosión. El espesor de los tubos recomendado, se suele especificar en función del material.

Material	Diámetro exterior (inch)	Espesor Recomendado (SWG)
Acero al carbono	3/4	14
Acero al carbono	1	12
Aleaciones de cobre	3/4	16
Aleaciones de cobre	1	14
Acero inoxidable	3/4	16
Acero inoxidable	1	14
Titanio	3/4	18
Titanio	1	16

La elección final del espesor del tubo depende como es obvio de un detallado diseño mecánico.

4.3.2.3 Longitud de los tubos

Para una superficie de transferencia de calor dada, un intercambiador de calor será tanto más económico cuanto mayor sea la longitud de tubos. Así por ejemplo un intercambiados de 8 ft de longitud de tubos podría costar aproximadamente el doble de otro con 16 ft con la misma superficie, quiere esto decir que el diseñador debe ir siempre a la misma longitud de tubos compatible con las pérdidas de carga permitidas y con los requisitos de implantación. Normalmente la relación entre la longitud de los tubos y el diámetro de la carcasa se sitúa entre 5 y10.

Las dimensiones recomendadas de tubos son:

8, 10, 12, 16, 20, 24 ft.

Lo normal es que existan tubos en stock de muchos materiales, hasta 20 ft. Sin embargo pueden emplearse otras longitudes aunque deben considerarse los posibles problemas de entrega.

Lo normal es que un cliente exija una longitud fija de tubos para todos los intercambiadores de sus plantas o submúltiplos enteros de ello así como el mismo espesor y diámetro para el mismo material, esto le permite mantener un stock de repuestos para posibles reposiciones.

Todo lo que hemos dicho anteriormente, se refiere a tubos rectos. Para tubos en "U" el tratamiento es completamente diferente. Un intercambiador con tubos en "U" está formado por un determinado número de horquillas con la misma longitud recta, pero la parte curva es diferente de unas a otras (aunque haya algunas iguales entre sí) esto unido a la dificultad (o imposibilidad) de reposición de las horquillas hace que en estos casos se empleen longitudes no estandarizadas.

4.3.2.4 Paso entre tubos (Pitch)

El mínimo paso entre tubos para intercambiadores tubulares es 1.25 veces el diámetro exterior de los tubos. Sin embargo para tubos de 3/.4", que según esta indicación correspondería un paso de 0.9375", la distancia entre las paredes de dos tubos contiguos, seria de 0.1875"; esta distancia tan pequeña puede crear problemas en la unión de tubos a placas.

Cuando se requieren canales para limpieza mecánica deberá emplearse una separación mínima de 0.25" y disposición en cuadrado o cuadrado rotado.

Las cuatro disposiciones que se usan en intercambiadores de carcasa y tubos son: triangular, triangular rotado, cuadrado y cuadrado rotado.

La tabla siguiente, establece una comparación entre las diferentes disposiciones en términos de transferencia de calor, pérdida de carga y posibilidades de limpieza.

	T Normal	T Rotado	C Normal	C Rotado
Angulo de ataque	30	60	90	45
Transferencia de calor	1 (alta)	2	4 (baja)	3
Pérdida de carga	4 (alta)	3	1 (baja)	2
Limpieza mecánica	No	No	Si	Si

Debe notarse, que con el mismo diámetro y paso entre tubos, la disposición triangular da un 15% aproximadamente más de área que la disposición cuadrada para un diámetro de envolvente dado. Por tanto se prefiere la disposición triangular salvo que las consideraciones de pérdida de carga y ensuciamiento sean más significativas que las de transferencia de calor.

4.3.2.5 Diámetro de la envolvente

El diámetro más económico, será el menor que contenga en su interior el número de tubos fijado teniendo en cuenta las consideraciones de número de pasos, área libre de entrada y salida del fluido, etc. Existen muchos datos publicados sobre tabulación de diámetros, en función del número de tubos y paso entre ellos (Ver KERN pág. 946 y 947).

4.3.2.6 Deflectores/soportes de tubos

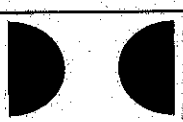
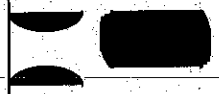
Estas chapas, tienen un doble propósito, como desviadoras de flujo en la carcasa y como soportes para mantener el paso correcto entre tubos evitando vibraciones inducidas. Existe un gran número de deflectores que se emplean comúnmente.

El espaciado óptimo entre deflectores para procesos sin cambio de fase es aproximadamente el 40% del diámetro de la envolvente. El mínimo espaciado es el recomendado por TEMA, 20% del diámetro de la envolvente o 2 pulgadas, el mayor.

La máxima distancia viene determinada por la máxima distancia sin soportar de tubos permitida por la norma TEMA; para tubos de 3/4" es 60", lo cual quiere decir que para deflectores de tipo "segmental" la máxima distancia entre ellos debe ser de 30".

El corte del deflector, se especifica como un tanto por ciento del diámetro de la envolvente.

El corte del deflector se determina como una combinación de efectos de pérdida de carga y transferencia de calor. Una buena aproximación, sería adecuar el corte del deflector, de forma que el área de paso del fluído a través de él sea aproximadamente la misma que la que corresponde al flujo transversal al haz.

	TIPO DE DEFLECTOR		APLICACIÓN
Segmento simple	Corte horizontal		Sin cambio de fase. Calentamiento y enfriamiento. Para evitar vibraciones se utiliza la configuració sin tubos en el corte.
	Corte vertical		Vaporización. Condensación. Sin cambio de fase con sólidos en suspensión.
Segmento doble	Corte horizontal		Como el segmentado simple, pero para requerimientos de baja pérdida de carga.
	Corte vertical		Como el segmentado simple, pero para requerimientos de baja pérdida de carga.
Disco y anillo			Como alternativa al doble segmentado de corte horizontal. No se emplea frecuentemente por su elevado coste.
Completo			Vaporización. En otros procesos para dividir el flujo.
Longitudinal			Vaporización. Condensación. Asegura la buena distribución del flujo en doble fase.

4.3.2.7 Llantas de sellado

Son unas chapas alineadas con el haz tubular y soldadas a los deflectores que evitan el by-pass en la envolvente cuando la diferencia entre el diámetro de la envolvente y del haz sea al menos de 30 mm. Estas llantas de sellado no son necesarias cuando se trate de servicios de condensación o evaporación.

4.3.2.8 Chapa de choque

Estas chapas se colocan en el haz tubular, en coincidencia con la conexión de la envolvente; para prever que los sólidos suspendidos o las gotas de líquido en fase mixta produzcan corrosión o erosión en el haz tubular al efectuarse el choque. Las líneas generales para su uso son las que se indican a continuación.

Condiciones del fluido	Se requiere chapa de choque cuando el valor de ρV^2(kg/ms^2) exceda del siguiente valor.
Fluido no corrosivo ni abrasivo en fase simple	2200
Todos los restantes líquidos incluyendo aquellos que están en su punto de ebullición	700
Todos los gases y vapores incluyendo los saturados y mezclas vapor líquido	0

En una primera etapa del diseño debe decidirse si se requiere o no chapa de choque, ya que su colocación puede incidir en la determinación del diámetro de la envolvente.

Su posición en el haz, viene en función del área de la conexión de entrada a la envolvente, de forma que dicha área sea la misma que la chapa de choque deja libre para penetrar en el haz.

4.3.2.9 Areas de paso libres a la entrada y salida del haz.

Además de lo anterior, deberá preverse una adecuada área de escape del fluido en la conexión de salida; este área, deberá preverse también a la entrada cuando el intercambiador no lleve chapa de choque.

El área de escape en las conexiones de entrada y salida deberán ser al menos iguales a las de la correspondiente conexión. Además el valor de ρV^2 no debe exceder de 400 lb/ft^{2}s.

El diseño del haz tubular previendo este área de escape en la conexión de salida, se desprecia con frecuencia; las consecuencias son: mayores caídas de presión y peligros de vibración.