

14
29.



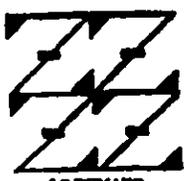
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE EYECTORES
PARA LA GENERACION DE VACIO PARA
LA PLANTA PILOTO DE LA FES
ZARAGOZA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:
PEDRO R. ^{raymundo} GARCIA MORAN

DIRECTOR DE TESIS: ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

LO HUMANO
ES
DE NUESTRA REFLEXION

México, D.F., a 20 de Febrero de 1998

263744



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
JEFATURA DE INGENIERIA QUIMICA
OFICIO: 082/008/98



C. Pedro Raymundo García Morán
Presente

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

Presidente: Dr. Sergio Trejo Martínez
Vocal: I.Q. Alejandro Rogel Ramírez
Secretario: I.Q. René de la Mora Medina
Suplente: I.Q. Rafael Sánchez Dirzo
Suplente: I.Q. José Benjamín Rangel Granados

ATENTAMENTE
"LO HUMANO EJE DE NUESTRA REFLEXION"
México, D.F., 26 de Febrero de 1998

I.Q. Magín Enrique Juárez Villar
Jefe de la Carrera

irm

ÍNDICE

Introducción	i
Capítulo 1	1
1.1.-¿Qué es un eyector?	2
1.2.-Tipos de eyectores	5
1.3.-Arreglos de sistemas eyectores	5
1.4.-Nomenclatura estándar para los sistemas eyectores	6
1.5.-Terminología típica para sistemas eyectores	7
1.6.-Efecto de algunas variables sobre la presión de succión y descarga	13
1.7.-Códigos aplicables	16
Capítulo 2	19
2.1.-Recomendaciones para la especificación de un sistema eyector	20
2.2.-Tipos de carga	20
2.3.-Infiltración de aire	22
2.4.-No condensables	27
2.5.-Condensables	27
2.6.-Propiedades	27
2.7.-Presión de succión	28
2.8.-Temperatura de succión	28
2.9.-Presión de descarga	28
2.10.-Presión de vapor motriz	30
2.11.-Capacidad	33
2.12.-Rango de operación estable	33
2.13.-Tiempo de evacuación	34
2.14.-Condensadores	35
2.15.-Tipo de conexiones	36
2.16.-Equipo auxiliar	36
2.17.-Sobrecalentador	36
2.18.-Número de elementos	36
2.19.-Número de etapas	37
2.20.-Factores de costo utilidad	37
2.21.-Materiales de construcción	37
2.22.-Agua de enfriamiento	42
2.23.-Vapor	42
2.24.-Pruebas	42
2.25.-Características mecánicas varias	43
2.26.-Partes de recambio	44
2.27.-Tamaños límite	44
Capítulo 3	47
3.1.-Instalación de un sistema eyector	48
3.2.-Arreglo general	49

3.3.-Suministro de vapor	49
3.4.-Suministro de agua	51
3.5.-Pierna barométrica	52
3.6.-Pozo caliente (Hot well)	56
3.7.-Tubería de vacío	57
3.8.-Prueba de la capacidad en campo	57
3.9.-Operación del equipo eyector	58
3.9.1.-Suministro de vapor	59
3.9.2.-Seguridad	59
3.9.3.-Tubería de descarga	60
3.9.4.-Drene de condensado y pozo caliente	60
3.9.5.-Orientación de equipo	61
3.9.6.-Prueba y corrección de desperfectos	61
3.9.7.-Ensamble del eyector	62
3.9.8.-Corrección de fallas	63
3.9.9.-Pruebas al sistema para revisar infiltraciones	65
3.10.-Secuencia de arranque de un sistema eyector	65
3.11.-Localización de fallas en el sistema	66
Capítulo 4	
4.1.-Generalidades sobre el cálculo de un eyector	70
4.2.-Método general de cálculo del consumo de vapor motriz y agua de enfriamiento	70
4.2.1.-Cálculo del peso molecular promedio de la mezcla de no condensante y condensables	70
4.2.2.-Cálculo del aire equivalente seco, DAE	71
4.2.3.-Cálculo del porcentaje de no condensables, %NC	71
4.2.4.-Tipo de eyector	71
4.2.5.-Cálculo de la relación vapor/aire	71
4.2.6.-Cálculo de la relación agua/aire	72
4.2.7.-Cálculo de los factores de corrección	72
4.2.8.-Cálculo del consumo de vapor	72
4.2.9.-Cálculo del consumo total de agua, para eyector tipo condensante	72
4.3.-Métodos de cálculo de Lb/h de aire seco (DAE) dependiendo de la carga que maneje el eyector	73
4.3.1.-Si la carga es solamente aire	73
4.3.2.-Si la carga es solamente vapor de agua	73
4.3.3.-Si la carga es una mezcla de vapor de agua y aire	73
4.3.4.-Si la carga es una mezcla de gases, la cual no incluye vapor de agua	73
4.3.5.-Si la carga es una mezcla de gases y vapor de agua	74
4.3.6.-Si la carga es una mezcla de gases saturados con vapor de agua o de proceso	74
4.3.7.-Si la carga es aire saturado con vapor de agua	74
4.4.-Métodos de cálculo de consumo de vapor para casos particulares	75

4.4.1.-Consumo de vapor de un eyector de etapa individual	75
4.4.2.-Consumo de vapor de un eyector de una etapa con presión de succión entre 3 y 10 pulgadas de Hg. abs.	75
4.5.-Consumo de vapor para un eyector de dos etapas del tipo condensante entre 15 y 100 mm de Hg abs.	76
4.6.-Consumo de vapor de un sistema de dos etapas del tipo no condensante y con presión de succión entre 0.6 y 3.0 pulgadas de Hg. abs.	76
4.7.-Consumo de vapor para dos etapas con un intercondensador barométrico.	76
4.8.-Consumo de vapor para un eyector de 2 y 3 etapas condensantes	77
4.9.-Consumo de vapor para eyectores de una o varias etapas tipo no condensante.	77
4.10.-Consumo de vapor para una o varias etapas	78
4.11.-Consumo de vapor para varios tipos de sistemas de eyectores	79
4.12.-Métodos para calcular los consumos de agua de enfriamiento	79
4.12.1.-Consumo de agua de enfriamiento de un condensador	79
4.12.2.-Consumo de agua de enfriamiento para un eyector de dos etapas con un intercondensador barométrico	80
4.13.-Dimensionamiento preliminar del eyector	80
4.14.-Diseño estructural de los componentes de un eyector	82
4.14.1.-Espesor de la cámara de succión y difusor	83
4.14.2.-Algunas consideraciones sobre el diseño	83
Capítulo 5	85
5.0.-Descripción del sistema actual	86
5.1.-Condiciones de operación y carga	86
5.2.-Cálculo del aire seco equivalente, (DAE) a 70°C	87
5.3.-Tipo de eyector	89
5.4.-Dimensiones de cada etapa del sistema	90
Conclusión	100
Apéndice	101
Bibliografía	124

RESUMEN

El trabajo que aquí nos ocupa, trata de los métodos cortos para el dimensionamiento de las etapas de un sistema para generar vacío a través de eyectores. El primer capítulo explica las características del funcionamiento de los eyectores, así como los códigos empleados en el diseño de eyectores. El segundo capítulo trata de las recomendaciones empíricas para la especificación de sistemas eyectores, materiales de construcción, y el comportamiento de algunas variables que afectan el comportamiento de la operación del sistema. En el tercer capítulo se aborda el problema de la instalación del sistema. El cuarto capítulo proporciona diversos métodos de convertir la carga a succionar en carga equivalente de aire seco, la cantidad de vapor motriz y de agua de enfriamiento para el condensador, además de ecuaciones para obtener las dimensiones de cada etapa; también se da un apéndice para éste capítulo; en éste apéndice se da un conjunto de nomogramas que permiten estos cálculos. Finalmente en el quinto capítulo se realiza el dimensionamiento de un sistema de vacío para generar vacío para el laboratorio tipo planta piloto de la carrera de Ingeniería Química de la FES-ZARAGOZA.

RESUMEN

El trabajo que aquí nos ocupa, trata de los métodos cortos para el dimensionamiento de las etapas de un sistema para generar vacío a través de eyectores. El primer capítulo explica las características del funcionamiento de los eyectores, así como los códigos empleados en el diseño de eyectores. El segundo capítulo trata de las recomendaciones empíricas para la especificación de sistemas eyectores, materiales de construcción, y el comportamiento de algunas variables que afectan el comportamiento de la operación del sistema. En el tercer capítulo se aborda el problema de la instalación del sistema. El cuarto capítulo proporciona diversos métodos de convertir la carga a succionar en carga equivalente se aire seco, la cantidad de vapor motriz y de agua de enfriamiento para el condensador, además de ecuaciones para obtener las dimensiones de cada etapa; también se da un apéndice para éste capítulo; en éste apéndice se da un conjunto de nomogramas que permiten estos cálculos. Finalmente en el quinto capítulo se realiza el dimensionamiento de un sistema de vacío para generar vacío para el laboratorio tipo planta piloto de la carrera de Ingeniería Química de la FES-ZARAGOZA.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Galileo (1564 - 1642) fue el primer experimentador para generar el vacío desplazando el pistón de un cilindro. Torricelli (1608 - 1647) formó un vacío invirtiendo un tubo completamente lleno de mercurio. La unidad de presión más comúnmente usada, hoy, en la industria del vacío, es el torricelli (torr), en honor a éste científico.

La primera bomba de vacío útil fue construida por Otto von Guericke (1602 - 1686). Construida alrededor de 1650, esta bomba fue usada en 1654 en el famoso experimento de los hemisferios de Magdeburgo, en el cual treinta caballos fueron usados para separar dos hemisferios de cobre evacuados. La bomba consistió de un tubo cilíndrico con dos válvulas y fue sellado con agua. Von Guericke describió una versión más sofisticada de esta bomba en 1672. Ésta tenía un cilindro de madera, sellado con una cuerda húmeda y una válvula de cuero operada por una madera.

La necesidad de un sello de agua fue eliminada por la construcción mejorada de Robert Hooke en 1660. Un brazo cilíndrico sellado con un disco de cuero aceitado, probablemente sobre un émbolo de madera. Hacia 1709, Francis Hauksbee mejoró las técnicas de construcción lo suficiente para obtener presiones de alrededor de 25 torr, el límite impuesto por la temperatura y la presión del vapor de agua, el cual todavía estuvo presente en los diafragmas de cuero usados. Para 1982, Fleuss redujo el límite de presión alcanzable a 2×10^{-4} torr. Él eliminó el espacio de aire muerto al final de la carrera del pistón llenando el cilindro con aceite.

La bomba de vacío rotatoria, en principio similar a las usadas hoy, fue introducida en 1905 por W. Kaufmann. Una versión mucho más práctica de esta bomba fue introducida, también en 1905, por Gaede. Esta bomba de mercurio rotatoria, cuando se usó en conjunción con un retrobomba fue capaz de alcanzar presiones de alrededor de 10^{-6} torr. Las retrobombas por él desarrolladas fueron del tipo paleta rotatoria, todavía hoy frecuentemente usada. La versión de Gaede de la bomba del tipo paleta rotatoria fue capaz de alcanzar alrededor de 10^{-2} torr. En 1915, Gaede inventó la bomba de chorro de vapor, precursora de la bomba de difusión de aceite, la cual es el caballo de trabajo de la industria del vacío de hoy.

La medición del alto vacío puede marcarse por, relativamente, pocos acontecimientos. El primero fue la invención, en 1874, del manómetro McLeod, el cual es todavía el estándar más ampliamente usado en los mecanismos de medición del alto vacío de hasta alrededor de 10^{-6} torr. La variación de la conductividad térmica con la presión fue un principio utilizado por W. Voegé en 1906. Este es todavía un instrumento popular hoy. El más amplio mecanismo de medición de alto vacío, el manómetro de ionización de alambre caliente, fue primeramente descrito por Buckley en 1916.

La tecnología de alto vacío ha llegado a ser una de las mayores herramientas de proceso. Probablemente su uso más frecuente es en la industria metalúrgica. Los metales son fundidos bajo un ambiente de alto vacío para reducir las impurezas volátiles y la prevención de la oxidación. La aglomeración de polvos metálicos por presión es

ampliamente practicada en aplicaciones tales como en capacitores de tantalio. El soldado fuerte (soldado con latón) a vacío, frecuentemente, es usado como método de unión debido a que se alcanza una buena calada de soldadura en la aleación bajo un alto vacío. Otro procedimiento de unión, es la soldadura por haz de electrones, que es ampliamente usado debido a sus propiedades de penetración, lo cual permite una razón más grande de amplitud - profundidad de la zona fundida. Frecuentemente se usa el templado a vacío para mejorar las características eléctricas y magnéticas.

El mismo equipo usado para la deposición de aluminio sobre acero ha sido usado comercialmente para aluminizar plásticos, así como papeles. Unas pocas micropulgadas de aluminio sobre un sustrato de plástico resulta en un material similar, en apariencia, a la chapa de aluminio, con muy alta reflectividad. Este material tiene las propiedades de ser decorativo y funcional. El uso funcional va tan lejos como el aislamiento criogénico.

Las sustancias de alta reflectividad frecuentemente pueden ser secadas casi completamente en un ambiente de alto vacío. Hay aplicaciones notables, de éste principio, como la deshidratación por congelamiento de los alimentos. Los productos alimenticios, primero, son congelados y entonces el hielo es sublimado desde el producto por radiación térmica. El vapor de agua resultante desde la sublimación, generalmente, es condensado sobre una superficie refrigerada. Un producto secado de ésta manera, tiene excelentes tiempos de almacenamiento a temperatura ambiente y pueden ser reconstituidos (en inmersión en agua por unos minutos), y son tan semejantes al producto fresco inicial.

El equipo eléctrico de alto voltaje debe ser minuciosamente secado después de fabricarlo para asegurar la integridad del aislamiento. Debido a la limitada capacidad para soportar la temperatura del aislamiento, frecuentemente se requiere proveer vacío así como calor para obtener el máximo vacío.

La destilación de sustancias químicas sensibles a el calor bajo alto vacío, es otro ejemplo del uso de ésta tecnología.

Una aplicación en la industria electrónica, en adición a el sinterizado de los capacitores de tantalio, es la deposición de microcircuitos. Aquí, el material que va a formar parte del circuito es depositado a través una mascarilla en el patrón y secuencia deseado. Un haz de electrones puede usarse para remover áreas selectas del circuito. La evacuación de tubos electrónicos ha sido, también, uno de los mayores usos del equipo de alto vacío.

Otros dos campos importantes son la investigación termonuclear y las pruebas en ambiente espacial. Los experimentos de un reactor termonuclear requieren un ambiente con una presión de los gases contaminantes menor de 10^{-9} torr, en el rango de ultra alto vacío. Se ha hecho un esfuerzo de alto nivel en la simulación del ambiente espacial. El alto costo de fallas en los satélites hacen imperativas las pruebas a condiciones críticas de los diversos componentes. Muchas de estas pruebas se hacen a presiones de 10^{-9} torr y menores, para objetos muy grandes que frecuentemente producen grandes volúmenes de gas.

El procesamiento, al alto vacío, fue considerada hasta recientemente, como una técnica costosa y engorrosa. Pero la amplia diversidad de aplicaciones descritas anteriormente demuestran que no lo es tanto como lo parece. La disponibilidad de grandes bombas de vacío a un costo relativamente bajo, hacen ir de la escala de laboratorio a una escala industrial de manera práctica. La disponibilidad de grandes componentes combinado con el desarrollo de exclusas que pueden, continuamente, introducir y remover materiales desde un ambiente atmosférico a uno de alto vacío, llevó a un amplio uso del procesamiento a vacío continuo.

La remoción de aire en cámaras cerradas o succionado a vacío traen consigo un grupo completo de fenómenos físicos; el más obvio, de los cuales, es la simulación del ambiente espacial. Desde el punto de vista químico, un alto vacío forma una atmósfera inerte que permite el calentamiento de un material químico activo, sin la combinación con pequeñas cantidades de gases activos que suelen estar presentes en las así llamadas atmósferas inertes como las formadas con argón o helio.

Las impurezas volátiles pueden ser removidas a temperaturas relativamente bajas debido a la depresión del punto de ebullición, como resultado de la reducción de la presión. En el campo de la Física de los electrones, un ambiente de alto vacío permite a los electrones viajar largas distancias sin chocar. En el campo de la transferencia de calor, la ausencia de moléculas en un volumen confinado hace posible eliminar todos los modos de transferir el calor excepto la de radiación.

En la industria generalmente se emplean diversos equipos para producir vacío. Presiones de media pulgada de mercurio pueden obtenerse fácilmente usando una bomba rotatoria o reciprocante. Las bombas rotatorias de pistón, las bombas de aletas deslizantes y la compresora rotatoria son útiles para este objeto. La bomba rotatoria de pistón es capaz de producir presiones absolutas de 0.001 mm de Hg.

Aparte de las bombas mecánicas, antes mencionadas, existe un mecanismo conocido como eyector que tiene la apariencia de un tubo Venturi y que es capaz de producir una presión absoluta de 1 mm de Hg. Este mecanismo tiene la característica de que no tiene partes móviles y de que emplea un fluido motriz que da la acción de bombeo.

Para aplicaciones en las que resulta necesaria una presión sumamente baja (alto vacío), se recomienda la utilización de una bomba de difusión, la cual es capaz de producir presiones absolutas de 10^{-7} mm de Hg o menores. Para alcanzar estas presiones se emplean en serie una bomba de difusión y luego una bomba mecánica. Esto son los equipos comúnmente empleados para obtener presiones subatmosféricas o de vacío, como también se les conoce.

CAPITULO 1

CARACTERÍSTICAS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA EYECTOR

1.1.-¿Que es un eyector?

Un eyector es un tipo de compresor que emplea un fluido motriz a gran velocidad para arrastrar y comprimir, otro fluido, desde una presión subatmosférica hasta otra presión mayor. Al fluido que es arrastrado se le conoce como carga.

Todos los eyectores operan sobre un principio común; el fluido motriz que puede ser un gas, vapor o líquido que de preferencia sea condensable, en la mayoría de los casos se trata de vapor de agua. Entra a gran presión y baja velocidad en la caja motriz y luego es expandido al pasar a través de un orificio, que en este caso, se trata de la boquilla. Al salir de la boquilla, se expande en la cámara de succión, lo cual produce altas velocidades supersónicas. Aquí, la energía por presión, que el vapor contiene, se transforma en energía cinética. Este fenómeno produce un arrastre de los vapores y gases que se encuentran en su entorno; es entonces, cuando tanto el fluido motriz como la carga se combinan y fluyen a través de un difusor en forma de tubo Venturi, donde nuevamente la energía cinética de la mezcla se convierte en energía por presión, hasta alcanzar la presión de descarga.

La mayoría de la literatura se refiere a este proceso como un fenómeno isoentrópico, aunque también hay referencias que indican que es un proceso no isoentrópico, debido a la fricción y a las pérdidas térmicas en la boquilla. Esta simplificación se hace debido a que el fenómeno de la termodinámica y la dinámica del fluido que produce la acción de bombeo es tan complejo y técnicamente sofisticado, como los encontrados en la propulsión de aviones y misiles.

La fig. 1.1 muestra los perfiles de presión y velocidad a lo largo del equipo eyector, en donde se aprecia que a medida que disminuye la presión aumenta la velocidad, para luego recuperarse hasta alcanzar la presión de descarga, que es una presión mayor que la de succión pero menor que la del fluido motriz.

La velocidad de la mezcla a través de la garganta del difusor debe estar arriba de la velocidad del sonido, de otra manera, la presión decrecerá a través de la garganta del difusor en lugar de incrementarse y entonces no será posible alcanzar la presión de descarga y existe el riesgo de haya contraflujo debido a la alta contrapresión.

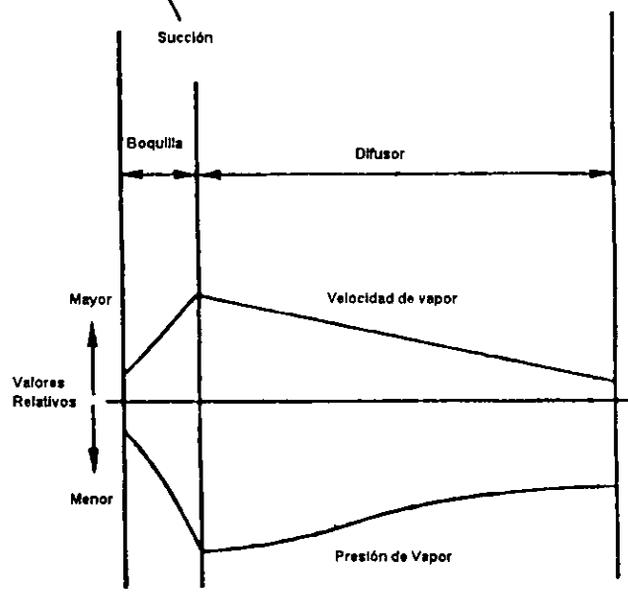
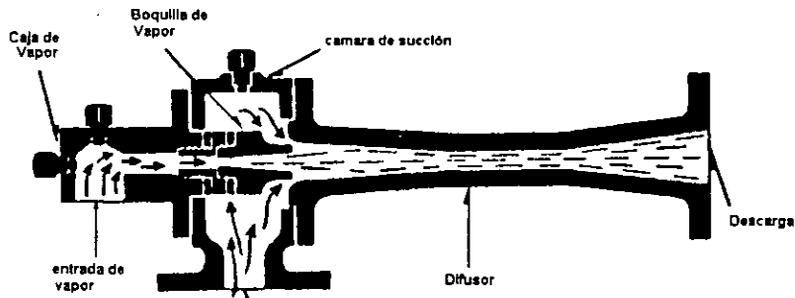


Fig.1.1.-Perfil de presión y velocidad a lo largo del equipo eyector (ref.10).

El fluido a comprimir, o sea la carga, puede estar compuesto por un vapor condensable, como vapor de agua, disolventes aromáticos, etc.; aire, gases incondensables o incluso líquidos, polvos finos o lodos; esta gran variedad de cargas le da versatilidad a estos equipos. La fig. 1.2 muestra el esquema de un eyector indicando las partes que lo integran

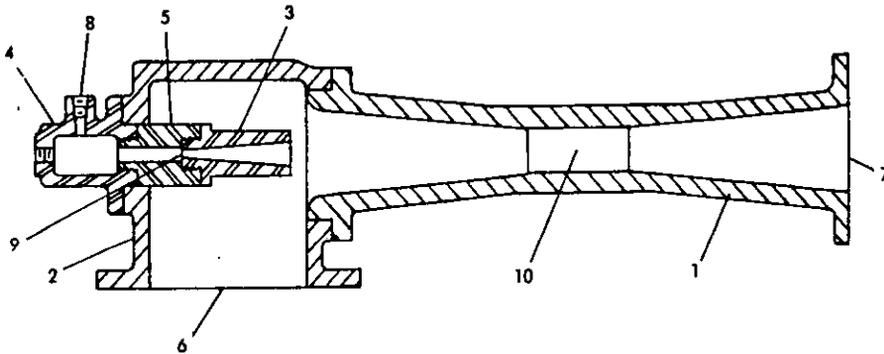


Fig.1.2. Esquema típico de un eyector mostrando las partes principales (ref. 13).

Las partes que lo integran son las siguientes:

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1. Difusor | 6. Succión |
| 2. Cámara de succión | 7. Descarga |
| 3. Boquilla de vapor | 8. Entrada de vapor |
| 4. Caja de vapor (opcional) | 9. Garganta de la boquilla |
| 5. Extensión (opcional) | 10. Garganta del difusor |

Los eyectores tienen las siguientes características, las cuales los hace una buena selección para la producción continua de vacío:

- 1) Manejan mezclas de vapor húmedas, secas o corrosivas
- 2) Desarrollan un vacío razonable necesario en las operaciones industriales
- 3) Todos los tamaños están disponibles para las pequeñas o grandes necesidades de capacidad
- 4) Sus eficiencias son de razonables a buenas

- 5) No tienen partes móviles, por lo tanto requieren poco mantenimiento, su operación es regularmente constante cuando la corrosión no es un factor de cuidado
- 6) Operación sencilla
- 7) Operación estable dentro del rango de diseño
- 8) Los costos de instalación son relativamente bajos cuando son comparados con bombas de vacío
- 9) Pequeños requerimientos de espacio

1.2.-Tipos de eyectores

Los dos tipos de eyectores más comunes son el operado por agua y el operado por vapor. Los eyectores que usan agua líquida como fluido motriz son diseñados para cargas razonablemente no condensables junto con grandes cantidades de fluido condensable. Agua a presiones tan bajas como 10 a 20 Lb/ft² (psig) son útiles, mientras que presiones de 40 psig o mayores mantendrán un vacío de 1 a 4 pulgadas de Hg absolutas en una unidad de etapa simple. La combinación de eyectores de agua y vapor son usados eficientemente para manejar una amplia variedad de niveles de vacío. El eyector operado por agua líquida sirve para condensar el vapor de los eyectores a vapor, para mezclar líquidos, lavar gases y generar un modesto nivel de vacío, ascenso de líquidos, bombeo y mezclado de sólidos suspendidos y lodos.

La clasificación anterior está basada en el fluido motriz que se emplea; pero, también pueden clasificarse de acuerdo a su diseño. Así, los eyectores pueden ser clasificados en críticos y no críticos. En los eyectores no críticos la velocidad del fluido motriz en la garganta del difusor es subsónica y son capaces de proporcionar una familia de curvas de operación dependiendo de la presión del vapor motriz empleado. Proporcionan relaciones de compresión menores que las obtenidas de un diseño crítico y pueden ser empleadas para obtener dos o más servicios a diferentes condiciones de una sola unidad.

Los eyectores de diseño crítico mantienen velocidades sónicas en la garganta del difusor y proporcionan una curva de operación fija. Es decir, operan a máxima eficiencia bajo un conjunto de condiciones fijas (presión motriz, carga, presión de succión y presión de descarga) y presentan variaciones sensibles en su operación cuando cualquiera de estas condiciones está fuera del punto de diseño. Un aumento en la presión del vapor motriz empleado, en un eyector de diseño crítico, no aumenta su capacidad, sino por el contrario, la disminuye el exceso de flujo provocado en el difusor. Los eyectores de diseño crítico son los más usados en los servicios de destilación a vacío.

1.3.-Arreglos de sistemas eyectores

Hay diferentes sistemas eyectores. Estos están basados en el número de etapas y del tipo y localización de condensadores en el sistema. Los sistemas pueden variar desde una sola etapa hasta una unidad con siete etapas. Aquí, entendemos por una etapa como un sólo eyector.

Cada etapa extra, en un sistema multietapa, permite operar a menor presión absoluta que una unidad de etapa simple. Los arreglos incluyen eyectores y condensadores combinados, dependiendo de la naturaleza de la carga y del fluido motriz.

Los precondensadores son recomendados para sistemas donde la carga contiene una alta cantidad de vapores condensables y las condiciones de presión y temperatura del refrigerante permitan la condensación de vapores, para así reducir las dimensiones requeridas y la carga sobre el eyector. Esta situación ocurre cuando se está operando una columna de destilación a vacío; los vapores sobrecalentados son condensados en una unidad diseñada para operar a la presión del domo de la columna, entonces sólo los vapores sobrantes y los no condensables pasan al sistema eyector.

Los intercondensadores son usados para condensar vapor de una etapa anterior, para reducir la carga de vapor sobre la siguiente etapa, de modo que la etapa siguiente será de menor tamaño, ya que sólo bombeará los no condensables y utilizará menos vapor, éste es un medio de incrementar el ahorro de vapor.

Los postcondensadores operan a presión atmosférica. Estos no afectan la cantidad de vapor que se consume o el funcionamiento del eyector y evitan la molestia de desfogar vapor a la atmósfera; de éste modo se logra recuperar el vapor. Además sirven como silenciadores sobre los eyectores. Los condensadores de tipo barométrico pueden absorber olores y vapores corrosivos.

Los condensadores pueden ser de contacto directo (o barométrico) o de superficie, típicamente un intercambiador de calor de tubos y coraza.

1.4.-Nomenclatura estándar para los sistemas eyectores

La figura 2.3 muestra los amplios sistemas desarrollados por la industria para establecer una terminología estándar para los sistemas eyectores. Cada etapa del eyector tiene una letra o letras distintas, las cuales son una función de su posición en el sistema. Cada etapa tiene una sola designación. La última etapa (del vacío a la atmósfera) tiene la letra Z asignada a ésta. Las etapas restantes tienen letras asignadas en orden inverso; por ejemplo, la letra directamente precedente a la etapa Z es la etapa Y. Este método puede continuar para todas las etapas restantes en el sistema. Los intercondensadores son designados por las dos letras de las etapas inmediatamente precedente y siguiente al condensador, por ejemplo para un condensador entre las etapas Y y Z la designación es YZ. A un postcondensador se le asigna la combinación de letras ZA. A un precondensador se le asigna primero una P seguida por la letra asignada a la siguiente etapa. Por el ejemplo si se usa un precondensador al frente de un sistema de dos etapas la designación sería PY. Toda combinación de letras será precedida por un número de serie específica del fabricante.

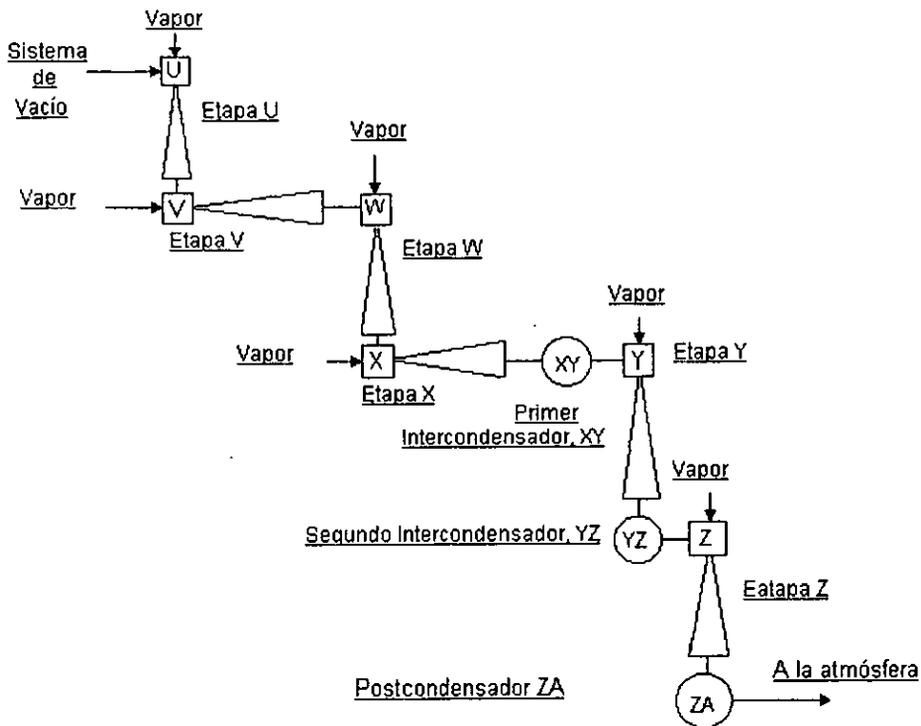


Fig. 1.3. Sistema de vacío con 6 etapas. Cada etapa tiene una letra distinta, la cual es función de su posición en el sistema.

1.5.-Terminología típica para sistemas eyectores

Antes de continuar es conveniente definir algunos términos que ya se han usado o que se van a encontrar más adelante y que se usarán continuamente.

Presión absoluta: Presión medida desde el cero absoluto, esto es, desde un vacío absoluto.

Presión de succión: Es la presión existente en la succión o entrada de la brida de la primera etapa del eyector.

Presión de descarga: Es la presión existente a la descarga de la brida de la última etapa del eyector. Cualquier caída de presión en la tubería, poscondensador de descarga, o silenciadores que exista entre la brida y la atmósfera, deberá ser adicionada a la presión atmosférica para diseñar la presión de descarga de la última etapa del eyector.

Presión motriz: Es la presión existente en la cámara de vapor y corresponde a la presión que se tiene antes de la boquilla de vapor. Cuando se defina la presión motriz se dará en Lbf/in^2 manométrica, y debe ir acompañada de la temperatura motriz. La temperatura afecta grandemente al diseño de la boquilla.

Las etapas del eyector son extremadamente sensibles a la presión del fluido motriz, consecuentemente, la reducción por debajo de la presión de diseño originará una presión de succión inestable. La presión motriz mínima de diseño deberá ser cuidadosamente seleccionada.

Presión de rompimiento: Presión del vapor motriz, o presión de descarga que ocasiona que la operación del eyector se vuelva inestable.

Presión de recuperación: Presión del vapor motriz, o presión de descarga a la cual el eyector recupera la condición de operación estable.

Temperatura de vapor motriz: Es la temperatura del vapor empleado como medio motriz, medida en la caja de vapor del eyector.

Temperatura de agua de enfriamiento: Es la máxima temperatura disponible a la entrada del condensador durante la vida útil de la unidad. Esta temperatura define parcialmente las presiones entre etapas en un sistema de múltiples etapas con condensación. Con frecuencia también se especifica la temperatura máxima de salida de agua.

Temperatura de succión: Temperatura de la mezcla que será succionada, medida en la succión del eyector.

Garantía de funcionamiento: Es el establecimiento de un conjunto de condiciones con las que el sistema de eyectores deberá cumplir. Normalmente es una condición en un punto, o sea una combinación de la carga que entra a la primera etapa, así como la presión en ese punto. También se estipula la presión de descarga de la última etapa. El flujo de vapor y de agua de enfriamiento se definen a partir de la presión y la temperatura de diseño.

Aire seco equivalente: Es el flujo de masa de aire seco a 70°F que es equivalente a la cantidad de flujo másico de una mezcla de gases y/o vapores dada que forman la carga. Es el estándar industrial empleado para medir la capacidad de un eyector. El Instituto de Intercambio de Calor, (HEI), de E.U; ha publicado una serie de curvas mediante las cuales

se obtienen una serie de factores de corrección que dependen del peso molecular y la temperatura. Estos factores permiten convertir cualquier corriente de gas a su equivalente en aire seco.

Estabilidad: Es la característica operacional de un eyector que produce una presión de succión constante. La inestabilidad es usualmente visible en un manómetro y puede ser escuchada por un operador con experiencia.

Presión a carga cero: Es la mínima presión que puede alcanzarse en la succión de un eyector durante su operación. Es obtenida cuando se opera a carga cero y corresponde a un estado de máxima compresión.

Inestabilidad: Estado en el que la presión de succión varía rápidamente y estas fluctuaciones son visibles en un instrumento medidor de vacío y audibles a un operador con experiencia.

Estabilidad a carga cero: Es la característica de un eyector que le permite mantener una mínima presión de succión sin fluctuaciones, aún cuando la carga que esté recibiendo sea nula. Esta característica es una función de la capacidad de la última etapa para descargar a una presión igual o mayor que la contrapresión del sistema al que se descarga, por lo que únicamente puede ser obtenida mediante un diseño adecuado de esta última etapa.

Capacidad: Cantidad del flujo de la mezcla de gases y vapores, que es succionada y comprimida por el eyector, medida en Lb/h.

Medidores de presión: Para sistemas de eyectores se calibran generalmente en mm o pulgadas de Hg absolutos para la succión y descarga del eyector. Es preferible que estas lecturas se den en unidades absolutas, más que en unidades de vacío, ya que una lectura de vacío requiere que se conozca la presión barométrica; cabe recordar que las unidades de vacío se leen de la presión barométrica hacia abajo y la presión absoluta desde el cero absoluto hacia arriba.

Evacuación: Término aplicado al proceso de reducir la presión de un sistema dado, mediante la extracción de una porción del volumen de gas originalmente presente.

Consumo total de vapor: Es la suma de los flujos de vapor que pasa a través de cada una de las boquillas de vapor de las diferentes etapas a las condiciones especificadas de presión y temperatura del vapor motriz, medido en Lb/h.

Consumo total de agua: Consumo de agua que fluye a través de todos los condensadores a las condiciones de temperatura de entrada, medida en galones por minuto, (Gpm).

Eyector de etapa simple de elemento simple:

Consiste de una unidad básica como la de la figura 1.4 (a) , y es diseñado para operar a una presión de succión menor que la atmosférica y para descargar a una presión atmosférica o mayor.



Fig.1.4a

Eyector de etapa simple de elementos múltiples: Esta formado por dos o más unidades básicas, cada una diseñada para operar a presión de succión abajo de la atmosférica y descargar a presión atmosférica o mayor. En este arreglo cada unidad básica es llamada un elemento. La unidad completa es llamada eyector de etapa simple de doble elemento, figura 1.4 (b), eyector de etapa simple de triple elemento, etc; dependiendo del número de elementos de que esté constituida.

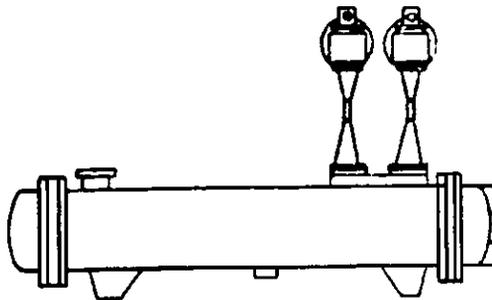


Fig.1.4b

Eyector de etapas múltiples de elemento simple: Esta constituida por dos o más unidades básicas, arregladas en serie, como en las figuras 1.4 (c), (d), (e), (f), (g), (h). A cada una de las unidades de éste arreglo se les conoce como etapa. La primera de ellas y las intermedias están diseñadas para operar con presiones de succión y de descarga subatmosféricas. La etapa final de la serie esta diseñada para una presión de succión subatmosférica y para descargar a presión atmosférica o mayor.

La presión de descarga de la primera etapa y las presiones de succión y de descarga de las etapas intermedias no siguen una regla fija, pero son seleccionadas para obtener la mejor subdivisión de la compresión total, de acuerdo a las condiciones de operación particulares.

La primera etapa es aquella que comprime primero los gases o vapores succionados, la segunda etapa la que los comprime en segundo lugar, etc. La última etapa será la que descarga a presión atmosférica o mayor.

La serie completa es llamada eyector de dos etapas de elemento simple, eyector de tres etapas de elementos simple, etc; dependiendo del número de unidades básicas arregladas en serie.

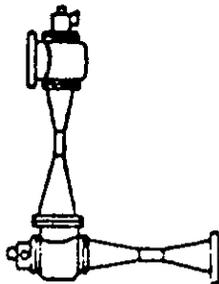


Fig.1.4c

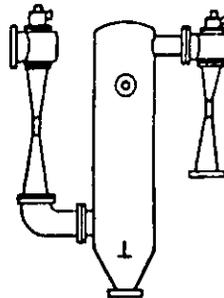


Fig.1.4d

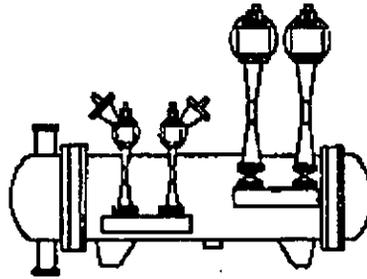


Fig.1.4e

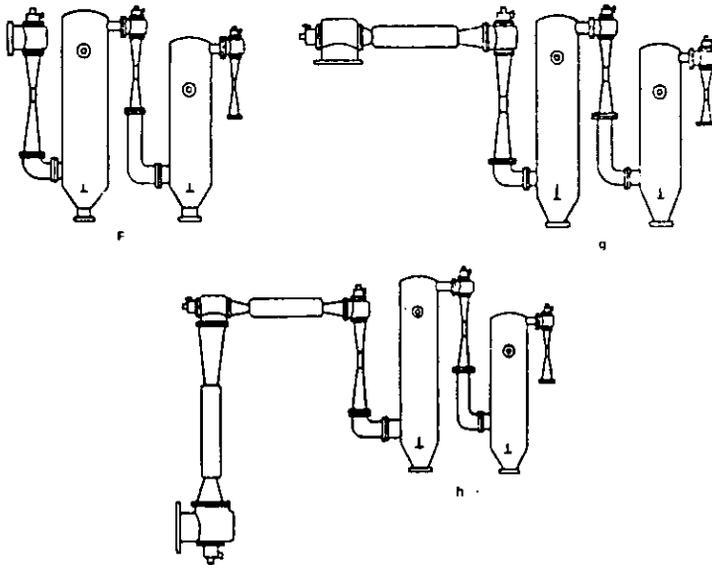


Fig. 1.4 f, g y h respectivamente.

Eyector de etapas múltiples de elementos múltiples: Consiste de dos o más eyectores de etapas múltiples, de elemento simple, arreglados en paralelo, como los de la figura (1.4e). Este arreglo permite la operación de los elementos independientemente o en combinación con los otros. Estos eyectores están unificados por el uso de condensadores comunes, aislando los elementos con válvulas, o por el uso de condensadores de superficie subdivididos.

Eyector tipo condensante o no condensante: Los eyectores de etapas múltiples que tienen intercondensadores entre algunas o todas sus etapas, figuras 1.4 (d), (e), (f), (g), y (h), con el propósito de condensar la mayor cantidad posible del vapor descargado por la etapa o las etapas precedentes, son llamados eyectores del tipo condensante. De ésta manera, la cantidad de carga que debe ser comprimida por la siguiente etapa es considerablemente disminuida. Los eyectores del tipo no condensante, son aquellos que no tienen intercondensadores entre sus etapas.

1.6.-Efecto de algunas variables sobre la presión de succión y descarga

Para continuar con el desarrollo, nos referiremos a la figura 1.5, podemos ver una típica curva de operación de un eyector de etapa simple. Un diseño estándar de la etapa de un eyector, esta diseñada para operar establemente desde un 15% hasta un 100% de la capacidad de diseño. Esto es, muchas unidades no son necesariamente diseñadas para operar establemente al corte o sea sin carga, sino únicamente con el vapor motriz. Sin embargo, la curva de presión de descarga puede ser modificada para lograr estabilidad bajo estas condiciones, incrementando ligeramente la cantidad de vapor motriz que se esta usando. Este cambio mueve toda la curva de operación de la presión de descarga por encima de la curva de contrapresión del sistema permitiendo al eyector operar sobre el rango completo de la curva de presión de succión.

El alcance de la curva de presión de succión por encima del 100% de la capacidad, tiende a grandes aumentos de presión con un incremento relativamente pequeño de la capacidad. Esto limita la efectividad de un eyector una vez que la capacidad de diseño es sobrepasada.

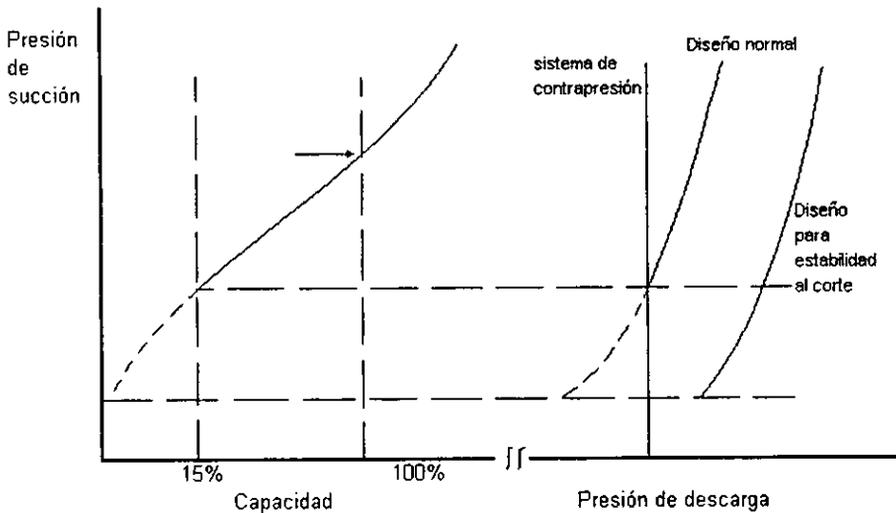


Fig. 1.5. Curva típica de un eyector de una sola etapa (tomado de Manual de entrenamiento de KINEMA).

La posición de la boquilla con respecto a la entrada del difusor tiene un efecto sobre la curva de operación de la etapa del eyector. Para una unidad dada la curva de presión de succión y la curva de presión de descarga puede cambiarse en una u otra dirección moviendo la boquilla hacia adelante o hacia atrás con respecto del difusor. La ubicación actual se hace variando la longitud efectiva de la extensión de la boquilla en la unidad dada. Para alguna unidad, la distancia actual de la boquilla que puede ser movida esta limitada por la construcción específica de dicha unidad.

También, el cambio actual en la operación obtenible por el cambio de la posición de la boquilla varía de una unidad a otra. La figura 1.6 muestra el efecto general del movimiento de la boquilla. El punto número uno a recordar es que cualquier cambio en la posición de la boquilla afecta tanto a la curva de presión de succión como a la curva de presión de descarga. Las líneas continuas sobre ésta figura, representan la operación normal de la unidad. La línea discontinua representa la operación la boquilla movida hacia atrás.

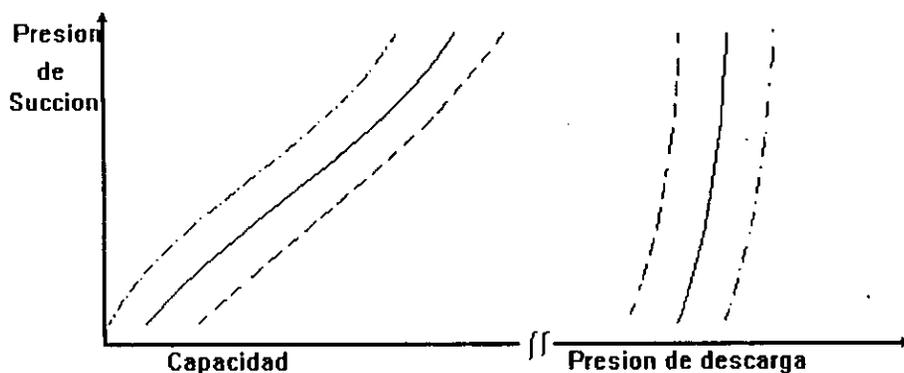


Fig. 1.6. Efecto de la posición de la boquilla sobre la curva de operación (tomado del Manual de entrenamiento de KINEMA)

El efecto de mover la boquilla hacia atrás es para aumentar la capacidad de la unidad a una presión de succión dada, mientras que se da una disminución en la capacidad de presión de descarga.

El efecto de mover la boquilla hacia adelante es ilustrado, en la misma figura, por la curva la cual es una combinación de puntos y líneas. A una presión de succión dada la capacidad es disminuida pero la presión de descarga es aumentada. Dependiendo de la operación exacta de la unidad existente y el cambio deseado en la operación, debe decidirse en que dirección deberá moverse la boquilla.

El efecto de la variación de la presión del vapor motriz puede verse examinando la figura 1.7. La curva de presión de descarga es cambiada de una manera directa hacia adelante. Cuando la presión es reducida, la presión de descarga obtenible se reduce en una proporción directa a la reducción en la presión. Cuando la presión es aumentada sobre la de diseño, la presión de descarga es incrementada a lo largo de toda la curva.

El efecto sobre la curva de presión de succión no es tan proporcional. Cuando la presión motriz es cambiada, la curva llega a distorsionarse teniendo resultados opuestos por encima y por abajo del punto de diseño. Con una presión menor que la presión de vapor de diseño, la capacidad decrece por arriba del punto de diseño, y se incrementa ligeramente por abajo de éste punto. Este cambio en la curva de capacidad debe verse en conjunto con el cambio en la curva de presión de descarga para ser de valor real. Con

una presión más alta que la presión de diseño del vapor, la capacidad se incrementa por arriba del punto de diseño y decrece por abajo de este punto.

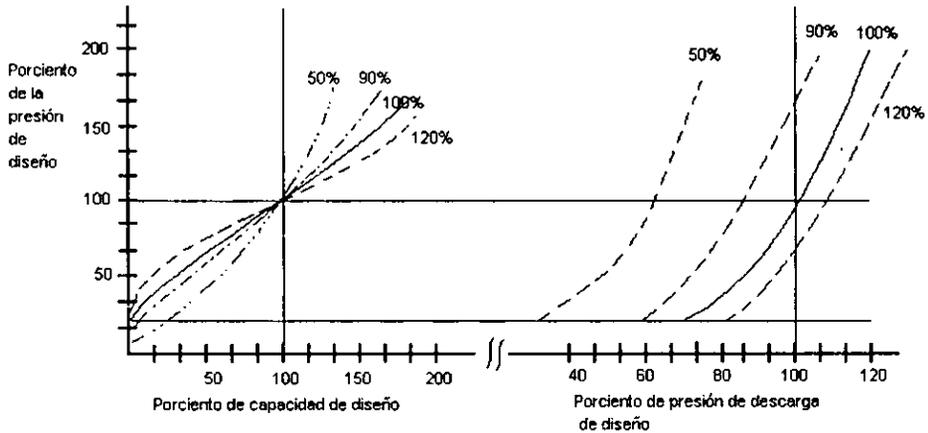


Fig.1.7. Efecto de la variación de la presión motriz del vapor (tomado del Manual de entrenamiento de KINEMA).

1.7.-Códigos aplicables.

Como la mayoría de los equipos, también los eyectores, se diseñan bajo la normatividad de un código. Uno de éstos códigos es el Código de Intercambio de Calor (Heat Exchange Institute, Inc); o HEI por sus siglas en inglés. El cual da estándares generales sobre la construcción de partes e incluso los condensadores del eyector; así como de materiales y arreglos más adecuados. Además, da una guía para realizar pruebas en campo, tanto de la capacidad como de la infiltración de aire hacia el sistema de vacío. Incluso hay una parte dedicada al aspecto de la medición del nivel de sonido producido por la descarga del eyector. Enseguida se enumeran partes de éste código:

- a) Código para la medición del sonido de un eyector de chorro de vapor (Code for the measurement of sound from steam jet ejectors). Heat Exchange Institute Inc. USA.
- b) Construcción y estándares para condensadores tipo superficie para servicio a eyectores (Construcción and Standards for Surface type condensers for ejectors service). Heat Exchange Institute Inc. USA.
- c) Estándares generales para la construcción de eyectores, componentes y condensadores (General construction standards for ejectors, components and other than ejectors condensers). Heat Institute Exchange Inc. USA
- d) Método y procedimiento para la determinación de oxígeno disuelto (Method and procedure for the determination of dissolved oxygen). Heat exchange Institute Inc. USA.
- e) Estándares y especificaciones típicas para deareadores. Tipos para agua caliente y fría (Standards and typical specifications for deareators. Hot and cold water types). Heat Exchange Institute Inc. USA.

Aparte de este código, existe el código de pruebas para eyectores de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME performance test codes, code on ejectors). Este contiene seis partes, las cuales son las siguientes:

Sección 0: Introducción

La cual da una descripción de lo que es un eyector y lo que lo diferencia de otros equipos, ya que aunque este es un compresor, no tiene partes móviles, y utiliza conversión de energía por presión a energía cinética.

Sección 1: Objeto y alcance

Proveer de estándares, direcciones y reglas para realizar y reportar una prueba de un eyector de etapa simple o múltiple. Tales pruebas incluyen la capacidad en relación con la presión de succión, presión de succión en relación con la de descarga, flujo del fluido motriz en relación con la presión y temperatura estipuladas y la estabilidad del eyector.

Sección 2: Descripción y definición de términos

En esta sección se definen los términos empleados a respecto de este tema.

Sección 3: Lineamientos principales

Da el procedimiento obligado para el uso de este código. Procedimientos como la responsabilidad de obtener e instalar los instrumentos y controles requeridos conforme a este código; la responsabilidad de aislar el equipo que se va a probar, y métodos para probar sistemas multicomponente.

Sección 4: Instrumentos y métodos de medición

Da los arreglos, esquemas, procedimientos e instrumentos requeridos para realizar la prueba en cuestión, ya sea de un sistema multicomponente o de una sola etapa.

Sección 5: Cálculos

Esta sección proporciona los medios para el cálculo de cantidades necesarias para la operación del sistema eyector. Cantidades tales como la capacidad, presión de succión, temperatura de succión, presión de descarga, presión del fluido motriz, temperatura del fluido motriz, etc.

Sección 6: Reporte de la prueba

Da un formato para la presentación de los resultados de la prueba.

Sección 7: Bibliografía

Bibliografía usada por el código.

CAPITULO 2

RECOMENDACIONES EMPIRICAS PARA LA ESPECIFICACIÓN DE UN SISTEMA EYECTOR

2.1.- Recomendaciones para la especificación de un sistema eyector

Lo siguiente es un análisis empírico y teórico del funcionamiento de un eyector a partir de lo cual se inicia su diseño. Se hace una revisión de las reglas empíricas y de las recomendaciones de los fabricantes y usuarios.

Aunque se han publicado análisis detallados y comprensibles del funcionamiento de un eyector y de su diseño mecánico, estos son básicamente dirigidos hacia la implementación del estado del arte, y no son convenientes para el típico usuario que hace estimaciones rápidas y aproximadas.

Una descripción simplificada, pero todavía engorrosa, de los procesos que ocurren en un eyector de aire a chorro de vapor son los siguientes; y llevan a resultados que están de acuerdo en orden de magnitud con el funcionamiento actual:

- a) El vapor se expande isoentrópicamente a través de la boquilla de vapor hacia la cámara de succión
- b) Este se mezcla con el gas carga a presión constante y sin pérdida total del momentum
- c) Durante el mezclado, mucha de la energía cinética del vapor motriz se convierte en energía calorífica
- d) La mezcla pasa a través de un difusor, el cual convierte la energía cinética restante del fluido mezclado en energía por presión con una eficiencia de compresión isoentrópica de alrededor del 80%

2.2.- Tipos de carga: Cuatro o más componentes pueden estar presentes en la carga de un eyector de aire a chorro de vapor; los cuales pueden ser aire, gases no condensables, vapores condensables, y vapor de agua.

En todo sistema de presión subatmosférica de diseño convencional hay infiltraciones de aire. La cantidad de aire infiltrado es una función del diseño del sistema y del método de operación, y se incrementa con el desarrollo de imperfecciones. Las imperfecciones incluyen el embalaje de válvulas, bombas y flechas de agitador, bridas de tubería y conexiones atornilladas y defectos en las paredes del sistema de proceso. Debido a las infiltraciones de aire es usual que la capacidad sea menor que la de diseño, y debido a que la presión del proceso frecuentemente es controlada automáticamente sobrecargando el eyector con aire o nitrógeno, es difícil medir la infiltración de aire en campo por la observación del funcionamiento del eyector.

Los gases no condensables pueden entrar al sistema disueltos en el material alimentado, o como fluido para instrumentos, o puede ser producido por reacción química dentro del sistema.

Los vapores condensables son materiales que tienen un punto de ebullición atmosférico más alto que la temperatura del agua de enfriamiento. Debido a que el agua tiene propiedades físicas únicas y bien conocidas, ésta se maneja por separado como un componente de la carga.

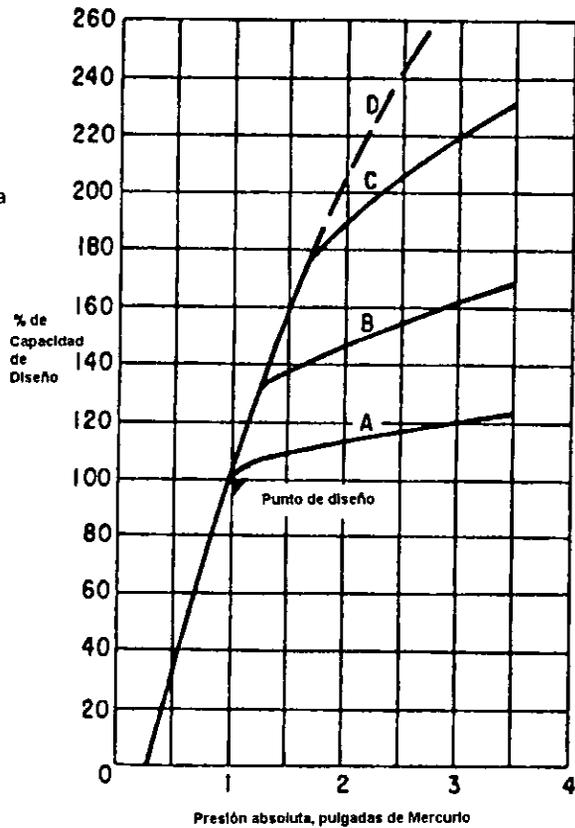
En el sistema típico de vacío, un eyector es usado para remover aire y otros gases no condensables desde el venteo de un condensador. Debido a que el aire y los gases no condensables están saturados con el vapor de proceso a la temperatura de venteo del gas, el condensador debe ser diseñado para vapor subenfriado para evitar el excesivo arrastre de vapor hacia el eyector.

Sin embargo, cabe esperar que no siempre se pueda operar con una carga constante, esto es, habrá cierta variación en la carga. La figura 2.1 ilustra tres diferentes diseños de eyectores multietapa A, B y C, la cual indica que el diseño A es muy sensible a los cambios en la carga alrededor del punto de diseño. Los diseños B o C son menos sensibles. La curva extendida hacia adelante en el punto D indica la capacidad de la primer etapa cuando todo el vapor es condensado en el intercondensador; o una carga manejando aire o una mezcla aire-vapor, cuando la segunda etapa tiene la capacidad suficiente para tomar todos los no condensables.

La curva A indica la operación a sobrecarga cuando la capacidad de manejo de aire de la segunda etapa es limitada. Esta condición surge como resultado de un diseño para economizar vapor. Si la capacidad de la segunda etapa es más grande, cabe esperar un comportamiento como el mostrado por las curvas B o C. Cuando la capacidad de la segunda etapa es limitada como lo indican las curvas A, B, o C, un incremento en la capacidad lleva a un incremento en la presión de succión, cuando la carga se incrementa es principalmente por aire o no condensables. El incremento en la presión es menor cuando el incremento en la carga se debe a condensables. Esto enfatiza la importancia del dimensionamiento de la segunda etapa para una amplia capacidad de no condensables, y la importancia de la especificación del rango y variedad de condiciones esperadas las cuales pueden confrontar el sistema.

Una vez que el sistema ha sido evacuado para condiciones normales de operación, es posible que la capacidad caiga a casi cero cuando lo único que se está extrayendo es aire infiltrado o pequeñas cantidades de gases disueltos. Bajo estas condiciones, es importante especificar un sistema eyector capaz de operar establemente a carga cero o capacidad al corte.

Fig.2.1. Efectos de sobrecarga en la operación de un eyector (ref.10)



2.3.-Infiltración de aire: Usualmente el aire infiltrado es un componente básico de la carga del eyector, y la cantidad de vapor de agua y/o vapor condensable usualmente es directamente proporcional a la carga de aire, desafortunadamente no existen métodos disponibles para la determinación precisa de la capacidad básica óptima de aire de los eyectores. Cualitativamente, es deseable seleccionar una capacidad la cual minimice el costo total de remoción de gases no condensables, los cuales se acumulan en el sistema

de procesos a vacío. Un eyector sobredimensionado costará más inicialmente y usará innecesariamente grandes cantidades de vapor y agua de enfriamiento. Si un eyector es subdimensionado requerirá un constante monitoreo por las infiltraciones de aire para evitar el incremento de costos. El aire infiltrado es el aire que entra al sistema debido a que éste se encuentra a una presión subatmosférica y a que no está sellado herméticamente.

La experiencia con un sistema similar es la guía más confiable cuando se dimensiona un eyector. La infiltración de aire en un sistema eyector condensante multietapa puede medirse haciendo una pequeña purga de vapor en la succión de la primer etapa a través de una válvula manual o controlada para manejar la presión del sistema; y entonces observar la presión en la última etapa y luego remitirse a la curva de operación para estimar la carga de aire o midiendo el volumen de gas venteado sirviéndose de un condensador de superficie. Los condensadores de contacto directo y los postcondensadores pueden lavar grandes cantidades de gases no condensables y llevarlos hacia las piernas barométricas de drenado, hasta los pozos calientes (Hot wells), o sea los pozos donde se desechan los condensados y el agua de enfriamiento.

También es adecuado tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Es más costoso remover aire de un sistema de baja presión que de un sistema de presión moderada.
- b) Los sistemas de más baja presión usualmente son diseñados y mantenidos de tal manera que la infiltración total de aire sea menos que en un sistema de presión moderada,
- c) Los sistemas que tienen un gran volumen interno usualmente contendrán más y mayores fuentes de infiltración de aire. Para una combinación dada de presión de sistema y de volumen del mismo, puede establecerse gráficamente, un flujo de infiltración de aire utilizando la figura 2.2. La razón de flujo infiltrado establecido de esta manera resulta menor que la que se ofrece un equipo comercialmente disponible.

Para llevar a cabo este estándar, es necesario diseñar para una mínima infiltración de aire en sistemas de baja presión. Esto es, debe haber menos conexiones atornilladas, menos empaques para válvulas de vapor, flechas de bombas y evitar o hacer escaso uso de gas para instrumentación del sistema.

Un método muy sistemático que logra una estimación total de aire infiltrado mediante la adición del flujo de infiltración nominal asignada a cada uno de los tamaños y tipos de accesorios en el sistema. El aire total infiltrado al que se llega por este método, usualmente es mayor que las recomendaciones de otras fuentes, pero es una guía útil cuando se diseñan sistemas de baja presión para un mínima infiltración de aire.

Una generalización cuantitativa aproximada obtenida de la experiencia de los fabricantes y usuarios se presenta en seguida. Para un sistema pequeño de procesamiento químico (unos 500 ft cúbicos), una capacidad de aire para el eyector de 10 Lb/h es adecuado. Para sistemas grandes, una capacidad de 20 Lb/h es adecuada. Para sistemas pequeños, más herméticos, una capacidad de aire de 2 a 5 Lb/h es razonable. El diseñador deberá considerar el precio del eyector y su costo de operación cuando se especifica la capacidad. Por ejemplo, capacidades más grandes pueden ser económicas en eyectores de etapa simple.

Una filosofía inversa en el dimensionamiento de eyectores, ocasionalmente aplicable, a un sistema en el cual siempre una pequeña cantidad de aire infiltrado perturbará la operación o contaminará el producto. En tales sistemas puede ser deseable instalar un eyector teniendo una capacidad deliberadamente limitada para manejar aire, para que el sistema no pueda operar hasta que no se haya corregido el flujo de aire infiltrado que esta causando la alteración. Pocos sistemas son completamente herméticos, aunque algunos pueden tener extremadamente bajas proporciones de aire infiltrado. Para un sistema ideal la única carga son los no condensables del proceso (gases absorbidos, aire, etc.) más vapor saturado a la presión del proceso. La práctica ha establecido que tolerancias deben tomarse para el aire infiltrado. Considerando el aire y los no condensables:

(Libras/Hora de aire + no condensables) = Aire infiltrado + aire liberado en el proceso +
no condensables liberados por el proceso.

La infiltración de aire ocurre en las conexiones de tuberías (bridas, accesorios atornillados, válvulas), cajas, sellos mecánicos, etc. Siempre que sea posible un sistema debe ser probado para determinar la infiltración de aire, pero para nuevos diseños y situaciones donde no pueden hacerse pruebas, se recomiendan los valores de la tabla 2.1, para eyectores sirviéndose de condensadores de superficie, los cuales son valores mínimos de seguridad. Un sistema muy hermético presentará mejor operación.

Tabla. 2.1. Infiltración de aire estimada dentro del equipo de un sistema de vacío.

Tipo de accesorio	Promedio estimado de aire infiltrado, Lb/h
Conexiones atornilladas en tamaños de hasta 2" de diámetro	0.1
Conexiones atornilladas en tamaños de alrededor de 2"	0.2
Conexiones bridadas en tamaños de hasta 6" de diámetro	0.5
Conexiones bridadas en tamaños de 6 a 24", incluyendo orificios hombre	0.8
Conexiones bridadas en tamaños de 24" a 6 pies de diámetro	1.1
Conexiones bridadas de alrededor de 6 pies de diámetro	2.0
Válvulas de vapor empacadas de hasta 1/2" de diámetro	0.5
Válvulas de vapor empacadas de alrededor de 1/2" de diámetro	1.0
Válvulas de tapón lubricado	0.1
Válvulas de purga	0.2
Niveles ópticos	1.0
Carátulas indicadoras incluyendo válvulas de nivel	2.0
Prensaestopas selladas con líquido para flechas de agitadores, bombas, etc; por pulgada de diámetro de flecha	0.3
Caja de prensaestopas ordinaria, por pulgada de diámetro	1.5
Válvulas de seguridad y frenos de vacío, por pulgada de tamaño nominal.	1.0

La figura 2.2. da los máximos valores de infiltración de aire para sistemas comercialmente herméticos los cuales no incluyen algún equipo agitador. Para propósitos de diseño, usualmente, el eyector es adquirido para operar sobre una carga de alrededor de dos veces estos valores. Para sistemas con agitadores y sellos para flechas ordinarios, la infiltración del sistema deberá incrementarse por 5 libras de aire por hora por agitador. Si se están usando sellos especiales, estos valores pueden ser reducidos a 1 o 2. Las flechas con más revoluciones por minuto deben ser selladas a la atmósfera exterior, ya que tienen más probabilidad de incrementar la infiltración.

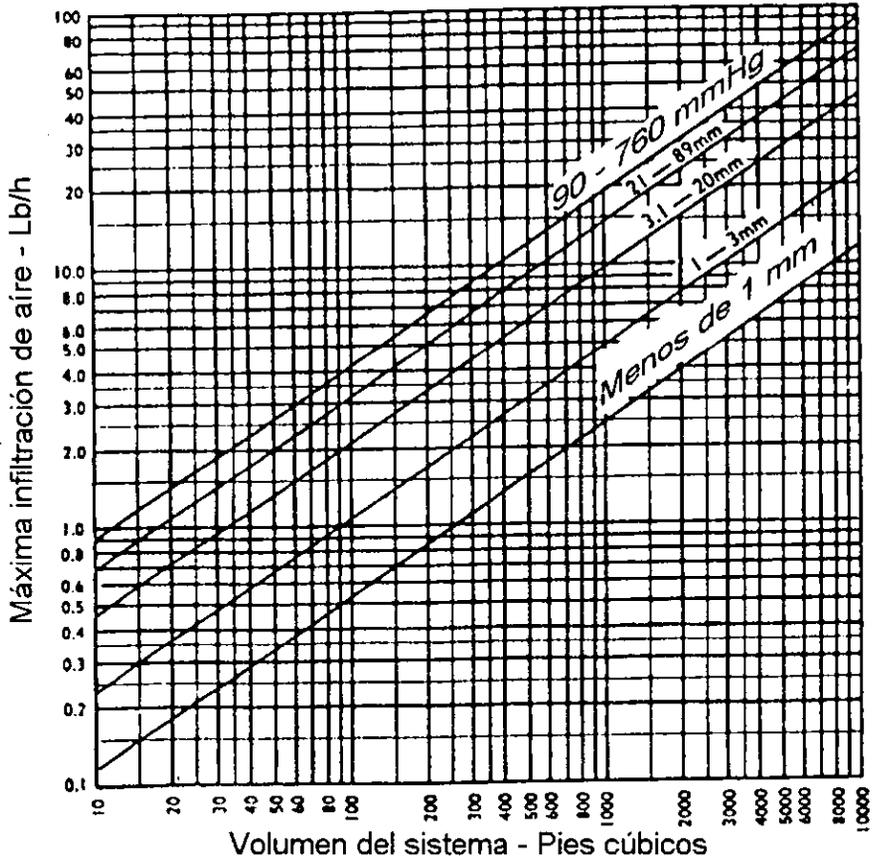


Fig. 2.2. Máximos valores de infiltración de aire para sistemas comercialmente herméticos (ref. 10).

Un diseño alternativo, para la infiltración de aire usado por algunos fabricantes e ingenieros de proceso, es la figura 2.2 más la suma obtenida usando los factores de la tabla 2.1 para cada sistema en cuestión. Este método es considerado como conservador cuando es comparado con datos experimentales, sin embargo, en general, la diferencia de costo

puede ser muy pequeño entre una unidad lo suficientemente grande y una la cual tiene amplia capacidad para tomar las variaciones en la infiltración de aire.

Ya que la determinación de la infiltración de aire involucra un considerable conocimiento y juicio de los sistemas de vacío, no pueden mostrarse métodos empíricos para rendimientos exactos y valores correctos. Muchos de los fabricantes usan uno de los métodos aquí presentados, aunque con un factor que toma en cuenta el tipo básico de planta, prácticas de mantenimiento, técnicas operacionales de la producción personal, y otros aspectos relacionados. Así, para una planta hermética y eficiente, los valores de la infiltración de aire de la figura 2.2, pueden ser algunas veces reducidos en 0.5-0.75 de los valores leídos, mientras que para una planta floja, mojada y sucia los valores deben ser multiplicados por 2 o 3, o usar un método alterno como el utilizar los datos de la tabla 2.1, o siempre multiplicar por 2 o 3.

2.4.-No Codensables: La cantidad de aire y otros gases no condensables disueltos en la corriente de alimentación pueden ser estimados conociendo la solubilidad de éstos gases en la alimentación del proceso. Las operaciones a escala piloto pueden indicar la cantidad de gases no condensables producidos por reacción química.

2.5.-Condensables: La cantidad de vapor condensable usualmente es directamente proporcional a la cantidad de aire combinado más los gases no condensables. El aire y los gases no condensables, normalmente son tomados de un venteo del condensador del proceso y son saturados con el vapor de proceso. La temperatura de venteo debe ser menor que la temperatura de condensación del proceso, para que cause subenfriamiento de vapor en el condensador de proceso. Es deseable agregar un pequeño venteo al condensador en la línea de venteo al eyector para reducir el arrastre de vapor de producto hacia el eyector. El medio de enfriamiento para el venteo del condensador debe ser un refrigerante. Un condensador de venteo reduce el tamaño requerido y el costo de operación.

2.6.-Propiedades físicas: El flujo de cada componente significativo de la carga de diseño deberá darse por separado en Libras por hora. La especificación deberá incluir toda propiedad física relevante de cada componente distinto del aire y el vapor de agua. Deberá especificarse el peso molecular de cualquier otro gas. Para eyectores que no contienen condensadores, no se requieren más datos.

Para eyectores que contienen condensadores, deberá describirse el vapor condensado, dando su peso molecular, su calor latente, su presión de vapor y su solubilidad a dos distintas temperaturas cercanas a la temperatura del agua de enfriamiento. Si el vapor condensable no es soluble en el agua y se esta usando un condensador de superficie, las propiedades físicas del líquido requerido son el calor específico, la conductividad

térmica, la viscosidad y la gravedad específica. Si el vapor condensable se congela alrededor de la temperatura más baja esperada del agua de enfriamiento, debe especificarse el punto de congelación y el diseño del eyector debe desarrollarse cuidadosamente junto con el fabricante.

2.7.-Presión de succión: La presión de succión de diseño se determina estableciendo la presión de operación más baja deseada en el sistema y sustrayendo la caída de presión en la línea hacia el condensador, a través del condensador, en el venteo de la línea hacia el eyector. Además, un pequeño factor de seguridad debe ser sustraído. Como guía en la selección del tamaño económico de la línea de vapor y la de presión de succión de diseño, debe recordarse que un 10% de reducción en la presión de diseño de un eyector incrementará el uso total de vapor por alrededor de un 5 a un 10%.

2.8.-Temperatura de succión: La temperatura de la carga de vapor necesita determinarse solo aproximadamente debido a que cada 50°F de incremento en la temperatura reduce la capacidad del eyector por solo 2 por ciento. Sin embargo, a temperaturas más bajas que 32°F son importantes debido a que puede ocurrir congelamiento en el eyector.

2.9.-Presión de descarga: La presión de descarga de diseño deberá ser igual a la presión atmosférica más una asignación por uso y ensuciamiento en la última etapa. Se recomienda que la presión en la mayoría de los eyectores de aire sea de un psig por encima de la presión atmosférica, si es que la presión de descarga es la presión atmosférica (es decir descargar a 812 mm de Hg abs.) sin carga, y que todas las etapas sean estables a esa condición.

Aunque éstos requerimientos son más altos que los estándares practicados por algunos fabricantes, ellos proveen un factor estándar de seguridad el cual mejora la seguridad y simplifica las molestias por un modesto incremento en los requerimientos de vapor de la última etapa. La medición de la presión es fácil de realizar si las etapas son estables. Para eyectores teniendo una etapa final grande, siempre manejando cargas de vapor con alrededor de 20 a 50% de la carga de diseño, puede ser conveniente reducir la presión de descarga de diseño, por decir 0.5 psig a carga completa de diseño para economizar sobre el vapor cuando la seguridad no es adversamente afectada. La operación de un eyector es función de la contrapresión. Muchos fabricantes diseñan eyectores con descargas atmosféricas para una presión de succión de 0.5 a 1.0 psig para asegurar una operación apropiada. La caída de presión a través de alguna tubería de descarga y postcondensador debe tomarse en consideración. La tubería de descarga no debe tener bolsas por condensación. La figura 2.3, indica el efecto del incremento de la contrapresión en un eyector de etapa simple para varias presiones de succión. La figura 2.4, ilustra el efecto del incremento de la presión del vapor motriz para contrarrestar los efectos de la contrapresión.

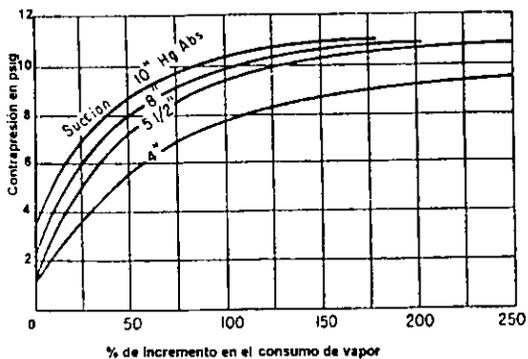


Fig.2.3.-Efecto de la contrapresión sobre la descarga de un eyector individual ref. 10).

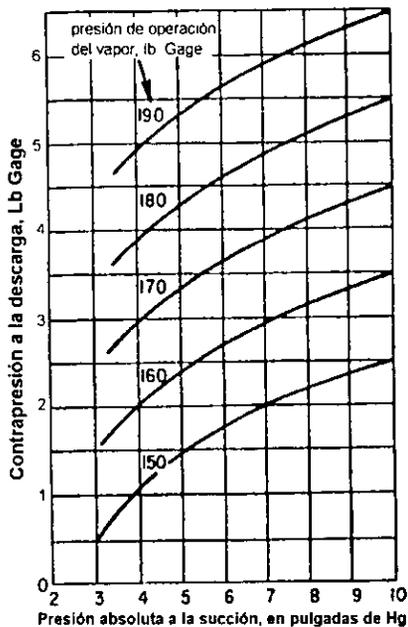


Fig. 2.4.-Efecto de la alta contrapresión en la operación de un eyector (ref. 10).

2.10.-Presión de Vapor Motriz: La presión de diseño del vapor motriz debe ser seleccionada como la presión más baja esperada en la boquilla de vapor del eyector. La unidad no operará establemente por abajo de ésta presión.

Presión de diseño recomendada = Mínima presión esperada en la línea en la boquilla del eyector menos 10 psi.

Esta base de diseño permite una operación estable bajo menores fluctuaciones de la presión. Un incremento en la presión del vapor sobre la de diseño no aumentará la capacidad de manejo de vapor ya que la capacidad es fija para el eyector. El incremento de la presión usualmente disminuye la capacidad debido al vapor extra en el difusor. La mejor economía de vapor se obtiene cuando la boquilla y el difusor son diseñados para una operación específica. Esta es la razón de que sea difícil de tener los así llamados eyectores estandar en almacen y esperar tener el equivalente de una unidad diseñada para el cliente, como es el caso de las bombas. El eyector tipo estrangulante tiene una familia de curvas de operación dependiendo de la presión del vapor motriz. Este tipo tiene una razón de compresión menor a través del eyector que el de tipo fijo.

Para un eyector dado, un incremento en la presión del vapor sobre el valor de diseño, incrementa el flujo de vapor a través de la boquilla en proporción directa al incremento de la presión absoluta del vapor. Por lo tanto, a mayor presión de diseño de un eyector, menor el consumo de vapor. Esto es más pronunciado sobre eyectores de una y dos etapas. Cuando esta presión es de alrededor de los 350 psig, la disminución en el requerimiento de vapor es despreciable. Cuando la presión de succión absoluta decrece, la ventaja de un vapor alta presión llega a ser menor. En unidades pequeñas el tamaño físico de la boquilla de vapor puede ser el límite inferior de la presión de vapor.

Para eyectores descargando a la atmósfera, una presión de vapor abajo de 60 psig generalmente no es económica. Si la presión de descarga es menor, como en sistemas de unidades múltiples, la presión de vapor a la entrada puede ser menor. Eyectores de etapa simple diseñados para presiones de succión abajo de de 200 mmHg. abs; no operan eficientemente a presiones de vapor menores de 25 psig. La primera etapa o las dos primeras etapas de un sistema multietapa pueden ser diseñadas (aunque quizá no económicamente), usando una presión de vapor abajo de una psig.

Para asegurar una operación estable la presión de vapor debe estar arriba de un valor mínimo. Este valor mínimo es llamado la recuperación de la presión motriz del vapor cuando la presión esta siendo incrementada desde una región inestable. La figura 2.5, indica estos dos puntos y la segunda presión de ruptura más baja la cual es alcanzada cuando la presión es disminuida desde una región estable. Como la presión es disminuida a lo largo de la línea 5-3-1, la operación es estable hasta que el punto 1 es alcanzado. En este punto la capacidad del eyector cae rápidamente a lo largo de la línea 1-2. Como la presión del vapor es incrementada, la operación estable no se completa, sino, hasta que se alcanza el punto 4 y la capacidad se eleva a lo largo de la línea 4-3. Con incrementos

posteriores, ésta se incrementa a lo largo de la línea 3-5. Esta es la región estable. La operación en la región 3-1 es inestable y la mínima caída en la presión puede causar que el sistema pierda el vacío. La ubicación relativa de los puntos 3 y 1 pueden ser controladas en algún grado por el diseño del eyector; y estos puntos no siempre existen para eyectores con bajas razones de compresión.

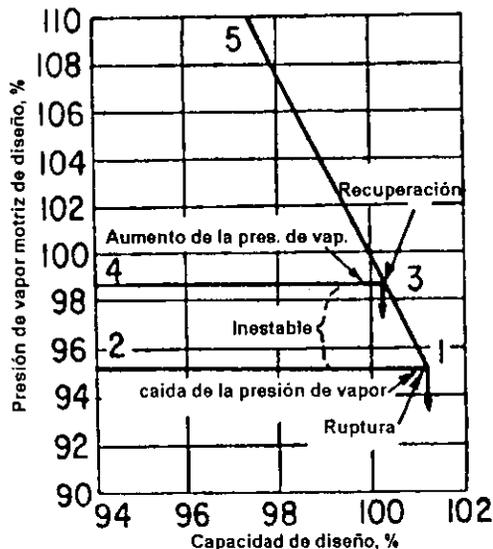


Fig. 2.5.- Efecto de la presión de vapor sobre la capacidad de un sistema de succión y contrapresión constante (ref. 10).

La figura 2.6, indica el cambio en la región de operación estable así como los cambios reflejados en la contrapresión sobre el eyector y la variación en la presión de vapor. Esta contrapresión del sistema debe representar una variación en la presión barométrica para una unidad descargando a la atmósfera, o una variación en la presión de operación en la alimentación de agua (u otro) a un calentador si la descarga del eyector es dentro de un sistema cerrado o condensador.

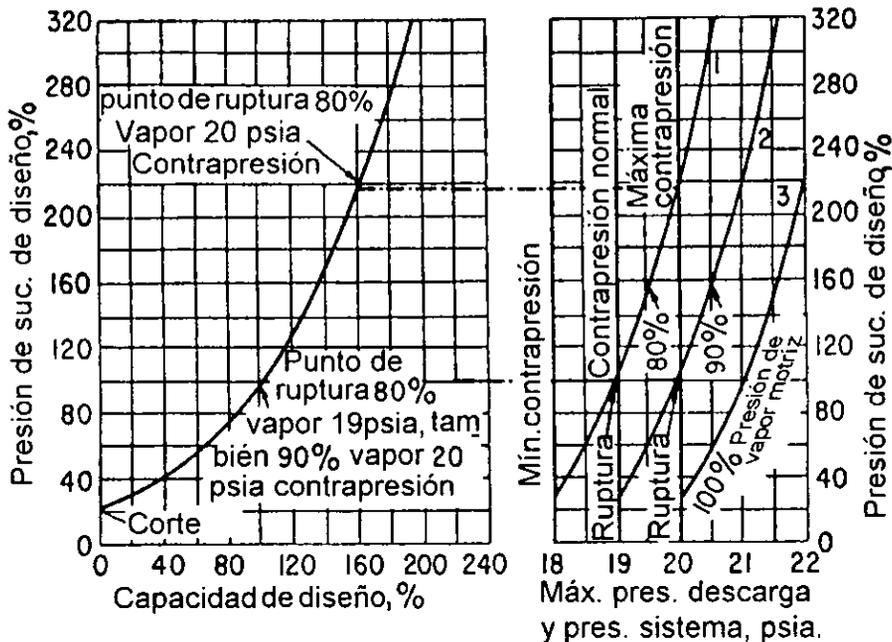


Fig.2.6.-Efecto de la variación de la contrapresión del sistema con la variación de la presión del vapor (ref. 10).

Las tres curvas de presión de vapor matriz, 100%-90%-80%, son obtenidas del fabricante de eyectores así como si la curva de operación de la presión de succión contra el porcentaje de capacidad de diseño del eyector. Esta última curva de una instalación actual debería mostrar la presión de succión absoluta actual contra libras por hora o pies cúbicos por minuto de aire o porcentaje de capacidad de diseño.

La contrapresión es representada por líneas casi rectas de pendiente mínima, normal y máxima. Solo una curva de capacidad es mostrada desde el incremento en la capacidad resultante de de la presión de vapor más baja es despreciable.

Las curvas 1, 2, y 3 representa la máxima presión de descarga segura, el sistema operará a lo largo de la curva de capacidad hasta alcanzar la presión de descarga del sistema, ya que la presión del eyector es menor que el máximo valor de la curva, todo

para una presión de succión dada. Los alcances de la curva son una función del tipo de eyector, su diseño físico y las condiciones relativas de presión. Tan pronto como la contrapresión de descarga exceda la máxima presión de descarga segura como lo representado por una de las curvas, el eyector opera en la ruptura en la región inestable.

En la figura 2.6, el 100 por ciento de la curva de presión no crusa alguna de las líneas de contrapresión (mínima, normal o máxima) y el eyector debería operar establemente sobre todo su rango completo, desde el corte. Siguiendo la curva de presión de vapor del 90%, el eyector es estable al 100% de la presión de succión de diseño y 100% de la capacidad de diseño a la máxima contrapresión. Este es inestable abajo de la carga de diseño, a no ser que el calentamiento por presión se reduzca. Notese que la ruptura ocurre a 20 psia y 100 por ciento de la presión de succión de diseño. Si la presión de descarga es reducida a 19 psia, la unidad sera estable al corte (capacidad cero). Al 80 por ciento de la presión de vapor permitira la operación estable desde el corte en todo el rango de capacidad siempre que la contrapresión no exceda las 18 psia. Este tipo de análisis es necesario para evaluar apropiadamente la operación del eyector con las variaciones del sistema.

2.11.-Capacidad: La capacidad de un eyector es expresada como libras por hora totales de condensables y no condensables en la brida de entrada de la unidad. Para unidades multietapa, la capacidad total debe ser separada dentro libras por hora de condensables y no condensables. Las etapas finales solo son requeridas para manejar la porción no condensable de la carga más la saturación húmeda surgida de los intercondensadores.

Los no condensables surgidos de un condensador de superficie son saturados con vapor de agua a la temperatura correspondiente a la presión. Para un condensador de proceso el vapor corresponde al fluido de proceso.

2.12.-Rango de operación estable: Si un eyector es estable a carga pequeña, poco o casi nada de vapor de agua regresará hacia el sistema de proceso. Si un eyector opera en una condición inestable, puede ocurrir una reversión de flujo de modo intermitente a pequeña carga, regresando vapor de agua dentro del sistema de proceso. Para eyectores grandes en los que ocurre que el vapor se regresa a pequeña carga es aceptable (sistemas de refrigeración a chorro de vapor o eyectores auxiliares en grandes sistemas descubiertos), ya que el vapor puede ser recuperado aceptando un rango reducido de operación estable, por decir de 50 a 100% de la carga de diseño.

Para establecer el rango de operación estable deseado de un eyector primero hay que determinar como se va a controlar la presión del sistema. El metodo más simple es introducir aire atmosférico dentro de la succión del eyector a través de una válvula controlada. En sistemas de proceso que contienen materiales orgánicos, frecuentemente es indeseable introducir aire o vapor de agua, pero es conveniente para controlar la

presión introduciendo un gas inerte tal como el nitrógeno hacia el eyector. Por uno u otro método, el eyector normalmente opera a condiciones indeseables, pero el flujo de gases secos hacia el eyector impiden algún retroceso de vapor de agua hacia el sistema de proceso.

En un sistema que tiene un volumen de vapor de 100 ft³ un típico sistema de instrumentación limitará las fluctuaciones de la presión en alrededor de 0.5 mm de Hg. Esto está basado en un instrumento con un tiempo de respuesta de cuatro segundos y un súbito cambio de 5 Lbs por h en el aire infiltrado dentro del sistema. La desviación de la presión es inversamente proporcional al volumen del sistema. Si el volumen es muy pequeño y el tiempo de respuesta del instrumento es muy lento, o si se prefiere control manual, puede ser deseable especificar un rango de operación ampliado para el eyector.

Un método simple para elevar la presión de succión mientras se mantiene una operación estable del eyector es introducir vapor por la succión del eyector, o por una desviación de vapor desde las posiciones de interetapa del eyector o por una línea que regresa desde la descarga a la primer etapa. Esta técnica puede ser usada sobre la mayoría de los eyectores multietapa, pero es necesario que suficiente vapor a presión adecuada este disponible para la carga de la primer etapa para tener la presión de succión deseada.

Si se usa una sangría de gas inerte, y el tiempo de respuesta del instrumento es bajo o se desea control manual, entonces se deberá especificar la presión de succión máxima a la cual el eyector deberá ser estable. Indicar también el máximo alcance de la curva de operación en mm Hg por libra por hora de aire equivalente seco (DAE). Si se usa vapor de agua o vapor no condensable para controlar la presión sobre un amplio rango de operación estable para una presión considerablemente por arriba de la presión de diseño, el método de control deberá ser discutido con el fabricante para establecer un diseño razonable.

2.13.-Tiempo de evacuación: Para estimar el tiempo requerido para que un eyector evacúe un sistema desde abajo de la presión atmosférica a la presión de diseño se asume que la capacidad promedio para manejar aire durante el período de evacuación es el doble de la capacidad de diseño para manejar aire. También se asume que la infiltración actual de aire hacia el sistema durante la evacuación es despreciable. El tiempo de evacuación aproximado es:

$$T_e = 2.3 \frac{V}{C_e} \quad (2.1)$$

donde :

T_e = Tiempo aproximado para evacuar un sistema, en minutos.

V = Volumen del sistema, espacio vapor, en pies cúbicos.

Ca = Capacidad de aire de diseño del eyector, Lb/h.

Si el período aproximado de evacuación es grande, puede acortarse adicionando una última etapa más grande o agregando un eyector no condensante en paralelo con la primer etapa. Un eyector no condensante puede usarse como un sistema adjunto para dar varios servicios como eyector libre y para evacuación. La operación de la evacuación se especifica indicando el volumen del sistema, el tiempo de evacuación deseado y la presión absoluta a la cual el sistema debe ser evacuado.

2.14.-Condensadores: Los condensadores de superficie usados con eyectores, en tamaño y tipo, van desde las unidades pequeñas de vapor por la coraza, unidades de tubos de placa fija, y tipo helicoidal de vapor por los tubos; hasta los grandes diseños verticales de cabeza flotante con vapor por los tubos.

Debido a que el lado de la coraza de éste diseño es inaccesible a la limpieza, usualmente el agua de enfriamiento se pasa por el lado de los tubos en un arreglo de multipasos, y los vapores son condensados sobre el lado de la coraza. En este diseño horizontal, la temperatura más baja de salida puede obtenerse sólo por una cuidadosa deflección y drenado del lado de la coraza. Por otro lado, si el condensador es arreglado verticalmente, y los vapores son condensados en los tubos, un eficiente patron de contraflujo puede establecerse, dando por resultado una baja temperatura a la salida del vapor. Sin embargo, el lado inaccesible de la coraza debe ser cuidadosamente defleccionado y la velocidad del agua debe conservarse alta para minimizar las fallas.

Varias características mecánicas son importantes desde el punto de vista de la operación adecuada. Una adecuada placa de choque y un codo entre la descarga del eyector y la entrada del vapor por la coraza del intercondensador protegerá los tubos de la erosión por las gotitas de agua a alta velocidad. Las conexiones de agua de enfriamiento y venteo deberán arreglarse para prevenir la acumulación de paquetes de gas si hay agua sobre el lado de la coraza. Esto es recomendable para tener fácil acceso a los tubos para taparlos o repararlos cuando haya fuga o cuando sea necesario limpiarlos. Si los tubos no pueden ser reparados, taponar y limpiar todo el condensador o quizá deba reemplazarse una parte de los tubos.

Algunas limitaciones en la disponibilidad de espacio el cual afecta el diseño del condensador, debe anotarse en la especificación. Es necesario especificar la longitud máxima de tubo que se prefiere si no se desea un condensador largo y esbelto.

Los condensadores Barométricos son enfriadores y condensadores de contacto directo. Pueden ser de contraflujo o flujo en paralelo. Se logra un buen enfriamiento por contacto directo y es un diseño barato y eficiente, siendo considerablemente más barato y más eficiente que los enfriadores indirectos de superficie o tubulares. En este caso, la temperatura a la salida del aire, en este tipo de condensadores, generalmente se asume alrededor de 5°F de la temperatura del agua de enfriamiento. Además, a la infiltración de aire, normalmente esperada, debe hacerse una consideración para el aire liberado por el agua de enfriamiento.

En un condensador de superficie, para dar la suficiente capacidad total, la temperatura a la salida del aire, generalmente se asume de alrededor de 7.5°F abajo de la temperatura de aire saturado, a la presión absoluta in el condensador.

2.15.-Tipo de conexiones: Las conexiones atornilladas son más baratas pero las fugas son difíciles de detectar y corregir. Las conexiones por bridas son útiles cuando se localizan fallas. Aunque los eyectores dan muy pocos problemas, las uniones por bridas son valorable por que permiten el fácil aislamiento y operación de prueba del equipo cuando ocurre una perturbación costosa .

2.16.-Equipo auxiliar: Si se desea un paquete de ingeniería, especificar que el oferta sea un paquete completo incluyendo una coladera de vapor, un separador, trampas, un sobrecalentador (cuando se requiera), válvulas, codos y tubería interetapa. Así como también indicar si se prefiere algún plan y describir el espacio aproximado disponible.

2.17.-Sobrecalentador: Para presiones de diseño abajo de 5 mmHg abs. el fabricante puede suministrar un sobrecalentador eléctrico para el vapor motriz para una o más de las etapas. También puede usarse un sobrecalentador para agregar una ligera cantidad de sobrecalentamiento al vapor húmedo para conseguir un mejor funcionamiento del eyector, con mínima erosión de la boquilla y el difusor. Si se usa un sobrecalentador eléctrico cuando el suministro de vapor es interrumpido, éste puede quemarse, a no ser que esté equipado con un mecanismo de protección automática. Después de los servicios del sobrecalentador colocar un termómetro y un termostato.

2.18.-Número de elementos: Usualmente un eyector de etapa simple es adecuado. Donde se requiera una gran disponibilidad puede especificarse un eyector de dos etapas. En éste diseño cada etapa del eyector consiste en dos elementos por duplicado, cada uno de los cuales puede ser aislado por válvulas en la succión y descarga para poder ser removidos para inspección y reparación. Se han desarrollado paquetes estandares de eyectores de elementos dobles, de dos etapa, para el servicio de condensado de vapor de turbinas. Si la carga es conocida y varía de manera predecible, un eyector multielemento manejará una condición de alta carga y permitirá ahorrar vapor durante los

períodos de poca carga. Un sistema de refrigeración por chorro de vapor, es un ejemplo de un sistema eyector de múltiple elemento, en este caso, sólo la primer etapa tiene más de un elemento.

2.19.-Número de etapas: Usualmente el fabricante determina el mejor número de etapas. Si él conoce el costo de los servicios usados en la evaluación de su cotización, él podrá hacer su mejor ofrecimiento. Ocasionalmente, una estimación preliminar puede revelar que un diseño es claramente preferible que otro. Por ejemplo, un eyector no condensante de dos etapas, debido a su bajo costo de instalación y su simplicidad, debe ser más atractivo que un eyector condensante de dos etapas que usa menos vapor. Debe especificarse el diseño que se prefiere.

2.20.-Factores de costo-utilidad: Siempre que sea posible es adecuado dar los factores de costo-utilidad al fabricante para que él pueda desarrollar su ofrecimiento más económico. Ya que de lo contrario, él, deberá hacer una suposición o preparar un ofrecimiento basado en una cotización de bajo costo o someterse a varias alternativas. Tales factores incluyen el costo de servicios instalados como el de la libra de vapor por hora y el galón por minuto de agua de enfriamiento, también puede incluirse el incremento anual en el costo de éstos servicios.

Ideamente, estos factores deberán desarrollarse para cada proyecto de diseño. Si esta información específica no esta disponible, el uso de datos generalizados de costo-utilidad o una aproximación es mejor a no dar ninguna consideración de los servicios usados. Los datos de costo-utilidad dados al fabricante para su uso en la optimización del diseño de eyectores es de valor similar para el proceso de la ingeniería de diseño en la optimización del diseño del resto del sistema de vacío. Para evitar ambigüedad explicar al fabricante como se usan éstos factores.

2.21.-Materiales de construcción: Los estándares del HEI (Heat Exchanger Institute) listan combinaciones estándar de materiales para la construcción de eyectores a chorro de vapor. Los detalles de la construcción varían de un fabricante a otro, así como con el tamaño y los materiales de construcción. En todos los eyectores la boquilla, el difusor, la cámara de succión, y algunas otras partes pueden estar en contacto con el vapor de proceso durante periodos de paro. Así, la boquilla y el difusor son sensibles a los cambios geométricos causados por la erosión y la corrosión. Es por ello que debe seleccionarse adecuadamente el material a emplear dependiendo de las condiciones de trabajo.

A continuación se presenta una lista de los materiales típicos de construcción y los valores de tensión permisible. La tabla 2.2 no cubre todos los posibles materiales. Otros materiales, que estén igualmente disponibles, pueden ser usados. Cuando las condiciones lo permiten, pueden usarse materiales no metálicos tales como grafito y cerámica de alúmina para pequeños tamaños y en acero para tamaños grandes. Si los materiales estándar son aceptables, preguntar al fabricante como especificarlos. De lo contrario

especificar los materiales deseados para cada componente. Para los condensadores de superficie los materiales de construcción son similares a los de otros enfriadores o condensadores en los sistemas de proceso. Aunque los fluidos de proceso puedan no ser corrosivos o ensuciantes por naturaleza, el material de los tubos deberá seleccionarse para minimizar el ensuciamiento o la corrosión por el lado del agua, más bien que tener una especificación rígida de materiales que se usarán en el diseño. Esto es lo mejor para ofrecer combinaciones de materiales aceptados con varios diseños de condensadores.

Tabla 2.2.-Lista de materiales de construcción de las partes de un eyector.

Parte	Material	Especificación	Tensión permisible psi*
Difusor	Placa de acero al carbón	ASTM A-36 excepto acero Bessemer ASTM A-283 ASTM A-285 ASTM A-515	Las tensiones de trabajo son las correspondientes al código ASME.
	Placa de acero inoxidable	ASTM A-240 TP304 ASTM A-240 TP316	
	Barra de acero al carbón	ASTM A-36 ASTM A-675	
	Barra de acero inoxidable**	ASTM A-276 TP304 ASTM A-276 TP316 ASTM A-276 TP321 ASTM A-276 TP347	
	Fierro fundido **	ASTM A-48 ASTM A-278 ASTM A-395	0.1x Tensión mínima
	Acero al carbón forjado	ASTM A-105 ASTM A-181	
	Acero fundido	ASTM A-27** ASTM A-216 ASTM A-217	
	Bronce fundido	ASTM B-62 ASTM B-584	

Tabla 2.2.-Lista de materiales para la construcción de las partes de un eyector (continuación).

	Acero inoxidable fundido	ASTM A-296** ASTM A-35	
Camara de succión	Placa de acero al carbón	ASTM A-36 excepto acero Bessemer ASTM A-283 ASTM A-285 ASTM A-515	
	Placa de acero inoxidable	ASTM A-240 TP304 ASTM A-240 TP316	
	Tubo de acero al carbón	ASTM A-53 ASTM A-106	
	Tubo de acero inoxidable	ASTM A-312 ASTM A-376	
	Fierro fundido**	ASTM A-48 ASTM A-278 ASTM A-395	0.1x Tensión mínima
	Acero fundido	ASTM A-27** ASTM A-216 ASTM A-217	
	Bronce fundido	ASTM B-62 ASTM B-584	
	Acero inox. fundido	ASTM A-296** ASTM A-351	
	Acero al carbon forjado	ASTM A-105 ASTM A-181	
	Acero al carbón fundido	ASTM A-234	
	Acero inox. fundido	ASTM A-403 TP304 ASTM A-403 TP316	

Tabla 2.2.-Lista de materiales para la construcción de las partes de un eyector (continuación).

Boquilla	Barra de acero inoxidable	ASTM A-276 TP304** ASTM A-276 TP316** ASTM A-276 TP321** ASTM A-276 TP347** ASTM A-479 TP316 ASTM A-482 TP303** ASTM A-582 TP416**	
	Placa de acero inoxidable	ASTM A-240 TP304 ASTM A-240 TP316 ASTM A-240 TP416	
	Niquel Cobre	ASTM B-164	
Caja de vapor	Barra de acero al carbón	ASTM A-36 ASTM A-675	
	Tubo de acero	ASTM A-53 ASTM A-106 ASTM A-335	
	Acero fundido	ASTM A-216 ASTM A-217	
	Acero inox. fundido	ASTM A-296 ASTM A-351	
	Acero al carbón forjado	ASTM A-105 ASTM A-181	
	Acero forjado de baja aleación	ASTM A-182 F-11 ASTM A-181 F22	
	Acero inoxidable forjado	ASTM A-182 F-316 ASTM A-182 F-321 ASTM A-182 F-347	
	Bronce fundido	ASTM B-62 ASTM B-584	

Tabla 2.2.-Lista de materiales para la construcción de las partes de un eyector (continuación).

Extensión	Barra de acero inoxidable	ASTM A-276 TP304** ASTM A-276 TP316** ASTM A-276 TP321** ASTM A-276 TP347** ASTM A-479 TP316 ASTM A-482TP303** ASTM A-582 TP416	
Tubería de vapor sobrecal.	Tubo de acero	ASTM A-53 ASTM A-106 ASTM A-335	
	Tubo de acero inoxidable	ASTM A-312 ASTM A-376	
	Acero al carbon forjado	ASTM A-105 ASTM A-181	
	Acero forjado de baja aleación	ASTM A-182 F-11 ASTM A-182 F-22	
	Acero inoxidable forjado	ASTM A-182 F-316 ASTM A-182 F-321 ASTM A-182 F-347	
Tubería de vapor saturado	Tubo de acero al carbón	ASTM A-53 ASTM A-106	
	Acero al carbón forjado	ASTM A-234	
	Placa de acero al carbón	ASTM A-285 Gr C	
Sujetadores	De bola	ASTM A-193 ASTM A-325	
	De nuez	ASTM A-194 ASTM A-325	

* Los valores de tensión permisible deben ser tomados de la sección VIII, División I, parte AM, Tabla ACS-2, AHA-1, AHA-2, AQT-1, AQT-2, ANF-1 del Código ASME para recipientes a presión.

** Valores de tensión permitida usados conforme a la práctica de ingeniería aceptada.

2.22.-Agua de enfriamiento: Dar la mínima presión y la máxima temperatura de suministro para propósitos de diseño. Limitar la temperatura máxima permisible a la salida del agua de enfriamiento a 122°F (50°C) para evitar el excesivo ensuciamiento y la corrosión.

2.23.-Vapor: Para la mínima presión permitida especificar una presión alrededor de 5 a 10 por ciento por abajo de la presión más baja del vapor motriz a la cual el eyector deberá ser operado. Indicar ya sea que el vapor es seco y saturado o si es sobrecalentado, especificando el sobrecalentamiento normal y el máximo esperado, en grados Fahrenheit. Indicar que cálculos de flujo de vapor serán usados para basar el suministro de cada boquilla con vapor a las condiciones especificadas.

Si es posible sujetar los componentes del sistema a altas presiones de vapor, listar estas presiones como las máximas para propósitos de diseño e identificar los componentes.

El efecto de un vapor húmedo es erosionar la boquilla del eyector e interfiere con la operación por el taponamiento de la boquilla con gotitas de agua. El efecto sobre la operación es significativa, y usualmente se refleja en una fluctuación del vacío.

El efecto de sobrecalentamiento de unos pocos grados es recomendable, 5 a 15°F, pero su efecto debe ser considerado en el diseño del eyector. Un alto grado de sobrecalentamiento no es ventajoso ya que el incremento en la energía disponible debido al sobrecalentamiento, es contrarrestada por un decremento de la densidad del vapor.

2.24.-Pruebas: Generalmente, el fabricante deberá conducir pruebas hidrostáticas y de funcionamiento del eyector y deberá certificar los resultados al comprador. Descripciones detalladas del equipo y de los procedimientos para la conducción de pruebas precisas del funcionamiento de eyectores a chorro de vapor se incluyen en los estándares del HEI y el ASME. Sin embargo, pruebas menos elaboradas son adecuadas para establecer la capacidad aproximada del eyector y para detectar errores grandes en el diseño o en la fabricación de los componentes.

El eyector puede probarse completamente instalado o como etapas individuales. Se deberá probar su funcionamiento a todas las condiciones de diseño especificadas. La prueba deberá continuarse para obtener curvas de operación ampliadas para cada etapa del eyector; para que las use el personal de operación, para la planeación de localización de averías y mantenimiento. La prueba de carga consiste de cantidades medidas de aire y vapor de agua.

La evaluación de etapas individuales es más conveniente para algunos fabricantes, pero tiene la desventaja de que no da una comprobación del eyector completamente ensamblado.

La prueba hidrostática de HEI sirve básicamente para detectar infiltración en el equipo de vacío, y como una prueba de fuerza y fuga en equipo a presión. Esto minimiza la probabilidad de instalar un eyector con defectos o grandes infiltraciones, incrementando los costos de mantenimiento o provocación de grandes pérdidas en los costos de la conducción de una simple prueba.

Los estándares para las pruebas en campo del HEI (Heat Exchanger Institute) para eyectores a chorro de vapor establece los requerimientos para llevar a cabo las pruebas. Este código está compuesto de ocho puntos, el primero describe el alcance de la prueba, establece las condiciones de diseño, la estabilidad, requerimientos distintos a los establecidos en los puntos de diseño, y la evacuación donde se determina la velocidad de infiltración de aire hacia el sistema de vacío. El segundo punto indica que el equipo que será probado solo incluirá el que el fabricante va a proveer a menos que se indique otra cosa. El tercer punto establece los requerimientos de aislamiento del equipo. El cuarto punto establece las condiciones de carga durante la prueba, así como el arreglo de la boquilla. En el quinto punto establece los servicios y sus condiciones requeridas. El sexto punto los controles necesarios y el séptimo punto indica los requerimientos de la instrumentación que se empleará. El último punto da una forma para la presentación de los datos, como resultado de la prueba.

El código ASME para la realización de pruebas sobre eyectores, también da direcciones estandar para la realización y reporte de pruebas de unidades eyectoras de etapa simple o múltiple. El objetivo de las pruebas que presenta es establecer la capacidad del eyector en relación a la presión de succión, la presión de descarga en relación a la presión de succión, la velocidad del flujo de vapor motriz en relación a la temperatura y presión estipulada, la estabilidad del eyector y la relación de la presión del fluido motriz o la presión de descarga a la ruptura y la recuperación de la acción de bombeo. Este código da una introducción de lo que involucran las pruebas, establece sus objetivos, hace una amplia descripción y definición de términos, da guías para ejecutar las pruebas, indica los arreglos para las pruebas, establece los cálculos necesarios que hay que hacer, y también da una forma para reportar los resultados. Cabe mencionar que el código ASME abarca más ampliamente el tema, es recomendable consultar ambos códigos ya que pueden considerarse complementarios. Para revisar detalles específicos es recomendable revisar los códigos presentados en las referencias.

2.25.-Características mecánicas varias: Quizá la característica más importante es el acceso conveniente a la boquilla de vapor en cada etapa. Si es posible arreglar la tubería de vapor para que cada garganta de boquilla pueda ser inspeccionada visualmente por la simple remoción de un tapon de inspección. Otro aspecto de primer importancia es

proveer de orificios donde se puedan colocar manómetros para la prueba de presión en la cámara de succión o en la tubería de succión de cada etapa. Tamaños típicos en estas conexiones de presión son un 1/4 y 1/2 de pulgada. Para los orificios de 1/4 de pulgada, se usa un tapon con una cabeza larga, debido a que la cabeza normal pequeña es fácilmente dañada por una llave de tuercas. Cuando un eyector esta siendo analizado etapa por etapa por algún contratiempo, es muy conveniente tener una conexión bridada en la succión de cada etapa para aislarla. Algunos fabricantes usan conexiones atornilladas para las piezas más pequeñas pero pueden poner bridas por un pequeño precio extra.

Rasgos adicionales, los cuales son convenientes pero de menor importancia, son las perforaciones para medir la presión en la caja de vapor, la entrada y salida de conexiones de los intercondensadores; tapas en drenes en los puntos inferiores de etapas grandes para el arranque rápido, removiendo el condensado despues de un largo periodo de paro. La previsión de muchos de estos rasgos es una práctica estándar con algunos fabricantes, pero a veces se apartan de sus prácticas cuando trabajan con diseños no estándares o materiales especiales de construcción.

2.26.-Partes de recambio: Es deseable tener un conjunto completo de boquillas de vapor para cada eyector. Después de un periodo de operación, la boquilla de vapor frecuentemente llega a estar moderadamente sucia con depósitos a partir del vapor. Así, las boquillas de repuesto pueden ser instaladas y la unidad podrá volver al servicio. Las boquillas sucias pueden ser limpiadas e inspeccionadas en un tiempo conveniente. Por razones similares, un difusor de repuesto puede estar en existencia para la última etapa de un eyector multietapa. La última etapa tiene un difusor de garganta más pequeña que cualquiera de las otras etapas, y su funcionamiento es más sensible a los efectos del ensuciamiento o erosión. Si existen condiciones de ensuciamiento o erosión, usualmente se experimentarán dificultades con la última etapa antes de que lleguen a ser serias en las etapas precedentes. Otras partes de repuesto que pueden estar en existencia incluyen juntas especiales y tubos de repuesto, herramientas para la reparación de los condensadores de superficie, si estos detalles no se llevan a cabo normalmente en los talleres de la planta. Aquí se esta hablando de una planta con una intensa actividad o con condiciones extremas de ensuciamiento o erosión.

2.27.-Tamaños limite: Aunque no hay un limite teórico para la pequeñez de las etapas del eyector, dos factores imponen limites prácticos. El primero es que unidades extremadamente pequeñas son muy sensibles a las imperfecciones dimensionales introducidas por ensuciamiento o erosión de la boquilla de vapor o del difusor, y las tolerancias presentes en los métodos normales de fabricación. El segundo factor es que la eficiencia de unidades muy pequeñas es considerablemente más baja que en unidades grandes. En las unidades grandes, tales como los boosters (o unidades auxiliares) de chorro de vapor para refrigeración las eficiencias se aproximan a las máximas eficiencias

comercialmente disponibles en eyectores. Dependiendo del tamaño actual de una etapa y las condiciones de diseño, un factor de corrección de tamaño debe usarse para corregir por el decremento de la eficiencia de etapas. Una técnica para evitar el uso de boquillas de vapor de diámetro pequeño, extremadamente sensitivas, es diseñar la primer etapa de dicho eyector para operar con vapor motriz a una presión reducida. El vapor en la etapa pequeña puede ser estrangulado manualmente a la presión correcta. Sin embargo, esto incrementa la complejidad de la operación.

Todos estos datos se recopilan en una hoja de especificaciones como la siguiente, la cual puede variar de un fabricante a otro en cuanto al formato, pero la información que contiene básicamente es la misma.

Trabajo N° _____

B/M N° _____

ESPEC. DWG. N°

A.

Página de páginas

Prece unitario:

N° de unidades:

Partida:

ESPECIFICACIÓN DE UN SISTEMA EYECTOR

PERFORMANCE		Presión máxima	
Fabricante _____	Tipo _____		
Servicio _____	Condensador <input type="checkbox"/> Barométrico <input type="checkbox"/> Superficie		
N° de etapas _____	N° de eyectores por etapa _____		
Presión de succión _____ mmHg abs.	Temp. de suc. _____ °F	Máx. Presión de desc. _____ mmHg abs.	
Vapor: Presión mín _____ psia	Temp. _____ °F	Calidad _____ %	
Agua: Fuente _____	Presión máx. _____ psia	Máx. Temp. _____ °F	
Vol. del sistema a evacuar _____ pies cúbicos			
Infiltración de aire reparada _____ Lb/h			
Máx. tiempo de evacuación _____ min.			
Carga del eyector _____ Lb/h	Peso molecular _____	Capacidad calorífica _____	Calor latente _____
Condensables _____			
No Condensables _____			

DISEÑO

	Primera etapa	Segunda etapa	Tercera etapa	Cuarta etapa	Quinta etapa
Vapor entrte, Lb/h					
Vapor: Boquilla de entrada					
Vapor: Pres. Clase y Recubrimiento					
Agua, GPM					
Agua ΔT, °F					
Agua: Boquilla de entrada					
Pres. Clase y Recubrimiento					
Agua: Diámetro de salida					
Pres. Clase y Recubrimiento					
Presión en la cámara de succión mm Hg abs.					
Temp. en la cámara de succión °F					
Condensador: Pre - Inter - Post					
Barométrico: N° de etapas de contacto					
Superficie: Área exterior del tubo, pies cúbicos					

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Eyector: Caja de vapor _____ Boquilla de vapor _____

Difusor: Entrada _____ Descarga _____ Cámara de succión _____

Entrada en la primera cámara de suc. (Tamaño X Pres. Clase X Recub.) _____ X _____ X _____

Condensador barométrico: Coraza _____ Deflector _____ Boquilla _____

Condensador de superficie: Coraza _____ Cabeza _____

Tubos (D.E.X B/WG X L) _____ X _____ X _____ Material _____

Área de trazo de tubos _____ Deflector _____

Trampa de vapor _____ Válvula de corte _____

OBSERVACIONES

Magnitud de tubos por: _____

Proveedor de tubería de interc. _____

Elaboró: _____ Revisó _____ Aprobó _____ Revisión 1 _____ Revisión 2 _____ Revisión 3 _____

Fecha: _____

Enviado a: _____

CAPITULO 3

INSTALACION Y OPERACIÓN DEL SISTEMA EYECTOR

3.1.-Instalación del sistema eyector

La instalación de un sistema eyector de una o más etapas, puede incluir un condensador antes de la unidad, entre etapas o después de la etapa final. La figura 3.1 muestra la instalación típica de dos unidades, una unidad de dos y la otra de tres etapas.

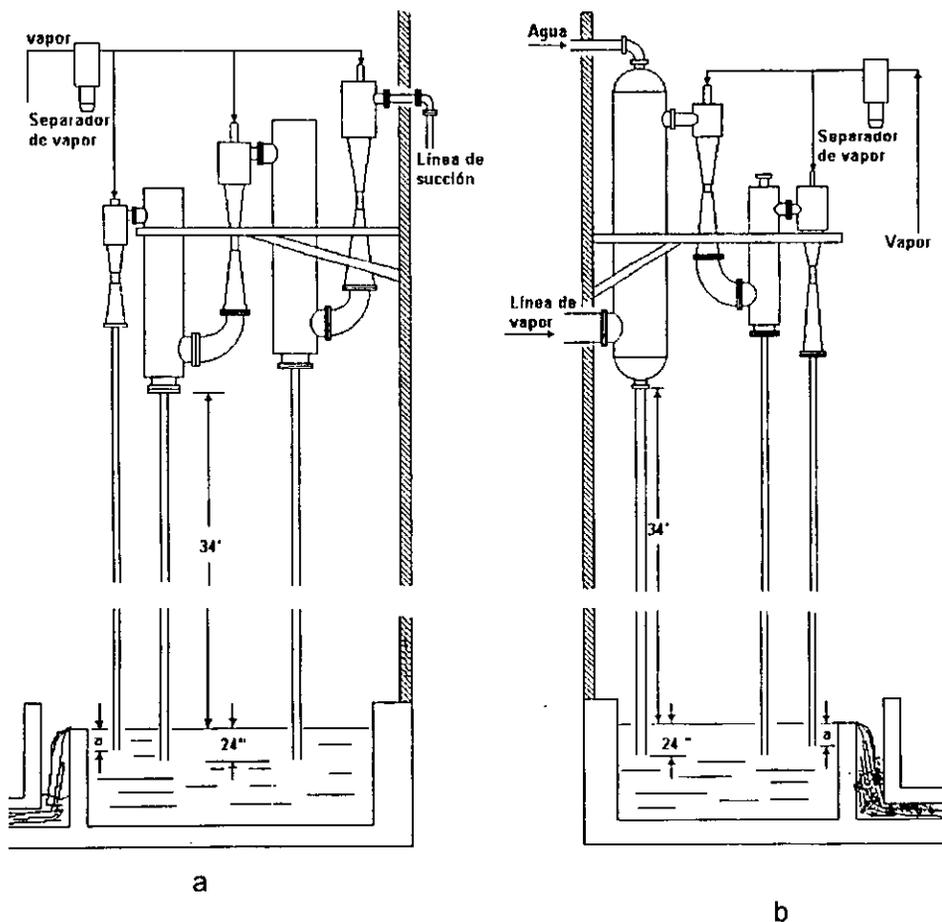


Fig.3.1.Arreglo típico para la instalación de sistemas con tres etapas eyectoras, y dos intercondensadores (a), y otra de dos etapas con precondensador barométrico (b). Donde a=6" máx.

3.2.- Arreglo general

Las etapas pueden ser instaladas vertical, horizontal o en cualquier dirección conveniente según el espacio de que se disponga. Sin embargo, se puede observar en dicha figura que todas las etapas se muestran verticalmente hacia abajo. Se prefiere un arreglo de este tipo debido a que tienen un buen drenado de manera natural. Cuando las etapas se instalan verticalmente hacia arriba u horizontalmente, se deberán instalar válvulas de drenaje en los puntos bajos para drenar condensados y líquidos de la unidad antes del arranque.

Las etapas pueden ser tratadas como tubería de diámetro equivalente en lo que concierne al soporte. Generalmente, no existen problemas de expansión en el sistema debido a la temperatura, a menos que los vapores del proceso tengan una temperatura alta, o que el sistema sea operado incorrectamente de tal manera que el vapor motriz caliente toda la unidad a altas temperaturas. Si se anticipan problemas de expansión, se pueden utilizar juntas de expansión; o en un arreglo más simple, colocar los condensadores sobre resortes de manera que se puedan mover y aliviar los esfuerzos causados por la expansión de las etapas.

3.3.- Suministro de vapor

El suministro de vapor en un eyector puede causar tantos problemas de operación como cualquier otra parte del sistema. Si cada eyector instalado fuera alimentado con vapor completamente seco o sobrecalentado habría pocos problemas, sin embargo no se hace así y se deben tomar medidas para quitar la humedad del vapor de las etapas del eyector.

El primer paso a seguir para lograr esto, es hacer correctamente la conexión del suministro principal del vapor. La figura 3.1 muestra el método que ha de utilizarse siempre. Cualquier rama de la línea del cabezal principal deberá ser conectada a la parte superior de la línea principal. Al hacer ésto, el agua de la parte inferior de la tubería no entrará a la tubería que va al eyector. Este método de conexión es importante en lugares en donde el suministro de vapor es tomado cerca o al final de una larga tubería. El cabezal de la tubería deberá ser diseñado adecuadamente en tal forma que se tengan trampas para condensados en los puntos bajos.

El siguiente paso para eliminar la humedad es la instalación de un separador del tamaño adecuado en la línea de vapor hacia los eyectores. Este deberá ser colocado lo más cerca posible a los eyectores y los drenes deberán ser diseñados de acuerdo con la experiencia. El separador deberá tener el tamaño correcto para el flujo de vapor que se utilice.

Después de haber pasado por el separador se sacan líneas para cada etapa del eyector. Estos tramos deberán tomarse de la parte superior de la línea de vapor, así como la

conexión de la línea principal. La línea de la etapa que utiliza menos vapor deberá ser colocada justo después del separador y la última conexión será para la etapa que usa la mayor cantidad de vapor. Si los consumos de vapor por etapa se desconocen, pueden determinarse cantidades comparativas de flujo de vapor a partir de las dimensiones de las boquillas. Las líneas de vapor hacia las etapas deben ser tan cortas como sea posible, siendo esto una especificación especialmente importante en las etapas que tienen bajo consumo de vapor.

Los sobrecalentadores de vapor operados eléctricamente se utilizan a veces para asegurar que el vapor suministrado sea seco o sobrecalentado hacia las etapas de bajo consumo de vapor. Estos sobrecalentadores deben diseñarse correctamente para la cantidad de vapor que se espera. Deberán localizarse después del separador y tan cerca como sea posible a la etapa que se esté alimentando.

La línea de vapor deberá contener, para cada etapa, una válvula de paro, un filtro si el orificio de la boquilla es menor a 3/8" y, una conexión de venteo. Es importante usar la válvula de paro o corte del vapor para dejar completamente cerrado el suministro de vapor. De otra manera, durante los períodos de cierre, el vapor se escapará a través de la válvula causando condensación en el sistema. Es conveniente emplear una conexión de purgas para que durante el arranque se puedan calentar las líneas frías y mediante esta conexión se pueda drenar el condensado. Deberá instalarse un manómetro en la cámara de vapor de la última etapa, ya que ésta es la que se ve más afectada cuando disminuye la presión del vapor motriz.

Las líneas de vapor deben aislarse de acuerdo a la práctica común. El aislamiento deberá incluir a la caja de vapor motriz. Las otras partes del eyector no es necesario aislarlas.

La pregunta más común en el suministro de vapor se refiere a la presión del mismo. Los eyectores se diseñan generalmente para una presión de vapor menor que la presión en la línea para prevenir problemas de vacío si la presión en ésta bajara temporalmente. Como resultado de esto, el eyector opera con alta presión la mayor parte del tiempo. El exceso de presión reduce la capacidad del eyector. Para presiones de vapor mayores al 10% que la de diseño origina una reducción, poco significativa, en la capacidad; pero para presiones mayores la pérdida de carga puede hacerse importante. El otro efecto de la sobrepresión es el mayor consumo de vapor y agua de enfriamiento, lo cual implica un desperdicio.

Colocar sobrecalentadores en la línea de vapor resulta ventajoso, ya que elimina la humedad del vapor motriz.

Las etapas que operan abajo de 5 mmHg abs; generalmente son fabricadas con chaquetas de vapor. Es importante suministrar suficiente vapor a la chaqueta para mantener una presión positiva (generalmente se instalan válvulas de relevo a 5 psig. para drenar el vapor condensado fuera de la chaqueta se utiliza una trampa colocada

convenientemente. Si existe la posibilidad de que el suministro de vapor en la chaqueta sea insuficiente o suspendido, tal como el cierre inadvertido de una válvula en la línea de suministro, deberá prevenirse el relevado de vacío que resulta cuando el vapor de la chaqueta condense. De otra manera, de no hacer ésto, la chaqueta se comprimirá ya que no está diseñada para vacío. Esto se puede prevenir utilizando una válvula Check en la línea de suministro de vapor. Un método más efectivo para evitar la compresión de la chaqueta, es eliminar la trampa y drenar el condensado a través de un drene abierto no sumergido en agua. El flujo de vapor que va a la chaqueta se mantiene ajustando el suministro de vapor hasta que haya un ligero flujo de vapor en el drene.

3.4.- Suministro de agua

El suministro de agua para un condensador tipo barométrico no debe exceder a la temperatura de diseño y deberá tener una presión suficiente para llevar el agua a la entrada del condensador en cantidad suficiente. El vacío, en el condensador, reducirá los requerimientos potenciales de suministro de agua, pero la instalación deberá proveer suficiente presión para llevar el flujo de una pequeña cantidad de agua, cuando la unidad esté a presión atmosférica y requiera una presión de suministro de agua lo suficientemente alta para soportar la caída de presión a través del atomizador en el condensador.

Se deberán instalar dos válvulas en las líneas de agua. Una se utilizará como válvula de cierre y la otra para controlar el flujo de agua al gasto requerido. El uso de dos válvulas permite el cierre del equipo sin alterar la válvula que regula el flujo requerido. De ésta manera, en el arranque subsecuente no se necesita volver ajustar el flujo de agua. Si la presión de suministro de agua varía, será necesario instalar una estación de control de presión en la línea de suministro de agua.

Es preferible tener una válvula de cierre para cada condensador que una sola para todos, ya que lo más conveniente es arrancar los condensadores en serie y no tener agua fluyendo a través de las unidades durante la evacuación a presión atmosférica. La válvula de control deberá localizarse lo más cerca del condensador como sea posible, debido a que usualmente se hace vacío en la línea de agua, corriente abajo de ésta válvula, lo que aumenta la infiltración de aire a través de accesorios, malas soldaduras, etc.

Las bombas para agua de enfriamiento deberán tener la succión localizada de tal manera que prevenga la entrada de aire y todas sus uniones deberán ser herméticas, por la misma razón. Cualquier cantidad de aire que vaya en el agua se escapa en los condensadores aumentando la carga de no condensables del eyector.

El agua para los condensadores del tipo de superficie deberán tener una cierta velocidad másica para prevenir que se incrusten o ensucien los tubos. La mayoría de los condensadores están diseñados con la boquilla de entrada del agua por abajo y la de la salida por arriba, lo que los hace tener su propio venteo. En los casos en que el flujo de

agua sea hacia abajo, se debe prevenir para que se tenga ventilación para las cámaras de agua.

La única instrumentación que se requiere en el sistema de suministro de agua es un indicador de temperatura en la entrada. Los indicadores de temperatura también deberán colocarse en la conexión de salida de cada condensador.

3.5.- Pierna barométrica

La pierna de un condensador operando a vacío deberá tener, por lo menos, 34 pies de longitud entre el nivel del agua en el pozo caliente (hot well), y el agua de salida del condensador.

El diámetro de la pierna deberá ser, a lo menos, igual a la conexión de salida del condensador. El mejor arreglo es una tubería recta que descargue dentro del pozo. Si se requiere usar codos es necesario usar una tubería recta de al menos 6 pulgadas abajo de la brida de salida del agua del condensador.

Aún así, lo mínimo para el codo son 45°. Si se usan codos de 90°, se debe aumentar la altura de la pierna para vencer la presión adicional causada por los codos. Deberán evitarse bridas en las piernas, porque cualquier entrada de aire puede causar serios problemas en la operación. La figura 3.2 muestra los posibles arreglos de la pierna barométrica.

El extremo de la pierna deberá estar por lo menos a 6 pulgadas del fondo del mismo para prevenir bloqueo por lodos asentados a una profundidad apreciable del pozo caliente. Los termómetros se deberán colocar, preferentemente, en la pierna de cada condensador barométrico, lo más cerca posible del pozo caliente, con el fin de evitar errores de lectura. Generalmente, es satisfactorio una localización a 10 pies o menos, arriba del nivel del agua en el pozo caliente.

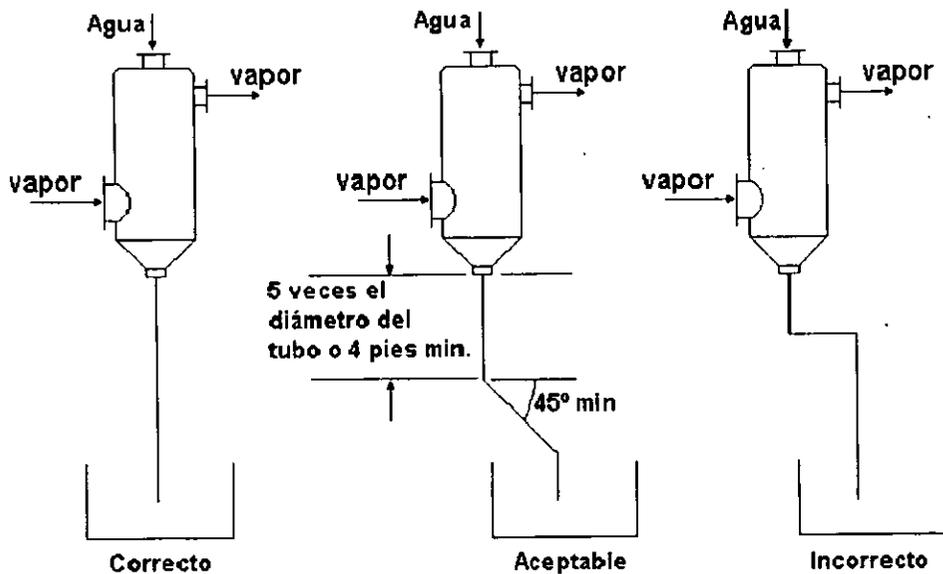


Fig. 4.2. Para promover el drenado del condensado, la pierna barométrica debe instalarse verticalmente. Se muestran tres posibilidades, la primera es la situación deseable, la segunda aún es aceptable, pero la tercera es preferible evitarla.

Cuando se usan dos o más condensadores se está tentado a combinar la pierna de estos condensadores. Esto, aunque es posible, es extremadamente impráctico y debe evitarse. La diferencia de costos no puede ser comparada puesto que éste arreglo puede ocasionar graves problemas de operación cuando la última etapa descarga al pozo caliente, se pueden originar molestos ruidos. Esto puede ser eliminado por uno de los arreglos mostrados en la figura 3.3. Cuando la distancia de la línea de la última etapa al nivel del agua del pozo caliente es menor de 34 pies, se debe instalar una válvula Check en la línea. Esta válvula Check previene el inundamiento del sistema, en caso de que ocurran fluctuaciones en el vacío mantenido.

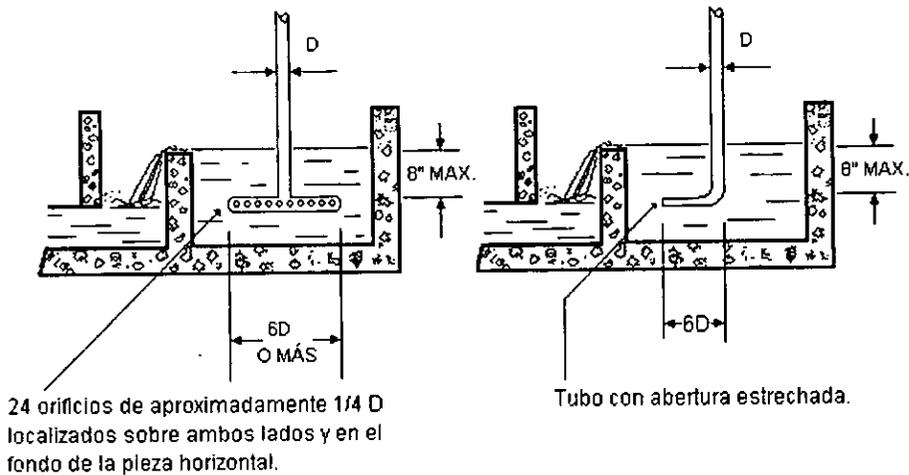


Fig.4.3.-Arreglo del extremo inferior de la piema barometrica.

Si la descarga de la etapa final es a la atmósfera, la longitud de la línea deberá ser lo más corta posible. Normalmente, la línea de descarga deberá ser más larga que el diámetro del eyector. Sin embargo, para tramos que contengan codos y otros accesorios, es conveniente incrementar el diámetro dos veces para minimizar la caída de la presión y por consiguiente una disminución de la contrapresión en el eyector. La tubería de descarga debe permitir el drenado del vapor condensado, durante operación y paro.

Quando no hay suficiente altura para construir una piema barométrica apropiada, puede agregarse un sistema de remoción de condensados, tal como una bomba para remover los condensados a una velocidad constante, con un controlador mecánico de nivel que abra y cierre la válvula, para controlar el flujo de agua de enfriamiento del condensador como se muestra en la figura 3.4. Las líneas punteadas representan un arreglo alternativo.

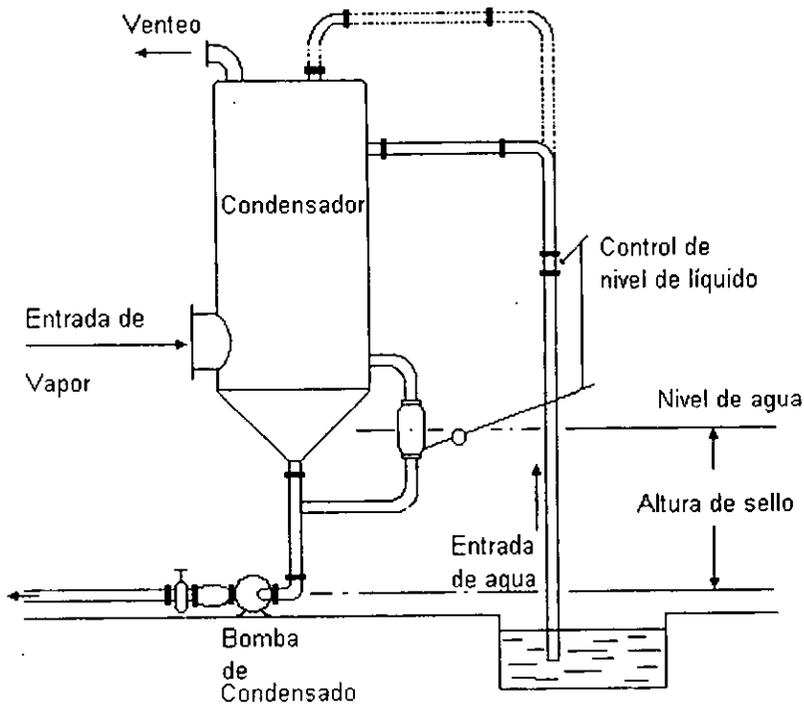


Fig. 3.4.- Posible arreglo para la remoción de condensados utilizando una bomba. en los casos en que no hay la altura suficiente.

Si durante la remoción del condensado éste es regresado a un tanque de recolección que opera a una presión más baja que la del condensador, debe emplearse un arreglo en ciclo para el sellado, lo cual facilitará su remoción. La figura 3.5 muestra este arreglo.

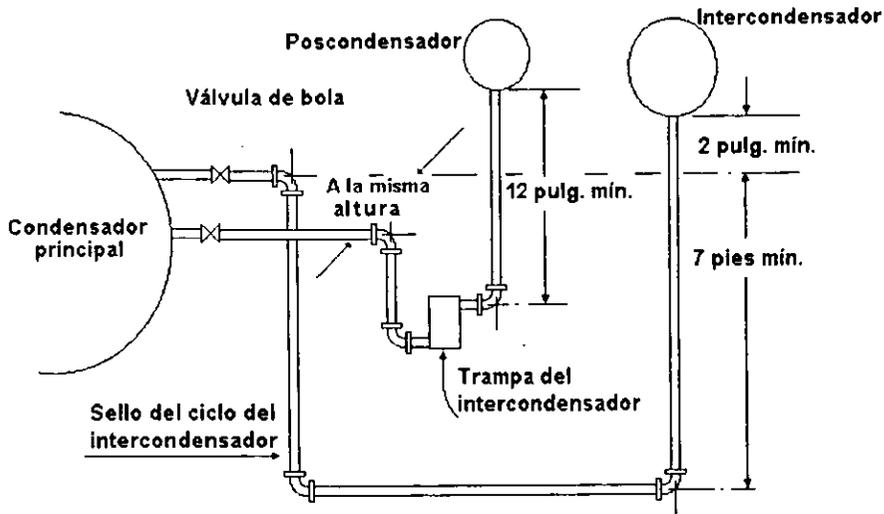


Fig.3.5.-Arreglo de un ciclo de sellado.

3.6.- Pozo caliente (Hot well)

La figura 3.6 muestra detalles del sistema del diseño del pozo caliente. Únicamente es necesario proveer suficiente agua de almacenamiento en el pozo caliente de los fondos de la pierna al nivel normal del agua, para llenar toda la pierna durante el arranque, cuando el agua no este fluyendo a través del condensador. Una vez que la cantidad de agua requerida sea determinada, el pozo caliente puede ser construido con las dimensiones convenientes para esta cantidad de agua. Un pozo caliente poco profundo requiere de lados altos para contener derrames y el oleaje debido a la descarga del agua de la pierna.

En climas fríos, se debe prever la congelación del agua durante periodos de paro. Esto puede evitarse suministrando calor o drenando el pozo caliente cuando no sea usado.

3.7.- Tubería de vacío

Una válvula en la línea de vacío entre el proceso y el eyector es de gran utilidad. Esta válvula permite la operación del eyector independiente del sistema para comprobar su funcionamiento, así como para verificar la cantidad de aire infiltrado a través del sistema. Se deberá instalar un medidor de vacío en la succión de la primera etapa, así como uno a la entrada del sistema. Esto permite la revisión independiente del sistema de eyectores.

La tubería del eyector normalmente debe ser igual en diámetro a las conexiones de la primera etapa. Cuando la tubería es más pequeña que la succión del eyector, se incrementa la caída de presión, lo cual podría causar serias pérdidas en la capacidad de vacío, debido a un mal dimensionamiento de la tubería.

Si fuera necesario colocar bridas en dicha tubería; deberán emplearse empaques siempre y cuando la presión absoluta sea mayor de 0.1 mmHg. Cuando la presión absoluta es menor a esta, se deberán usar anillos "O" porque la entrada de aire en este rango de presión es más alta. Debe de instalarse una conexión de drene para los materiales condensados en la línea, en todos los puntos bajos de la tubería a vacío, antes del arranque. Este drene puede ser cerrado por un tapón, brida o una buena válvula de vacío.

3.8.- Prueba de la capacidad en campo

Junto con la válvula de la línea de vacío entre el proceso y los eyectores, se deberán tomar provisiones para la instalación de una unidad de orificio en la misma línea de vacío, para facilitar las pruebas en campo. Ésta debe instalarse adecuadamente, de tal manera que permita medir el flujo de aire que maneja el sistema de eyectores. Teniendo estas facilidades en el campo se simplificará la supervisión del equipo en el caso de que ocurran problemas en la operación. También este arreglo deberá ser usado para hacer revisiones rutinarias de mantenimiento.

La mejor manera de evitar problemas en la operación del eyector es instalarlo correctamente. Observando estas sugerencias la posibilidad de tener problemas en operación se reduce sensiblemente.

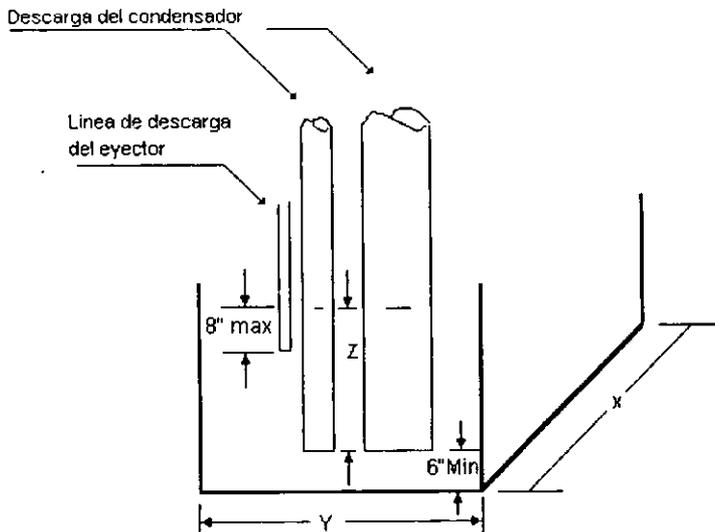


Fig. 3.6.-Diseño de pozo caliente.

El producto de XYZ puede ser igual o más grande que el volumen de los 34 pies o la suma de todos los drenes que entran al pozo caliente.

3.9.-OPERACIÓN DEL EQUIPO EYECTOR

El objetivo de esta parte, es dar al encargado del proyecto una idea de como operar el equipo eyector, debido a que el manual de operación que acompaña al equipo que describe los procedimientos para esta actividad, es frecuente que no este disponible a la hora del diseño.

3.9.1.-Suministro de vapor

El vapor para el eyector deberá estar limpio, libre de humedad, sobrecalentado, si el diseño del eyector así lo requiere, y una presión ligeramente arriba de la presión de diseño. Conectar la línea de suministro de vapor por arriba del cabezal. Dimensionar la línea de vapor cuidadosamente para minimizar las pérdidas de calor para evitar una caída de presión considerable. Para suministrar vapor seco, frecuentemente, es necesario adicionar un separador de vapor que tenga una buena trampa termostática con un mantenimiento apropiado.

Se prefieren arreglos cortos, se necesita aislar la línea desde el separador a la boquilla de vapor. Evitar las líneas largas y horizontales donde el condensado pueda estancarse y obstruya la boquilla. Un 2% de humedad presente en el vapor aumenta la erosión en la boquilla y en el difusor, lo cual puede reducir el funcionamiento. Para eyectores diseñados para operar a presiones menores a 5 mmHg abs, la porción de la entrada al difusor puede encaquetarse con vapor, y puede también requerirse un encaquetamiento con vapor en la boquilla. Alternativamente, el suministro de vapor en la(s) primera(s) etapa(s) puede ser sobrecalentado. Si se usa un sobrecalentador eléctrico, debe tenerse en consideración su protección automática contra quemadura cuando el flujo de vapor motriz sea suspendido.

La línea de suministro de vapor deberá contener un manómetro de cola de cochino para tener una presión de vapor confiable, una coladera en la línea para minimizar la obstrucción de la trampa y la boquilla con incrustaciones, una válvula sobre la coladera, una válvula de corte en cada etapa y una coladera en cada etapa posterior. Todo esto para minimizar la frecuencia de fallas en la boquilla. Como práctica estándar, muchos fabricantes incluyen una coladera de vapor como parte integral de la caja de vapor en las etapas que tienen una boquilla pequeña.

3.9.2.-Seguridad

Las líneas de vapor deberán estar aisladas por seguridad, así como para prevenir la humedad excesiva en el vapor motriz. Aunque no es necesario aislar las etapas por razones de funcionamiento, es deseable aislarlas para asegurar estas porciones del eyector, las cuales están a altas temperaturas. Es difícil generalizar que regiones serán calientes.

Debido a que los eyectores normalmente operan a presiones subatmosféricas, se prueban hidrostáticamente a solo 20 psig. Sin embargo, una porción del sistema eyector, la cual incluye las boquillas de vapor, puede ser aislada para someterse a la presión completa del vapor. Si es necesario, usar válvulas aisladas, las cuales pueden cerrarse para crear este riesgo intencionalmente. Deben instalarse las válvulas de relevo del tamaño apropiado como se recomienda en los estándares HEI.

3.9.3.-Tubería de descarga

El sistema de tubería de descarga no deberá imponer una alta contrapresión sobre la última etapa. El mejor arreglo de la tubería es descargar la última etapa horizontalmente o hacia abajo al aire (a la atmósfera). Si alguna porción de la descarga debe ser dirigida hacia arriba, debe haber un punto bajo en la tubería, con un drene para evitar la acumulación de agua o que ésta se infiltre hacia el eyector.

Para prevenir flujo de aire al revés, es decir hacia el sistema de proceso, para una caída de presión oscilante puede colocarse una válvula Check en la sección horizontal de la línea de descarga. Esto protegerá al sistema en caso de una falla en el suministro de vapor. Otro método de prevención de flujo al revés, es sumergir la línea de descarga en un pozo caliente (hot well), cuidando que la caída de presión en la línea más la inmersión en el pozo caliente, no exceda la contrapresión de diseño de la última etapa. El ruido irritante de la descarga de la última etapa puede eliminarse adicionando un silenciador en el escape o un poscondensador, o descargando la última etapa dentro de un pozo caliente.

3.9.4.-Drene de condensado y pozo caliente (hot well)

El método más infalible de remoción de condensado en un condensador es colocar el condensador al menos a 34 ft por arriba del nivel del agua del pozo caliente y drenarlo hacia el pozo caliente a través de la pierna barométrica. Aunque lo mejor es llevar cada línea de condensado por separado hacia el pozo caliente, a veces buscando alguna reducción en el costo de la instalación de la tubería, ocasionalmente, pueden combinarse dos o más líneas de condensado. Cuando un eyector no puede ser ubicado directamente sobre su pozo caliente, es importante evitar arreglos de tubería que puedan producir vapor en las líneas de drenado de condensado. Esto puede lograrse por la instalación de líneas laterales a una inclinación más alta que la caída de presión en pies de líquido por pie de tramo horizontal. Cuando se forman bolsas de vapor deberán ser venteadas más adelante en el condensador.

Los pozos calientes (hot well) deberán ser dimensionados para retener la suficiente cantidad de agua para llenar todas las líneas de condensado conectadas a una altura de 34 ft. Cuando sea posible, un pozo caliente, deberá tener una tapa abierta para facilitar la inspección de su interior. Usualmente la velocidad de corrosión más grande ocurre en la superficie del agua. De acuerdo con esto, una sección corta de tubería resistente a la corrosión puede usarse en el fondo de cada pierna barométrica donde esta pasa a través de la interfase agua-aire. Sin embargo, si las líneas de condensado entran por un lado del pozo caliente; es decir, por abajo de la superficie del agua, pueden usarse materiales estándar. Ocasionalmente, el condensado contiene productos valiosos que serán bombeados a un sistema de recuperación. Si el producto es inmiscible en agua, un pozo caliente, puede ser diseñado para servir como decantador, además de su función normal.

Si un pozo caliente recibe condensado de más de un eyector, es conveniente llevar las líneas de condensado desde cada eyector al pozo caliente por separado. O bien, si las líneas tienen que conectarse y el sistema se incrementa hasta la presión atmosférica o más allá, aire o gas de éste sistema puede bloquear la operación del sistema y alterar su operación.

3.9.5.-Orientación del equipo

Generalmente es aceptable alguna orientación de la etapa de un eyector, quizá la mejor es descargar hacia abajo. En esta posición, la etapa drenará libremente y los líquidos no pueden colectarse durante un paro. Es deseable agregar una conexión de drene en algún punto bajo para remover líquidos durante los arranques rápidos del equipo. Ocasionalmente, un trastorno o un error de diseño en el sistema de proceso hará que el líquido sea arrastrado y se extienda dentro del eyector, donde esto conduce a la sobrecarga del eyector. Aunque una mejor solución es corregir el desperfecto desde su origen, y/o usar un separador de arrastre, es prudente que la cámara de succión de la primer etapa para evitar acumulación de condensados y por lo tanto una mala operación.

Si se usa un enchaquetado sobre un difusor o en una boquilla de una o más etapas, la ubicación del drene de condensado de la chaqueta, puede influir en el plano de éstas etapas.

Cada etapa deberá ser ubicada de modo que permita el acceso a las boquillas de vapor para su inspección. Normalmente es aconsejable agregar un codo entre la descarga del eyector y la subsecuente etapa o condensador para evitar la erosión de partes críticas por gotas de agua a alta velocidad presentes en la corriente gaseosa de la descarga.

Debe tenerse cuidado de no hacer un esfuerzo significativo sobre la tubería de cada etapa, particularmente las que no son de material metálico. Cuando se hacen de hierro fundido o acero, los puntos típicamente débiles son la garganta angosta del difusor. Un esfuerzo excesivo en la tubería puede romper o curvar al difusor en ese punto.

3.9.6.-Prueba y corrección de desperfectos

Es prudente instalar una válvula de aislamiento entre el sistema de proceso y la primera etapa. Colocar un indicador de presión compuesto de un cojinete y una conexión atornillada de una pulgada de diámetro para pruebas en la tubería de succión, entre la válvula de aislamiento y el eyector. Una unión de una pulgada, es un tamaño conveniente para aceptar un medidor comercial de flujo crítico para aire, diseñado para medir cargas de aire de hasta 127 lb/h.

Un método alternativo de tener una carga medida de aire para pruebas rápidas del eyector es instalar un orificio para el aire en cada eyector. El orificio deberá ser dimensionado de manera que pueda entregar una carga de aire ligeramente menor que

la capacidad de diseño del eyector. Periódicamente, esta carga de aire, debe ser aplicada al eyector y debe observarse la presión de succión y las presiones interetapa para anticipar, cuando se haga necesario, la limpieza o reemplazo de las partes debido a fallas o desgaste. Cada etapa deberá ser revisada sin carga y con una carga de prueba de aire seco. La ecuación siguiente puede usarse para determinar el tamaño aproximado de una entrada suavemente redondeada de un orificio para medir un flujo crítico desde 4 a 150 Lb/h. Para información precisa consultar los estándares del código HEI.

$$W_a = 940 \left(\frac{P_a}{762} \right) \left(\frac{460 + 70}{460 + T_a} \right)^{1/2} D^2 \quad (3.1)$$

Donde W_a es flujo de aire (o equivalente de aire), en lb/h; P_a es la presión atmosférica, T_a es la temperatura atmosférica en °F y D es el diámetro del orificio en pulgadas.

Deberá haber un orificio disponible para la medición de la presión en la cámara de succión o en la tubería de succión de cada etapa. Pequeñas válvulas poco costosas pueden ser atornilladas en estos orificios, de manera que puedan hacerse observaciones de la presión de manera rápida y conveniente, y sin tener que interrumpir la operación del eyector.

Termómetros instalados en las líneas de agua de enfriamiento para y desde los intercondensadores son útiles en la detección de fallas y ajuste del flujo de agua para mejor ahorro y operación del sistema. Se debe estar seguro de que el sistema pueda ser hidrostáticamente probado para corroborar las infiltraciones.

3.9.7.-Ensamble del eyector

Los componentes de un eyector multietapa deben ser ensamblados en la secuencia correcta, ayudándose del número de placas y los números seriales de las boquillas, difusores y demás. Si las etapas del eyector están desensambladas, estas deberán reensamblarse, muy cuidadosamente usando los espesores adecuados de los empaques sobre la boquilla de vapor de la etapa pequeña. Ocasionalmente, dos o más etapas de un eyector pueden tener idénticas dimensiones externas además de dimensiones internas muy similares. En estas circunstancias, debe tenerse un cuidado particular para evitar el intercambio de las etapas o las boquillas para vapor.

3.9.8.-Corrección de fallas

Una práctica valiosa es la de probar brevemente el funcionamiento de un eyector antes de su arranque, para detectar y corregir dificultades causadas por una instalación inapropiada, error de ensamble o falla en el diseño del eyector. Si el eyector tiene intercondensadores del tipo de superficie, debe llenarse el pozo caliente con agua para un arranque rápido. Y enseguida volver a la última etapa y medir la presión absoluta, con la última etapa sin carga, y luego con carga de aire, lo más alejado posible de la presión de diseño. En seguida, repetir la prueba para las últimas etapas, midiendo la presión de la siguiente a la última etapa. Continuar de manera similar con las demás etapas. La última etapa puede ser inestable a una pequeña carga de aire. Si esto es así, la presión fluctuará y puede entrar agua a la carátula del medidor de presión. Una trampa de agua es útil para proteger la carátula del medidor de presión. Una pierna barométrica de mercurio evacuada es útil para medir la presión absoluta en campo a aproximadamente 5 mmHg abs. Para mayor información consultar los estándares de HEI para métodos de medición de presiones bajas. Al realizar la medición de presiones es importante eliminar las infiltraciones en el sistema de medición de la presión. Si se tiene una válvula de aislamiento entre la carátula del medidor de presión y el eyector, la válvula deberá estar abierta, entonces cerrarla para ver si hay o no infiltración en el sistema de medición de la presión causado por el incremento de la presión a una razón excesiva. Debe tenerse cuidado de que no se colecte líquido en el tubo. Si la presión sin carga y con carga de aire a presión de diseño de cada etapa duplica aproximadamente las curvas de prueba del fabricante, entonces la instalación del eyector probablemente es correcta.

Si la curva de operación para la última etapa no esta disponible, usar un medidor de aire y una carátula para medir la presión para obtener su curva de operación para estimar la infiltración de aire en el sistema durante la operación.

Si el eyector no opera apropiadamente, empezar localizando las fallas en la última etapa y trabajar hacia adelante, componente por componente. La revisión rápida de la operación de cada etapa es a través de su presión de succión sin carga. La causa más común de fallas en el eyector es un inadecuado suministro de vapor. Revisar por baja presión de vapor, humedad de vapor, y por boquillas de vapor parcial o completamente obstruidos con incrustaciones o lodo. Pudiendo deberse, también, a la fractura de alguna válvula de vapor.

Si la falla no se encuentra por simple observación, puede desconectarse la línea para descargar la última etapa a la atmósfera, y ver si con esto se repara la falla.

La erosión o falla de la boquilla o difusor puede ser el desperfecto. La erosión por vapor húmedo produce rayaduras longitudinales. La entrada erosionada de un difusor puede aparecer como si esta hubiera sido pinchado con un picahielo. Las boquillas y difusores erosionados deberán ser reemplazados. Si la erosión en la boquilla y el difusor ha producido un alargamiento razonablemente uniforme de cada uno, pueden hacerse mediciones para determinar el incremento en el área de la garganta de la boquilla y en el

difusor. El incremento en el área de la garganta de la boquilla debería ser proporcionalmente igual o más grande que el incremento en el área de la garganta del difusor para mantener la operación apropiada. Boquilla y difusores de repuesto deberán ser ordenados si el incremento en el área es más grande que el 5%.

Si el desperfecto no puede ser localizado, y la presión de descarga actual es menor que la presión de descarga de diseño. Y si el eyector es limpiado y apropiadamente ensamblado, y el suministro de vapor es adecuado y no hay infiltración de aire o infiltración de vapor (en la boquilla), consultar con el fabricante para escuchar sus sugerencias o ayuda.

Si ocurren fallas de vacío durante la operación de un sistema de proceso, medir la presión absoluta en dicho sistema y en la succión del eyector para determinar si alguna obstrucción en la línea de conexión de vapor esta produciendo una alta caída de presión. Si la caída de presión es razonable, observar la presión de succión en todas las etapas, la temperatura en la entrada y salida del agua de enfriamiento y la presión del vapor. Enseguida, con un indicador de presión absoluta en la primera etapa, cerrar brevemente la válvula de aislamiento para determinar la presión sin carga. Si la presión sin carga duplica aproximadamente la curva de prueba del fabricante, el eyector está probablemente operando correctamente y habrá que referirse a los datos de operación y curvas para analizar la carga del vapor. Si alguna de las presiones interetapa está alrededor de su valor de diseño, todas las etapas precedentes pueden llegar a ser inestables. La presión de la etapa siguiente al último intercondensador es una indicación de la carga no condensable saturada de ésta etapa. Si la presión de la última etapa esta a su valor de diseño y el flujo desde la línea de venteo de un poscondensador indica un alto flujo no condensable, está indicando una infiltración y habrá que revisar las infiltraciones posibles hacia el sistema. Si el postcondensador es del tipo de superficie y la pierna para el drenado del condensado esta sellada, una medida rápida del flujo de vapor no condensable puede determinarse colocando una bolsa de polietileno colapsada sobre la línea de venteo y observando la rapidez a la cual ésta se llena.

Si la presión a la succión de la segunda etapa esta en su valor de diseño o abajo, la primera etapa quizá esta operando de manera estable. Entonces su curva de operación indica la carga total de vapor correspondiente a la presión de succión observada. Las cantidades aproximadas de vapores condensables y no condensables determinados a partir de observaciones de la primer y última presión de succión, pueden ayudar a determinar la naturaleza del problema en el sistema de proceso; una falla o una sobrecarga en un condensador de proceso, altas temperaturas del agua de enfriamiento o del refrigerante, o un vapor el cual pasa a través del sistema de proceso pero condensa en el condensador.

Aunque la entrada del difusor en la última etapa normalmente está caliente al tacto, esta deberá estar más fría para etapas operando a presiones absolutas más bajas. Sin embargo, una etapa operando de manera inestable tendrá la cámara de succión y la entrada al difusor calientes. Esto puede dar una indicación cualitativa de las condiciones

de operación, y puede ayudar a identificar la etapa que esta originando los problemas.

Una infiltración de vapor en torno a la boquilla de vapor aparecerá como una carga falsa en esa y las siguientes etapas, hasta el próximo condensador. Usualmente, una infiltración producirá una raya bronceada o blanca o una ligera ranura sobre la superficie del metal. Si la presión en el sistema no es controlada en la operación normal (por ejemplo un vacío mayor), y la infiltración en la primer etapa, el síntoma de infiltración es un incremento en la presión de operación sobre un período de días. Si la infiltración ocurre en una etapa subsecuente, la primer indicación puede ser una súbita inestabilidad en la operación del eyector.

3.9.9.-Pruebas al sistema para revisar infiltraciones

La velocidad de infiltración de aire hacia el sistema de vacío puede determinarse reduciendo la presión del sistema a un valor menor a media atmósfera para establecer un flujo crítico de aire a través de todas las posibles rutas de infiltración, entonces aislar el sistema del eyector y observar la velocidad a la cual la presión absoluta se incrementa. La velocidad de infiltración de aire puede calcularse a partir de la ecuación 3.2. Esta velocidad de infiltración puede ser comparada con la carga de aire de diseño del eyector para ver si la infiltración esta dentro de las capacidades del eyector.

$$L_a = \frac{V (\Delta P)}{169 (\Delta t)} \quad (3.2)$$

Donde L_a es la velocidad de infiltración de aire en lb/h, V es el volumen del sistema (espacio vapor) en pies cúbicos, ΔP es el cambio de presión en mmHg, Δt es el intervalo de tiempo para una prueba de infiltración de aire, en min.

Un método alternativo es usar solo la última etapa y observar la presión de succión en esa etapa después de que la presión del sistema llegue a ser estable.

3.10.-SECUENCIA DE ARRANQUE DE UN SISTEMA EYECTOR

La siguiente es una secuencia de arranque de un sistema eyector, el cual puede cambiar dependiendo del sistema y del fabricante.

1.- Descargar todo el condensado en las líneas de vapor a través del drene de condensado, manteniendo la válvula de presión de operación cerrada, mantener el drene de condensado ligeramente abierto para asegurar que se arrastre algún condensado acumulado durante la operación. Esto no es necesario si se usa una trampa de vapor, ya que la trampa de vapor releva el condensado automáticamente.

2.- Abrir la válvula de presión de operación. Ajustar la válvula o las válvulas de regulación de vapor hasta que la presión sea igual o ligeramente por arriba de la presión de diseño.

3.- Abrir la válvula de la línea de vapor.

4.- Cuando se haga el paro del sistema de vacío, siempre cerrar la válvula de la línea de vapor antes de cerrar la válvula de presión de operación de vapor. Esto es para evitar alguna descarga de vapor hacia la línea de vacío, con lo que se contaminaría el proceso.

Cuando se tiene un sistema de más de una etapa, es muy similar al procedimiento anterior. Primero abrir el vapor de operación de la segunda etapa (vacío bajo) y luego abrir la inyección de agua en el intercondensador. Entonces se abre el vapor en la primera etapa (alto vacío). Hasta alcanzar el nivel de vacío deseado.

Para detener el sistema, se realiza el proceso inverso.

3.11.-LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA

Hay dos tipos básicos de mal funcionamiento en un sistema eyector: los causados por influencia externa o el equipo y los causados por los eyectores o los condensadores mismos.

Problemas externos: Para localizar el origen de la falla pueden usarse los siguientes pasos

- a) Determinar si se ha hecho algún cambio en la carga.
- b) Determinar si la presión y la temperatura del vapor o el agua condensante han cambiado con respecto a las especificaciones del sistema.
- c) Determinar si hubo algún cambio reciente en el proceso, el cual puede haber alterado la velocidad de alimentación de vapores en el recipiente de proceso.
- d) Determinar si el problema se ha desarrollado gradualmente o repentinamente. Como regla general, una pérdida gradual de vacío se debe a cambios o deterioro del sistema de vacío, mientras que una pérdida repentina comúnmente se debe a un cambio en los servicios, un incremento en la contrapresión o infiltración en el sistema.
- e) Revisar el registro de las reparaciones recientes de dichas unidades y observar alguna modificación reciente.
- f) Revisar los registros de problemas previos.

Una vez que se han seguido estos pasos, y se ha determinado el flujo correcto, la presión del vapor y la temperatura del agua de enfriamiento son los adecuados y que la presión a la descarga de la etapa final no es excesiva, el siguiente paso es determinar si el problema operacional reside dentro del sistema eyector mismo.

Problemas internos: Para ubicar un problema de mal funcionamiento puede seguirse un procedimiento similar al anterior para revisar cada parte paso a paso. Primero, el eyector debe ser aislado por medio de una placa que se coloca en la succión del eyector de la primer etapa. Con todas las unidades operando mientras que la placa esta colocada, el eyector evacuará la camara de succión de la primer etapa a la mínima presión que el eyector es capaz de producir.

La siguiente presión de corte puede ser esperada (cada una es aproximada y puede variar con el sistema).

Eyector de etapa simple	50 mm Hg absolutos
Eyector de etapa doble	4 - 10 mm Hg abs.
Eyector de etapa triple	0.8 - 1.55 mm Hg abs.
Eyector de cuatro etapas	0.1 - 0.2 mm Hg abs.
Eyector de cinco etapas	0.01 - 0.02 mm Hg abs.
Eyector de seis etapas	0.001 - 0.003 mm Hg abs.

Si esta prueba indica que el eyector esta operando a su presión de corte aproximada, entonces puede asumirse que el eyector esta operando satisfactoriamente a lo largo de toda su curva de operación. Si el problema persiste sera necesario buscar el desperfecto más adelante del sistema.

Sin embargo, si la presión de corte esperada no es obtenida o es inestable, entónces el problema debe ser confinado al sistema eyector. Se recomienda una prueba hidrostática para probar la infiltración de aire. Debe tenerse cuidado, antes de llevar a cabo la prueba hay que determinar si el sistema esta diseñado para soportar una presión y peso extra del agua para llevar a cabo la prueba.

Si no puede usarse una prueba hidrostática, puede usarse una prueba de aire a baja presión, para ver si el sistema tiene infiltración, empleando aire presurizado a alrededor de 5 psig. Deben revisarse las especificaciones del sistema para asegurarse que el sistema va a operar a esa presión. Es importante reiterar que se debe estar seguro de que la unidad tolerará esa presión.

Durante la prueba, una solución jabonosa, puede aplicarse a todas las juntas, empaques de válvulas y los sitios potenciales de infiltración. Si hay algún sitio de infiltración la solución de jabón formará una burbuja sobre el sitio de infiltración.

Para sistemas operando bajo vacío puede emplearse otro método, que consiste en poner espuma para afeitar ordinaria sobre los posibles sitios de infiltración. La crema es succionada y de esa manera se hace patente el punto de infiltración.

Si las pruebas hidrostática, por aire o la de vacío no indican alguna infiltración el siguiente paso es revisar los internos de cada componente buscando daños o desgaste. Desmantelar el eyector y revisar los depósitos, incrustaciones, de partes internas y uso en la boquilla y el difusor.

Si el sistema usa eyectores multietapa empezar con la unidad de la etapa final. Revisar la rosca de la boquilla, algún indicio blanco o rayaduras indican infiltración de vapor a través de la rosca de la unión.

Remover los depósitos desde la cámara de succión y asegurarse de que no este fracturada, incrustada o corroída. Introducir una pequeña lámpara en el difusor para asegurarse de que este completamente libre de incrustaciones y no este picado, rayado o fracturado.

Después de que todas las etapas e intercondensadores han sido limpiadas, el diámetro de la garganta de las boquillas y difusores deben medirse tan exactamente como sea posible. Comparar estas medidas con las dimensiones originales suministradas por el fabricante, determinar el desgaste.

Si el diámetro es más grande que el especificado en el equipo original, calcular el área original y el área actual. Si el porcentaje en que se incremento el área es mayor al 7% la pieza debe ser reemplazada, ya sea que se trate de la boquilla o el difusor. Si este porcentaje es solo del 5% debe solicitarse de una vez la pieza ya que muy pronto se necesitará reemplazar.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE UN SISTEMA EYECTOR

4.1.-Generalidades sobre el cálculo de un eyector.

La finalidad de este capítulo es el determinar las cantidades del gasto de vapor y de agua de enfriamiento. Aquí se revisará un método general de cálculo. Las figuras empleadas en los cálculos se encuentran en el **APÉNDICE A**.

La capacidad total es la suma de las cantidades de flujo de vapores condensables y de gases no condensables en lb/h que entran en la succión del eyector y pueden consistir de lo siguiente:

- a) Infiltración de aire a través de uniones o juntas en el equipo que esta operando a vacío.
- b) Gases no condensables introducidos en el proceso, disueltos en la alimentación, producidos por reacción química, inyectados para purga, etc.
- c) Gases no condensables, usualmente aire, liberados en la inyección de agua en un condensador de contacto directo.
- d) Vapores condensables que saturan a los gases no condensables.

Generalmente es difícil evaluar la carga debida a no condensables en una forma exacta y debe recurrirse a experiencia previa con algún sistema similar al considerado.

Debe hacerse notar que un eyector con una capacidad de diseño más grande que la necesaria puede operarse mediante control de la presión de succión, presión y flujo de vapor motriz, mientras que un eyector con una capacidad deficiente puede requerir reemplazo de la unidad.

4.2.-Método general de cálculo del consumo de vapor motriz y agua de enfriamiento.

El siguiente método puede ser empleado para estimar los consumos totales de vapor y agua de enfriamiento para eyectores de una o varias etapas y del tipo condensante y no condensante:

4.2.1.-Cálculo el peso molecular promedio de la mezcla de no condensables y condensables.

$$PM = \frac{\text{Peso total de la mezcla}}{\text{Nº de moles totales de la mezcla}} \quad (4.1)$$

Peso total de la mezcla = Peso de condensables (hidrocarburos y agua), más el peso de incondensables (aire y otros)

Número de moles totales de la mezcla:

$$A = \frac{\text{Peso del aire}}{\text{Peso molecular del aire}} = \text{N}^\circ \text{ de moles de aire}$$

$$B = \frac{\text{Peso de hidrocarburos}}{\text{Peso molecular de hidrocarburos}} = \text{N}^\circ \text{ de moles de hidrocarburos}$$

$$C = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso molecular del agua}} = \text{N}^\circ \text{ de moles de agua}$$

Nº de moles totales de la mezcla = A + B + C

4.2.2.- Cálculo del aire seco equivalente, DAE.

El DAE puede obtenerse multiplicando la carga total por el factor de corrección F_{DAE} , éste factor puede obtenerse de la figura 4.1, en el apéndice A. Otros métodos de cálculo de DAE para varios tipos de carga se darán posteriormente en éste capítulo.

4.2.3.- Cálculo del porcentaje de no condensables, %NC.

$$\%NC = \frac{\text{Peso de no condensables}}{\text{Peso total de la mezcla (condensables e incondensables)}} \times 100 \quad (4.2)$$

4.2.4.- Tipo de eyector

Con la presión de succión y empleando la figura 4.2, se determina el número de etapas que debe tener el sistema eyector para tener el nivel de vacío requerido.

4.2.5.- Cálculo de la relación vapor/aire.

Las libras de vapor empleadas por cada libra de DAE pueden obtenerse con las figuras 4.3 y 4.4, para eyectores del tipo no condensante y del tipo condensante, respectivamente.

Las curvas anteriores se utilizan de la siguiente manera :

Con la presión de succión, % de no condensable y el número de etapas, se va a la curva

correspondiente y en el eje de la abscisa se lee directamente la relación vapor/aire (lb/h de vapor por cada lb/h de aire seco equivalente a 70 °F).

4.2.6.- Cálculo de la relación agua/aire

Se hace similarmente al paso (4.2.5), con la figura 4.4 y las curvas correspondientes.

4.2.7.- Cálculo de factores de corrección

El cálculo de factores de corrección para presiones de vapor motriz diferentes de 100 psig y temperatura del agua de enfriamiento diferente de 90°F (si el eyector es condensante).

Estos factores de corrección se obtienen a partir de la presión del vapor motriz y la temperatura del agua de enfriamiento en las figuras 4.5 y 4.6.

4.2.8.- Cálculo del consumo total de vapor

$$Lb/h \text{ totales de vapor} = DAE \times \frac{\text{vapor}}{\text{aire}} \times \text{factor de corrección} \quad (4.3)$$

El factor de corrección se toma de la figura 4.5.

4.2.9.- Cálculo del consumo total de agua, para eyector del tipo condensante

$$GPM \text{ totales de agua} = DAE \times \frac{\text{agua}}{\text{aire}} \times \text{factor de corrección} \quad (4.4)$$

Este factor de corrección se toma de la figura 4.6

Cabe mencionar que cuando se utiliza un condensador de superficie en lugar de uno del tipo barométrico, se deberá dar un 20% más de lo que se calcula en vapor y agua; además de que los estimados de vapor y agua son confiables en más menos 10% de error.

4.3.-Métodos para cálculo de lb/h de aire seco equivalente (DAE) dependiendo de la carga que maneje el eyector.

La carga equivalente para varios tipos de carga expresada en lb/h de aire seco equivalente (DAE) a 70 °F, puede determinarse con los siguientes métodos.

4.3.1.- Si la carga es solamente aire.

Corrija la carga por diferencia de temperatura, con el factor de corrección tomado de la figura 4.7.

$$W_a = \frac{\text{Flujo de aire}}{\text{factor}} \quad (4.5)$$

4.3.2.- Si la carga es solamente vapor de agua

- a) Determinar la cantidad de vapor de agua equivalente a 70 °F, empleando la figura 4.7.
- b) Determinar el DAE a 70 °F (W_a), corrigiendo la cantidad de vapor equivalente por diferencia de pesos moleculares, empleando la figura 4.8.

4.3.3.- Si la carga es una mezcla de vapor de agua y aire

Las cantidades de DAE para cada componente deben ser calculados por separado, de acuerdo a los métodos dados en los incisos (4.3.1) y (4.3.2), y sumadas para determinar el DAE total.

Para simplificar estos cálculos, puede emplearse la figura 4.9.

4.3.4.- Si la carga es una mezcla de gases, la cual no incluye vapor de agua

- a) Determinar el peso molecular promedio de la mezcla
- b) Determinar la cantidad de aire equivalente, corrigiendo la cantidad de mezcla por diferencia de peso molecular, empleando la figura 4.8.
- c) Corregir la cantidad de aire equivalente por diferencia de temperatura, empleando la figura 4.7.

4.3.5.- Si la carga es una mezcla de gases y vapor de agua

El DAE a 70 °F de cada componente es calculado como se indica en los incisos (4.3.2) y (4.3.3), y el DAE a 70 °F total (Wa) es calculado sumando el DAE a 70 °F de cada componente.

4.3.6.- Si la carga es una mezcla de gases saturados con vapor de agua o de proceso:

a) Calcule el peso molecular de la mezcla

En este caso es necesario conocer la cantidad de vapor que satura a los gases y puede ser determinada con la siguiente ecuación:

$$W_v = \frac{W_n M_v P_v}{M_n P_n} \quad (4.6)$$

Donde:

Wv = Vapores que saturan a los incondensables, lb/h.

Mv = Peso molecular promedio de los vapores

Wn = Lb/hr de incondensables

Pv = Presión parcial de los vapores, mm de Hg abs.

Pn = Presión parcial de los incondensables

Mn = Peso molecular promedio de incondensables

El peso molecular promedio de la mezcla se determina con cualquiera de los métodos vistos en el inciso (4.3.4).

b) Determine el Aire Equivalente, corrigiendo el flujo total (Wt = Mv + Wn) por diferencia de peso molecular, con la figura 4.8.

c) Corregir el Aire Equivalente por diferencia de temperaturas con la figura 4.7.

4.3.7.- Si la carga es aire Saturado con vapor de agua:

El DAE a 70 °F se determina como en el inciso (4.3.3), pero la cantidad de vapor de agua que satura al aire se obtiene de las figuras 4.10, 4.11, 4.12, o 4.13.

4.4.- Métodos de cálculo de consumo de vapor para casos particulares

4.4.1.- Consumo de vapor de un eyector de etapa individual

Para calcular el consumo de vapor de un eyector de etapa individual puede emplearse la siguiente ecuación:

$$W_{slm} = Ra F Wa \quad (4.7)$$

El consumo unitario (Ra) puede obtenerse de la tabla 4.1, para presión del vapor de 100 psig; para presiones diferentes de 100 psig debe corregirse el consumo de vapor con el factor F, el cual puede determinarse con la figura 4.14.

Tabla 4.1
Requerimientos de vapor para eyectores de etapa individual

Presión de succión (Pulg. de Hg abs.)	Lb vapor motriz a 100 °F por lb de aire equivalente a 70°F
4	6.9
5	4.9
6	3.7
7	3.0
8	2.6
9	2.3
10	2.0
12	1.6

4.4.2.- Consumo de vapor de un eyector de una etapa con presión de succión entre 3 y 10 pulgadas de Hg abs.

Para calcular el consumo de vapor de un eyector de una etapa con presión de succión entre 3 - 10 pulg. de Hg. abs, puede emplearse la figura 4.15.

En esta gráfica puede leerse directamente el consumo total de vapor a partir de la capacidad total en lb de mezcla por hora y de la presión de succión, para una presión del vapor motriz de 90 psig. Si la presión de vapor motriz es diferente de 90 psig, es necesario multiplicar el consumo de vapor obtenido de la figura 4.15 por el factor de corrección F, para obtener el consumo real. Este factor F, se obtiene de la figura 4.16.

4.5.-Consumo de vapor para un eyector de dos etapas del tipo condensante entre 15 y 100 mm de Hg abs.

El consumo de vapor para un eyector de 2 etapas del tipo condensante aire-vapor que opera entre 15 y 100 mm de Hg y que succiona aire, vapor de agua o una mezcla de los dos, puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$W_s/W = \frac{(P_s)^{0.6}}{49} \left[\frac{(P_s - 0.38P_w)}{(P_s - P_w)} \right]^{0.52} \quad (4.8)$$

W_s = Cantidad de fluido arrastrado

W = Cantidad de vapor motriz empleado, mismas unidades que W_s .

P_s = Presión de succión, mm de Hg abs.

P_w = Presión parcial del vapor de agua en el fluido a la succión.

Si el fluido a evacuar es un no condensable diferente del aire, la ecuación puede ser empleada si se calcula la carga equivalente (DAE), pero si el fluido condensable es diferente del agua, la ecuación no es aplicable. Cuando se tiene una presión del vapor motriz diferente de 100 psig, se recomienda corregir el consumo total de vapor mediante el factor de corrección obtenido de la figura 4.5.

4.6.-Consumo de vapor de un sistema de dos etapas del tipo no condensante y con presión de succión entre 0.6 a 3.0 pulgadas de Hg abs.

Para calcular el consumo de vapor de un sistema de dos etapas del tipo no condensante y con presión de succión entre 0.6 - 3 pulgadas de Hg abs; puede emplearse la figura 4.17, procediendo en la misma forma que para el inciso (4.4.2). El factor de corrección puede obtenerse de la figura 4.18.

4.7.-Consumo de vapor para dos etapas con un intercondensador barométrico.

Para un sistema con dos etapas con un intercondensador barométrico, el consumo de vapor se obtiene de la siguiente ecuación:

$$W_{sm} = W's W_m K F \quad (4.9)$$

W_{sm} = Consumo total de vapor, lb/h.

$W's$ = Libra de vapor por libra de mezcla, de la figura 4.19.

W_m = Lb/h de mezcla totales

- K = Factor de corrección para cantidad de gases no condensables en la mezcla, figura 4.20.
 F = Factor de corrección para una presión del vapor motriz diferente de 90 psig. figura 4.21.

El consumo total de Wsm también debe corregirse si la temperatura del agua de enfriamiento es diferente de 85 °F, haciendo uso de la figura 4.22.

La figura 4.23 sirve únicamente para determinar el diámetro aproximado de las conexiones de succión y descarga del eyector, ésto de ninguna manera influye en la cantidad de vapor consumido.

4.8.- Consumo de vapor para un eyector de 2 y 3 etapas condensantes

Para un eyector de dos etapas condensante, se emplea la figura 4.25 para obtener el consumo de vapor unitario y la figura 4.26 para obtener los factores de corrección, por la diferencia de temperatura.

Para un eyector de tres etapas condensante, se emplea la figura 4.27 para obtener el consumo de vapor unitario y la figura 4.28 para obtener los factores de corrección, por diferencia de temperatura. Para una presión motriz diferente de 100 psig, el factor de corrección puede obtenerse de la figura 4.28, para ambos casos.

4.9.-Consumo de vapor para eyectores de una o varias etapas tipo no condensante.

Para calcular el consumo de vapor de eyectores del tipo no condensante de una o varias etapas, puede hacerse uso de la siguiente ecuación:

$$W_{slm} = R_a M_p W_a \quad (4.10)$$

R_a = Consumo de vapor unitario, lb de vapor por lb de carga equivalente, figura 4.29.
 M_p = Factor de corrección para presiones de vapor motriz diferentes de 100 psig, fig 4.29.
 W_a = Carga total expresada en lb/h de aire seco equivalente (DAE), a 70 °F

Si el eyector descarga a una psig, aumentar el 10 % al consumo original obtenido. Si se desea que el eyector sea estable a carga cero, aumente el 10 % al consumo original obtenido.

El consumo unitario R_a y el factor de corrección M_p pueden obtenerse de la figura 4.29 a partir del número de etapas y de la presión de succión (para eyectores del tipo no condensante). La carga equivalente (W_a), se obtiene de los métodos dados en el punto 4.3 de éste capítulo.

4.10.-Consumo de vapor para una o varias etapas.

El siguiente método puede ser empleado para calcular el consumo de vapor de cada etapa de la mayoría de los sistemas, ya sean del tipo condensante o no condensante o de una o varias etapas.

El consumo de vapor debe obtenerse de etapa en etapa, de la siguiente forma:

Con la presión de succión y la presión de descarga de la primera etapa, determine el consumo de unitario de ésta etapa, con ayuda de la figura 4.30. El consumo de la primera etapa estará dado por la ecuación:

$$W_{sm} = M_p R_a W_a \quad (4.11)$$

M_p es el factor de corrección para una presión del vapor motriz diferente de 100 psig y puede determinarse de la figura 4.29, R_a es el consumo unitario de vapor, determinado de la figura 4.29. W_a es la carga equivalente calculada con los métodos dados anteriormente.

Si el sistema no contiene un intercondensador después de la primera etapa, la carga que recibe la segunda etapa consistirá de la carga básica a la primera etapa, mas el vapor motriz de la primera etapa.

El consumo de vapor de la segunda etapa puede determinarse en la misma forma que para la primera, a partir de las presiones de succión y de descarga, haciendo uso de la figura 4.29 y de la ecuación anterior. Observe que ninguno de estos términos son iguales para la primera y segunda etapas, excepto M_p que será igual cuando la presión del vapor motriz empleado sea la misma para las dos etapas.

Si el sistema total consta de sólo estas dos etapas, sin intercondensador, el consumo total de vapor será la suma de los consumos para cada etapa.

El consumo de vapor total puede obtenerse alternativamente, en forma directa de la figura 4.30 y de la ecuación (4.11), obteniéndose el valor de R_a de las líneas para dos etapas en serie, sin intercondensadores, obteniendo M_p de la figura 4.29.

La carga que recibe una etapa colocada después de un condensador, será igual a la cantidad de gases incondensables que entran al condensador, más una cierta cantidad de vapores que saturan a los incondensables, a la temperatura de salida del condensador.

Si el diseño del condensador es deficiente, el eyector recibirá una carga mayor de la

deseada. En este punto debe corroborarse el diseño del condensador para determinar la carga que recibirá la etapa colocada a continuación de él.

El consumo de vapor de las etapas colocadas después de un intercondensador, será calculado en la misma forma que la descrita para la primer etapa, usando la figura 4.29, para determinar R_a y M_p , y calculando la carga equivalente a la carga total, con los métodos dados en el punto 4.3.

Este método requiere conocer las presiones de succión y de descarga de cada una de las etapas del sistema y estas pueden obtenerse de las cotizaciones de los fabricantes.

4.11.-Consumo de vapor para varios tipos de sistemas de eyectores.

La figura 4.31 presenta curvas para estimar el consumo de vapor de varios tipos de sistemas. Las curvas estan basadas en el uso de condensadores barométricos, una temperatura del agua de enfriamiento de 85 °F y una presión de vapor motriz de 100 psig.

Si la carga es aire o una mezcla aire-vapor de agua.

- Determine el % de aire presente en la mezcla y con este dato y la presión de succión, calcule el consumo unitario de de vapor de la figura 4.31. Para cantidades entre 10% y 100% de aire, el consumo unitario debe calcularse por proporción.
- Calcule el consumo total multiplicando el consumo unitario por las lb/h de aire presentes en la mezcla.

Si la carga consta de gases o vapores diferentes de aire y agua:

- Lea el consumo unitario de vapor con la curva de 100% de aire en la mezcla. Convierta la carga en si valor equivalente en DAE a 70 °F.
- Calcule el consumo total multiplicando el consumo unitario por la carga equivalente.

4.12.-Métodos para calcular los consumos de agua de enfriamiento.

4.12.1.-Consumo de agua de enfriamiento de un condensador.

Para un condensador barométrico o de superficie, la siguiente ecuación puede emplearse para determinar el consumo de agua de enfriamiento:

$$\text{GPM de agua de enfriamiento} = \frac{W_s L}{\Delta T_w 500} \quad (4.12)$$

Donde:

W_s = libras por hora de vapor que deben condensarse
 L = es el calor latente de vaporización del vapor (1000 BTU/Lb para aplicaciones de proceso y 950 BTU/Lb, para servicios de evacuación de vapor de turbinas).

ΔT_w = Incremento en la temperatura del agua de enfriamiento.

Este método es aplicable cuando la carga que recibe el condensador no tiene más del 1% de no condensables.

La diferencia terminal de temperatura (temperatura del vapor a la presión de operación menos la temperatura de salida del agua de enfriamiento) para condensadores barométricos es de 5°F y para condensadores de superficie es de 7.5°F. Estos valores sólo son aproximados. El valor exacto depende de la disponibilidad del agua de enfriamiento y de las características específicas del condensador usado.

4.12.2.-Consumo de agua de enfriamiento para un eyector de dos etapas con un intercondensador barométrico.

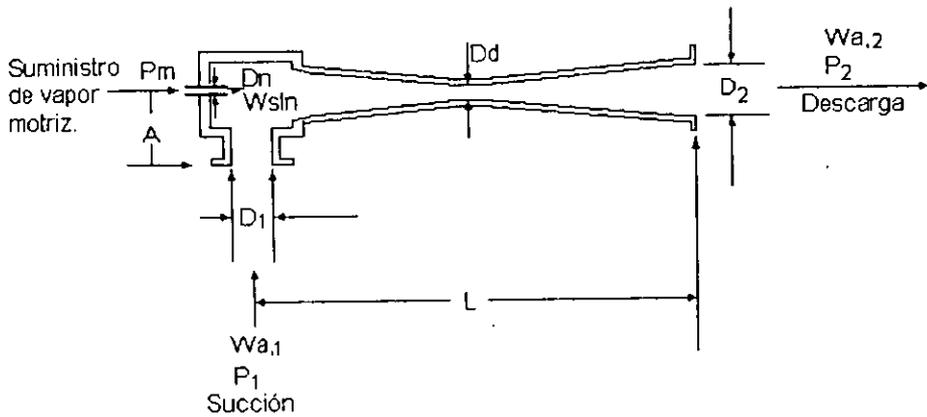
Para un eyector de dos etapas que usa un intercondensador barométrico, el consumo total de agua puede obtenerse aproximadamente con la siguiente ecuación:

$$GPM = 0.06 W_{sm} \quad (4.13)$$

Donde W_{sm} es el consumo total de vapor, calculado con el método dado en el punto 4.7; y GPM es el consumo del agua de enfriamiento aproximado en galones por minuto.

4.13.-Dimensionamiento preliminar del eyector

Para hacer una estimación de las dimensiones de un eyector pueden emplearse las siguientes ecuaciones.



$$D1 = 2 \left[\frac{W_{a,1}}{P1} \right]^{0.48} \quad (4.14)$$

$$D2 = \frac{3}{4} D1 \quad (4.15)$$

$$L = 9D1 \quad (4.16)$$

$$A = 2.5D1^3 \quad (4.17)$$

$$Dd = 0.94 \left[\frac{W_{a,2}}{P2} \right]^{0.5} \quad (4.18)$$

$$Dn = \sqrt{\frac{W_{sln}}{50 Pm^{0.96}}} \quad (4.19)$$

A continuación se da la nomenclatura correspondiente:

- Wa,1 = carga equivalente, DAE, a 70°F
- P1 = Presión de succión, en mm de Hg absolutos.
- D1 = Diámetro de la boquilla en la succión, en pulgadas
- D2 = Diámetro de la boquilla en la descarga, en pulgadas
- L = Longitud del eyector, en pulgadas
- A = Distancia del centro de la boquilla de vapor a la brida de succión, en pulgadas
- Dd = Diámetro de la garganta del difusor, en pulgadas
- Dn = Diámetro de descarga de la boquilla de vapor, en pulgadas.
- Wlsn = Consumo de vapor para la etapa considerada, en libras por hora
- Wa,2 = Cantidad de flujo de mezcla a la salida del eyector en Lb/h de DAE a 70°F
- P2 = Presión de descarga, en mm de Hg absolutos
- Pm = Presión de vapor motriz, en psia.

4.14.-Diseño estructural de los componentes de un eyector.

Los criterios de diseño de los componentes de un eyector son función de varias variables. El espesor mínimo requerido no sólo dependen del esfuerzo, sino que, también del espesor requerido por fabricación, soldado y/o fundido.

Para aplicaciones donde hay mezclas explosivas, los componentes pueden diseñarse para altas presiones. Para estas aplicaciones, los esfuerzos y presiones deben ser mutuamente corregidos por un factor de seguridad.

En muchos casos el eyector es una parte integral de un sistema, por ejemplo eyectores combinados con unidades condensantes. Por lo tanto, no es posible diseñar el eyector para una carga específica externa sin una revisión total del sistema.

En general, las cargas externas debidas a movimiento térmico y mecánico deben ser minimizadas por el comprador. Debe hacersele entender, al comprador, que el eyector no sirve como punto de apoyo para el sistema. Por ejemplo, fuerzas y momentos externos, los cuales causan desajustes en la boquilla y difusor del eyector pueden tener un efecto dañino sobre el funcionamiento del eyector. En casos donde ésto no es posible, las fuerzas y momentos sobre el eyector, deben revisarse y resolverse cada uno.

4.14.1.-Espesor de la cámara de succión y difusor

La cámara de succión y el difusor consisten de una sección cónica y una cilíndrica, ya sea sólo o en combinación. Las siguientes fórmulas son usadas para determinar el espesor requerido por presiones internas.

Sección cónica

$$t = \frac{PD}{2\cos\alpha(SE - 0.6P)} \quad ; \text{ para } \alpha \leq 30^\circ \quad (4.29)$$

Sección cilíndrica

$$t = \frac{PR_i}{SE - 0.6P} \quad \text{ó} \quad (4.21)$$

$$t = \frac{PR_o}{SE + 0.4P} \quad (4.22)$$

Donde :

t = Es el espesor requerido exclusivo de corrosión permitida, en pulgadas

P = Presión interna de diseño, en psi

D = Máximo diámetro interno del cono, medido perpendicularmente al eje longitudinal del cono, en pulgadas.

S = Esfuerzo permitido, en psi.

E = Eficiencia de soldadura. Para eficiencias permisibles, referirse a la Sección VIII, División I del Código ASME para recipientes a presión.

R_i = Radio interno del cilindro, en pulgadas.

R_o = Radio externo del cilindro, en pulgadas.

α = Mitad del ángulo del elemento cónico, en grados.

4.14.2.-Algunas consideraciones sobre el diseño

La presión de diseño para la cámara de succión y el difusor debe ser de 15 psig (presión interna), y vacío total, a menos que otra cosa se especifique.

El espesor de la cámara de succión y difusor debe revisarse por presión externa usando la Sección VIII, División I del Código ASME para recipientes a presión. El uso de hierro

fundido y otros materiales pueden requerir consideraciones especiales de diseño; por ejemplo el espesor de pared de una pieza puede estar dictada por las prácticas utilizadas en fundición, más que por un diseño estructural. Sin embargo, en ningún caso, el espesor, podrá ser menor que el requerido por el análisis de esfuerzos.

Como un método alternativo, al método analítico, antes descrito, el diseño de los componentes de un eyector puede ser confirmado por pruebas de presión y/o copiar un diseño que actualmente opera exitosamente. Para difusores donde se requiere aumentar el espesor de pared, puede aumentarse el diámetro externo y mantener el diámetro interno constante. Los materiales para construir la boquilla y la cámara de vapor deben seleccionarse para el intervalo de temperatura y presión sobre el cual van a ser operados.

CAPITULO 5

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA VACÍO PARA LA PLANTA PILOTO DE LA FES- ZARAGOZA

5.0.-Descripción del sistema actual

El sistema actual cuenta con dos tanques para vacío de 2.10m de altura entre tapas, diámetro de 1m, lo cual nos da un volumen de 1.65 m³. Cada tanque tiene una instalación por separado, con su bomba de vacío; además, entre ambas bombas se tiene otra de relevo. Cada bomba es accionada por un motor marca Remsa de 15 hp, 3515 rpm, 220/440 volts, 20/40 ampers, 60Hz y tres fases.

Estas bombas son alimentadas con agua de un tercer tanque; esta agua es la que se emplea como fluido motriz para arrastrar los gases desde los tanques para vacío, en los cuales logra una presión de unos 310 mmHg absolutos. Cuando la presión sube a unos 410 mmHg abs. automáticamente son accionadas las bombas para recuperar el nivel de vacío.

Uno de los tanques da servicio a los laboratorios de ciencia básica y el otro a la planta piloto de I.Q. El propósito de proponer un sistema alternativo; es decir, utilizar eyectores en lugar de bombas de vacío es alcanzar un nivel de vacío de 15 mmHg abs. para dar servicio a los laboratorios y principalmente a la planta piloto de ingeniería donde implementarán otro tipo de actividades de laboratorio, como filtración a vacío, operar un reactor a vacío, destilación a vacío etc.

El objetivo es utilizar la mayoría de equipo del sistema actual y ahora generar el vacío con vapor de agua a través de un sistema eyector. Ya hemos mencionado algunas de las ventajas de un sistema de eyectores para vacío, así que a continuación procederemos al cálculo de las cantidades de vapor, agua de enfriamiento y las dimensiones de cada etapa para alcanzar el nivel de vacío propuesto.

5.1.-Condiciones de operación y carga

De acuerdo a una encuesta realizada entre profesores del área de los laboratorios de ciencia básica y la planta piloto con respecto a las sustancias empleadas, así como las cantidades aproximadas las cuales nos dan los porcentajes presentados en la tabla 5. Las siguientes las condiciones para el sistema.

La presión de succión: 15 mmHg
La temperatura de succión: 20°C = 68°F
Flujo volumétrico: 8m³/h
Porcentaje de condensables: 13%
Porcentaje de no condensables: 87%
Carga de condensables: 1.04 m³ /h
carga de no condensables: 6.96 m³/h

Es necesario convertir los flujos volumétricos a flujos másicos para ello se requiere utilizar el volumen específico o la densidad de cada componente de la carga a las condiciones de operación. La carga se da en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Composición de la carga

Componente	%volumen	Q, m ³ /h	V, m ³ /kg	W, Kg/h
Acetona	1.01	0.070296	70.73	9.94X10 ⁻⁴
Benceno	1.01	0.070296	95.12	7.39X10 ⁻⁴
Cloruro de metilo	1.01	0.070296	61.52	1.143X10 ⁻³
Cloroformo	2.02	0.140592	145.42	9.668X10 ⁻⁴
Etanol	1.01	0.070296	56.12	1.253X10 ⁻³
Eter etílico	1.01	0.070296	90.27	7.787X10 ⁻⁴
Tetracloruro de carbono	1.01	0.070296	187.31	3.753X10 ⁻⁴
Tolueno	1.01	0.070296	216.67	3.244X10 ⁻⁴
Dicloroetano	2.02	0.140592	120.53	1.166X10 ⁻³
Xileno	1.01	0.070296	129.17	5.442X10 ⁻⁴
Carga de vapor de los solventes: $\Sigma W = 0.00906279 \text{ Kg/h}$				
Aire	87.87	6.115752	0.8262	7.4022Kg/h
Agua				1.3836Kg/h

Flujo másico de los solventes orgánicos: 0.00906279Kg/h (0.019962 Lb/h)

Flujo de aire: 7.4022Kg/h (16.32 Lb/h)

Agua: 1.3836Kg/h (3.0476 Lb/h)

5.2.-Cálculo del aire equivalente seco (DAE) a 70°C.

Dado que la carga incluye agua y una mezcla de gases, el DAE a 70°C se calcula por separado y luego se obtiene el total sumándolos.

DAE para el agua:

Corrección por diferencia de peso molecular:

Factor de corrección (de la figura:4.7) = 0.959

$$\text{DAE} = 1.3836 \text{ Kg/h} / 0.959 = 1.44 \text{ Kg/h} \text{ (3.172 Lb/h)}$$

Corrección por diferencia de temperatura.

Factor de corrección por diferencia de peso molecular (fig.4.8) = 0.82

$$\text{DAE} = 1.44 \text{ Kg/h} / 0.82 = 1.759 \text{ Kg/h} \text{ (3.874 Lb/h)}$$

DAE para el aire y la mezcla de solventes:

Primero se obtiene un peso molecular promedio multiplicando el porcentaje volumen de cada solvente con su peso molecular y haciendo la suma. Para este caso se obtienen 63.7 g/mol.

Corrección por diferencia de temperatura:

Factor de corrección (fig.4.7) = 0.959

$$\text{DAE} = 0.00906279 \text{ Kg/h} / 0.959 = 0.00945 \text{ Kg/h} \text{ (0.02082 Lb/h)}$$

Corrección por diferencia de peso molecular:

Factor de corrección (fig.4.8) = 1.44

$$\text{DAE} = 0.00945 \text{ Kg/h} / 1.44 = 0.00656 \text{ Kg/h} \text{ (0.0144 Lb/h)}$$

DAE para el aire

Corrección por diferencia de temperatura:

Factor de corrección (fig.4.7) = 0.959

$$\text{DAE} = 7.4022 \text{ Kg/h} / 0.959 = 7.71866 \text{ Kg/h} \text{ (17.002 Lb/h)}$$

DAE a 70°C total

$$\begin{aligned} \text{DAE a } 70^\circ\text{C total} &= \text{DAE del agua} + \text{DAE de solventes} + \text{DAE del aire} \\ &= 1.759 \text{ Kg/h} + 0.00656 \text{ Kg/h} + 7.71866 \text{ Kg/h} = 9.5 \text{ Kg/h} = 20.925 \text{ Lb/h} \end{aligned}$$

5.3.-Tipo de eyector

Utilizando la figura 4.2 y la presión de succión de 15 mmHg se encuentra que es útil un sistema de tres unidades y un intercondensador.

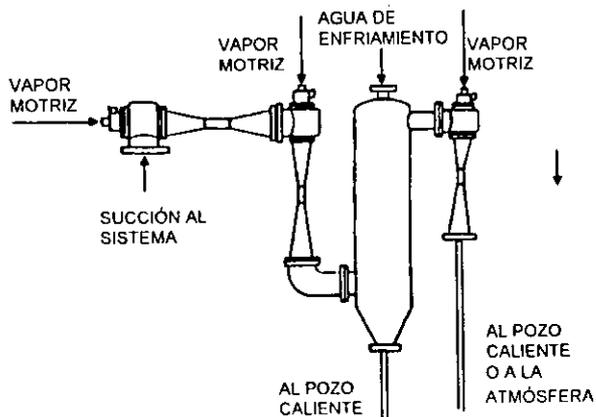


Fig.5.1.-Sistema de vacío propuesto para la planta piloto de la FES-ZARAGOZA

5.4.-Dimensionamiento de cada etapa del sistema

En esta parte se van a dar las dimensiones físicas de cada etapa, así como su consumos de vapor y el agua de enfriamiento en el intercondensador.

Etapa X

Carga = 20.20.925 Lb/h

Presión de succión = 15 mmHg

Diámetro de succión, D1

$$D1 = 2\left(\frac{20.925}{15}\right)^{0.48} = 2.3465 \text{ pulgadas}$$

Diámetro de descarga, D2

$$D2 = (3/4) \cdot 2.3465 = 1.7599 \text{ pulgadas}$$

Longitud del difusor, L

$$L = 9 \cdot 2.3465 = 21.1185 \text{ pulgadas}$$

Diámetro de garganta del difusor

Desafortunadamente no es tan sencillo calcular el diámetro de la garganta del difusor ya que este depende la la presión de descarga. La presión de descarga puede obtenerse proponiendo alguna razón de compresión, la presión esta dada en mm de Hg.

$$\text{Presión de descarga} = \text{Razón} \cdot \text{Presión de succión}$$

Una vez que se tiene la presión de descarga se emplea la figura 4.30 para encontrar las libras de vapor motriz por libra de aire seco equivalente (DAE). A la cantidad de vapor motriz así obtenida se le agrega un 20% más con un factor de sobrediseño.

$$\text{Consumo de vapor} = \frac{\text{Lb de vapor motriz}}{\text{Lb de aire eq.}} \cdot \text{Lb de carga de aire equivalente} \cdot 1.2 =$$

Las (Lb de vapor motriz/Lb de aire equivalente) se obtiene de la figura 4.30. El factor 1.2 es el 20% adicional de vapor motriz.

Con estos nuevos datos ya es posible calcular el diámetro de la garganta del difusor, el diámetro de la boquilla de vapor motriz.

Diámetro de garganta, Dd

$$Dd = 0.94 \left(\frac{Wa,2}{P2} \right)^{0.5}$$

Diámetro de boquilla de vapor motriz, Dn

$$Dn = \sqrt{\frac{Wlsn}{50Pm^{0.96}}}$$

Estas son las ecuaciones ya vistas en el capítulo anterior. Cabe aclarar que el consumo de vapor es necesario convertirlo a aire equivalente seco corrigiendo por diferencia de temperatura y por diferencia de peso molecular; el factor para corregir por diferencia de temperatura es de 0.959 (tomado de la figura 4.7) y el factor por el que hay que dividir para corregir por diferencia de peso molecular es de 0.82 (tomado de la figura 4.8). La siguiente tabla 5.2 resume los cálculos para distintas razones de compresión

Tabla 5.2.-Cálculo de consumo de vapor, diámetro de garganta y de boquilla.

Presión de succión mmHg	Razón	Presión de descarga mmHg	Consumo de vapor, en Lb/h	vapor como DAE Lb/h	Diámetro de garganta, pulgadas	Diámetro de boquilla, pulgadas.
15	2	30	$0.6 \times 20.925 \times 1.2 = 15.066$	19.12	1.08603	0.0634857
15	3	45	$0.95 \times 20.925 \times 1.2 = 23.85$	30.33	1.00325	0.0799591
15	3.5	52.5	$1.1 \times 20.925 \times 1.2 = 27.621$	35.13	0.97131	0.086054
15	4	60	$1.23 \times 20.925 \times 1.2 = 30.88$	39.27	0.94231	0.0909834
15	4.5	67.5	$1.4 \times 20.925 \times 1.2 = 35.154$	44.7	0.92685	0.0970701
15	5	75	$1.55 \times 20.959 \times 1.2 = 38.92$	49.49	0.91082	0.1021387

El símbolo (x) indica multiplicación.

Las presiones estan dadas en mmHg, el vapor como DAE son libras de aire equivalente y los diámetros estan dados en pulgadas.

Ahora, el reto consiste en hacer una evaluación y elegir la alternativa que nos convenga, debemos observar el consumo de vapor de modo que no sea tan excesivo y que, por ejemplo el diámetro de la boquilla de vapor motriz no sea demasiado pequeña, ya que puede presentar problemas tanto para su maquinado, con lo cual incrementaria su costo y por otro lado, en su operación.

En este caso hemos elegido la cuarta opción que presenta las características siguientes:

Consumo de vapor = 30.885 Lb/h

Presión de descarga = 60 mmHg

Diámetro de garganta del difusor = 0.94231 pulgadas = 23.934674 mm.

Diámetro de boquilla de vapor motriz = 0.09098343 pulgadas = 2.310979 mm

Podría haberse elegido una presión de descarga más alta pero eso implica un mayor consumo de vapor, y eso por supuesto implica un mayor costo de operación, o bien una presión de descarga menor, con la finalidad de economizar vapor, pero eso se refleja en el diámetro de la boquilla de vapor, que se reduciría, volviendose muy sensible a la calidad de vapor motriz empleado.

Etapa Y

Carga = Carga original + Vapor motriz convertido a DAE
= 20.925 Lb/h + 39.27 Lb/h = 60.195 Lb/h de aire equivalente seco.

Presión de descarga: Ya sabemos que es de 60 mmHg, sin embargo para asegurarnos de que no haya contraflujo y con ello pérdidas de vacío, se aplica un factor de sobrediseño y asumiremos que la primer etapa esta descargando a 50 mmHg.

Diámetro de succión:

$$D1 = 2 * \left(\frac{60.195}{50} \right)^{0.48} = 2.18632 \text{ pulgadas}$$

Diámetro de descarga:

$$D2 = (3/4) * 2.1863 = 1.639738 \text{ pulgadas}$$

Longitud del difusor:

$$L = 9 * 2.18632 = 19.676864 \text{ pulgadas}$$

Diámetro de garganta del difusor:

Una vez más vamos a seguir un procedimiento similar al seguido en la primer etapa. Los resultados se resumen en la tabla 5.3.

Tabla 5.3.-Cálculo del consumo de vapor diámetro de garganta y boquilla.

Presión de succión, mmHg	Razón	Presión de descarga mmHg	Consumo de vapor, Lb/h	Vapor como DAE, Lb/h	Diámetro de garganta, pulg.	Diámetro de boquilla, pulg.
50	2	100	$0.7 \times 60.195 \times 1.2 = 50.5638$	64.30	1.048827	0.116423
50	3	150	$1.1 \times 60.195 \times 1.2 = 79.4574$	101.04	0.974567	0.145941
50	3.5	175	$1.3 \times 60.195 \times 1.2 = 95.043$	120.86	0.956124	0.159615
50	4	200	$1.5 \times 60.195 \times 1.2 = 108.351$	137.78	0.935229	0.170422
50	4.5	225	$1.7 \times 60.195 \times 1.2 = 122.798$	156.15	0.921743	0.181427

En este caso elegimos la segunda opción en la cual se tiene un consumo de vapor no tan alto y un diámetro de garganta y boquilla no tan pequeños como para que presenten problemas de operación; a mayores razones de compresión el consumo de vapor se incrementa y los diámetros de garganta y boquilla empiezan a disminuir.

Características de la segunda etapa:

Consumo de vapor = 79.4574 Lb/h

Presión de descarga = 150 mmHg

Diámetro de garganta = 0.974567 pulg. = 24.7540 mm

Diámetro de boquilla = 0.145941 pulg. = 3.7069 mm

Intercondensador

Con la finalidad de disminuir la carga y con esto las dimensiones de la tercer etapa, se incluye un intercondensador para solo dejar pasar los no condensables más el vapor de agua que satura a los incondensables.

Condiciones a la entrada del intercondensador:

Carga:

Incondensables = 16.3 Lb/h de aire

Condensables = 123.3524 Lb/h de vapor de agua y vapores de solventes

Presión de descarga = 150 mmHg

Agua de enfriamiento (m):

$$C_p = 0.45 \text{ BTU/Lb}^\circ\text{F}$$

Temperatura a la entrada, $T_e = 15^\circ\text{C} = 59^\circ\text{F}$

Temperatura a la salida, $T_s = 25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$

Condiciones del vapor motriz:

Presión = 150 mmHg

Entalpia de vaporización a 150 mmHg, $\lambda = 964.42 \text{ BTU/Lb}$

Como los condensables, en su mayoría, son vapor de agua, podemos considerar solo el calor latente del agua:

$$(W\lambda)_{\text{vapor}} = mC_p(T_e - T_s)$$

$$m = \frac{(123.269 \text{ Lb/h})(964.42 \text{ BTU/Lb})}{(0.45 \text{ Lb/Lb}^\circ\text{F})(18^\circ\text{F})} = 14676.93 \text{ Lb/h de agua de enfriamiento}$$

$m = 29.354 \text{ GPM de agua de enfriamiento.}$

Etapa Z

Incondensables = 16.3 Lb/h de aire

Presión de succión = 150 mmHg

Vapor que satura a los incondensables a la salida del intercondensador, W_v

$$W_v = \frac{W_n M_n P_v}{M_n P_n}$$

$W_n = 16.3 \text{ Lb/h}$

$M_v =$ Peso molecular de los condensables, 18 Lb/Lb-mol

$M_n =$ Peso molecular de los incondensables, 29 Lb/Lb-mol

$P_v =$ Presión de vapor de los condensables a 59°F, 12.54 mmHg

$P_n =$ Presión parcial de los incondensables = $P_t - P_v = 150 - 12.54 = 137.46 \text{ mmHg}$

$$W_v = \frac{(16.3)(18)(12.54)}{(29)(137.46)} = 0.923 \text{ Lb/h}$$

Wv en DAE = 1.174 Lb/h como aire.

La carga de aire como DAE = $16.3/0.959 = 17\text{Lb/h}$

Carga = $1.174\text{ Lb/h} + 17\text{ Lb/h} = 18.174\text{ Lb/h}$

Diámetro de succión:

$$D1 = 2\left(\frac{18.174}{150}\right)^{0.48} = 0.7262 \text{ pulgadas}$$

Diámetro de descarga:

$$D2 = (3/4)(0.7262) = 0.54463 \text{ pulgadas}$$

Longitud del difusor:

$$L = 9(0.54463) = 6.5356 \text{ pulgadas}$$

Diámetro de garganta y boquilla:

Tabla 5.4.-Calculo del consumo de vapor y diámetros de garganta y boquilla.

Presión de succión, mmHg	Razón	Presión de descarga, mmHg	Consumo de vapor, en Lb/h	Vapor como DAE, Lb/h	Diámetro de garganta, en pulg.	Diámetro de boquilla, en pulg.
150	4	600	$2 \times 18.174 \times 1.2 = 43.62$	55.466	0.329313	0.108129
150	4.067	610	$2.1 \times 18.174 \times 1.2 = 45.8$	58.239	0.332695	0.110799
150	4.67	700	$3 \times 18.174 \times 1.2 = 65.43$	83.199	0.324857	0.117441
150	5.067	760	$3.3 \times 18.174 \times 1.2 = 71.9$	91.519	0.357117	0.138895
150	5.2	780	$3.4 \times 18.174 \times 1.2 = 74.2$	94.293	0.356938	0.125143

La última etapa puede descargar al pozo caliente (hot well) o a la atmósfera; en la Ciudad de México nos encontramos, en promedio, a 585 mmHg, por lo que una presión de descarga de 610 mmHg es adecuado. Podría preferirse una presión de descarga

mayor, sin embargo esto involucra un mayor consumo de vapor y además la presión de descarga elegida esta a 25 mmHg por encima de la presión de succión, lo cual es suficiente para asegurar una adecuada operación.

Las características de la tercer etapa son:

Presión de descarga = 610 mmHg

Consumo de vapor = 45.8 Lb/h

Diámetro de garganta del difusor = 0.332695 pulgadas = 8.4504mm

Diámetro de la boquilla de vapor motriz = 0.110799 pulgadas = 2.81424 mm

Consumo total de vapor = 30.885 Lb/h + 79.4574 Lb/h + 45.8 Lb/h = 156.1424 Lb/h

Tabla 5.5.-Resumen de las dimensiones de cada etapa

Etapa X	
Carga (DAE)	20.925 Lb/h
Presión de succión	0.29013 psi (15 mmHg)
Diámetro de succión	2.3465 in (59.601 mm)
Diámetro de boquilla de vapor	0.0909 in (2.3109 mm)
Diámetro de garganta del difusor	0.94231 in (23.9346 mm)
Diámetro de descarga del difusor	1.7599 in (44.7014 mm)
Longitud del difusor	21.1186 in (536.4124 mm)
Consumo de vapor	30.885 Lb/h
Presión de descarga	1.1605 psi (60 mmHg)
Etapa Y	
Carga (DAE)	60.195 Lb/h
Presión de succión	0.9671 psi (50 mmHg)
Diámetro de succión	2.1863 in (55.532 mm)
Diámetro de boquilla de vapor	0.1459 in (3.7069 mm)
Diámetro de garganta del difusor	0.9745 in (24.754 mm)

Continúa tabla 5.5

Diámetro de descarga del difusor	1.6397 in (41.6483 mm)
Longitud del difusor	19.6786 in (499.836mm)
Consumo de vapor	79.4574 Lb/h
Presión de descarga	2.9013 psi (150 mmHg)
Intercondensador	
Consumo de agua de enfriamiento	29.354 GPM
Temperatura de agua a la entrada	59°F (15°C)
Temperatura de agua a la salida	77°F (25°C)
Carga termica a retirar	118963.5 BTU/h
Etapas Z	
Carga	18.174 Lb/h
Presión de succión	2.9013psi (150 mmHg)
Diámetro de succión	0.7262 in (18.4455 mm)
Diámetro de boquilla de vapor	0.110799 in (2.81424 mm)
Diámetro de garganta del difusor	0.3326 in (8.4504 mm)
Diámetro de descarga del difusor	0.54463 in (13.8336mm)
Longitud del difusor	6.5356 in (166 mm)
Consumo de vapor	45.8 Lb/h
Presión de descarga	11.7986 psi (610 mmHg)
Consumo total de vapor: 156.1424 Lb/h por las tres etapas.	

Estos datos pueden presentarse en una hoja de especificaciones como la que se presentó al final del capítulo 2.

Cotización del sistema

La cotización se solicitó a la compañía EYECTORES EXACTOR. La selección se hizo para acero al carbon para todos los componentes del sistema. Esta cotización esta dada para enero de 1998.

Los precios en moneda nacional son los ofrecidos por esta compañía, LAB en México, fabricandolos ésta misma; o bien si se desean de importación son los precios en dólares, LAB en USA. Cabe aclarar que a los precios en dólares hay agregar el costo por importación el cual es de aproximadamente de un 20 a 50% más.

Tabla 5.6.-Cotización del sistema

ETAPA	EN MÉXICO	EN USA
PRIMER ETAPA	\$12500.00 MN	\$1800.00USDLL
SEGUNDA ETAPA	\$12500.00 MN	\$1800.00USDLL
INTERCONDENSADOR	\$9800.00 MN	\$1400.00USDLL
TERCER ETAPA	\$9200.00 MN	\$1400.00USDLL
TOTAL	\$44000.00MN	\$6400.00USDLL

Cabe recalcar que estos precios estan sujetos a las condiciones del mercado, sin embargo son útiles para tener un orden de magnitud del costo del equipo. Además, si se deséa que la boquilla de vapor motriz o algún otro componente sea de acero inoxidable habra que volver a solicitar una nueva cotización. Para la carga manejada, en este caso, acero al carbón es apropiado.

CONCLUSIÓN

CONCLUSIÓN

Los eyectores, sin duda, presentan ventajas considerables debido a que no tienen partes mecánicas móviles; además, con la capacitación adecuada presentan una operatividad sencilla. Sin embargo, hay dos condiciones importantes bajo las cuales un sistema eyector puede ser un problema: primero, la calidad del vapor; en las unidades pequeñas, la garganta del difusor y la boquilla de vapor motriz son muy sensibles a la calidad del vapor, dado que son muy angostas y una gota de condensado puede obstruirlas e interrumpir el vacío. La segunda es el costo de la libra de vapor, el cual es función del costo del combustible empleado como medio de calentamiento.

Los procedimientos de diseño presentados, no representan una dificultad significativa, basta convertir la carga a succionar en aire equivalente seco y conocer las presiones de succión y descarga para poder determinar las dimensiones de la etapa en consideración. Sin embargo, la selección final debe hacerse buscando el menor consumo de vapor, lo cual se refleja directamente en el costo de operación; también cabe recordar que las etapas pequeñas presentan problemas de maquinado, así como de operación. Además, debemos considerar la disponibilidad del vapor, cuando se cuenta con vapor de desecho es una ventaja si se compara donde habrá que producirlo a propósito.

Para el caso que nos ocupa se seleccionó un sistema de tres etapas con un intercondensador; para manejar una carga de 20.925 Lb/h de aire seco equivalente (DAE), y una presión de succión de 15 mmHg absoluta, para esto se necesita un consumo total de vapor motriz de 156.2 Lb/h a 100 Lb/pg², y una presión de descarga de la última etapa, a la atmósfera o al pozo caliente, de 610 mmHg que es una presión adecuada, si tomamos en cuenta que la presión atmosférica, en la Cd. de México, es de 585 mmHg, de modo que hay 25 mmHg de diferencia de presión. En el intercondensador se requerirá de 29.35 GPM de agua de enfriamiento a 59 °F, la cual se tomará de la torre de enfriamiento de la misma planta.

La primer etapa tendrá un diámetro de boquilla de vapor motriz es de 2.3109 mm, la segunda tendrá un diámetro de 3.3706 mm y la tercera de 2.8142 mm; estos son un tanto pequeños por lo que habrá que ser cuidadoso en la calidad del vapor motriz. El diámetro de la garganta del difusor no son tan pequeñas como éstas por lo que se espera que no representen un problema, en su operación, estos diámetros son 23.9346 mm, 24.7540 mm y 8.4504 mm para la primera, segunda y tercer etapa respectivamente.

Los diámetros de succión son 2.3465 pulg., 2.1863 pulg. y 0.7262 pulg.; para la primera, segunda y tercer etapa respectivamente.

La cotización se solicitó para acero al carbon, que es una opción económica si se compara con algún acero especial. Esta cotización esta sujeta a las variaciones del mercado sin embargo es una base de referencia para saber cuanto cuesta un sistema similar al propuesto.

APÉNDICE

APENDICE A

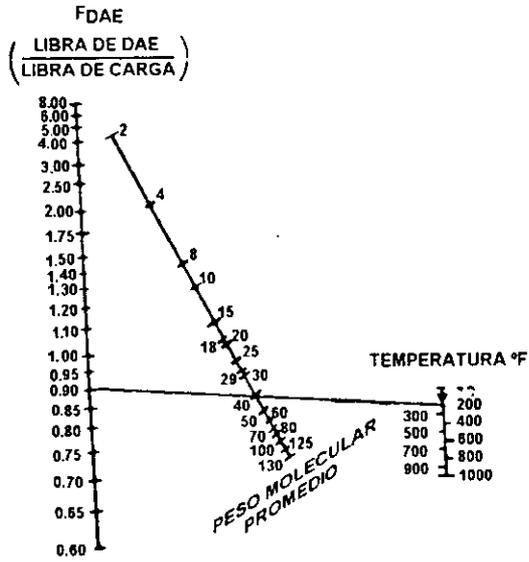


Fig. 4.1.-Nomograma para la determinación del factor de corrección de DAE.

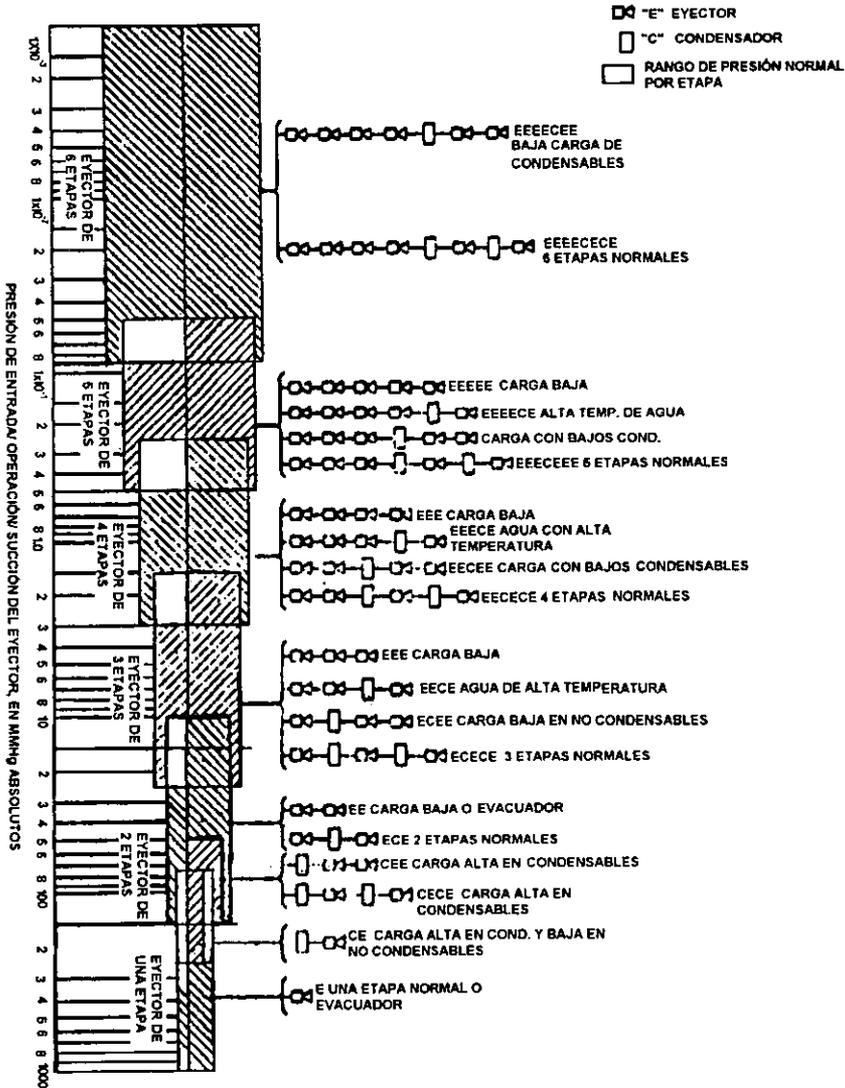


Fig.4.2.-Intervalo de presión de operación del equipo para varias combinaciones de fluidos en cargas y el efecto de la temperatura sobre el equipo.

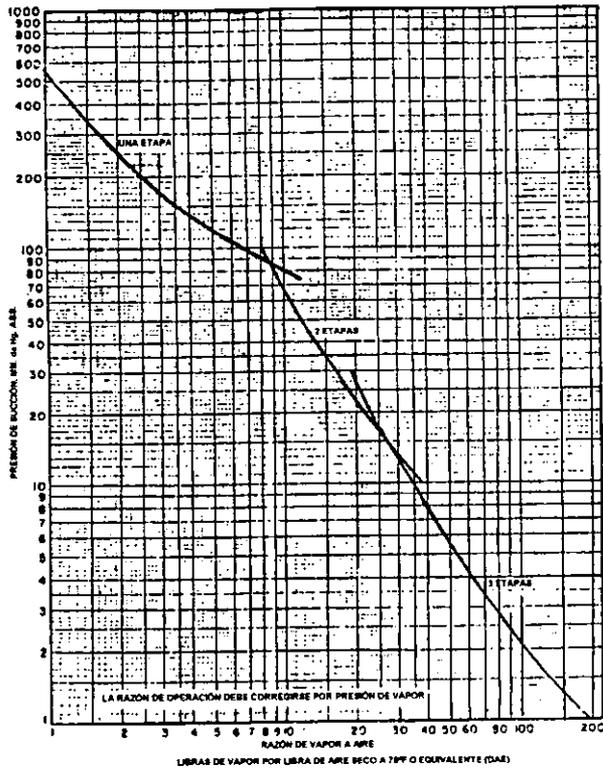


Fig.4.3.-Relación de vapor a aire en libras de vapor por libra de DAE en función de la presión de succión.

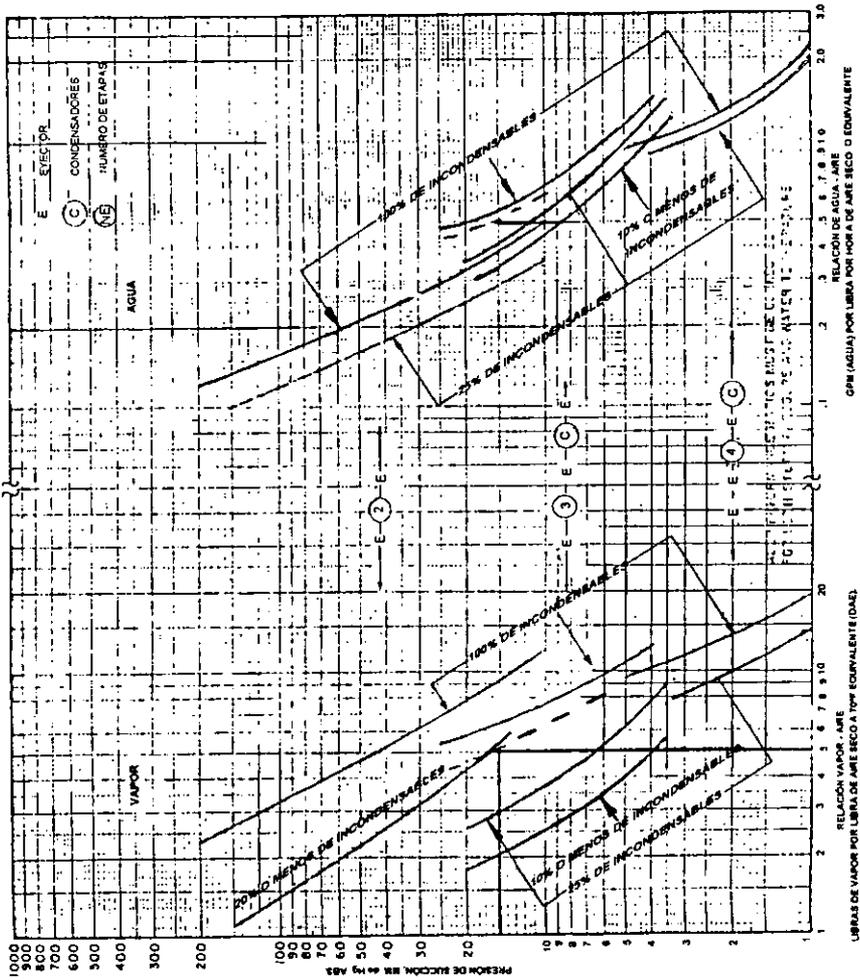


Fig.4.4.-Curvas empleadas para calcular la relación vapor-aire.

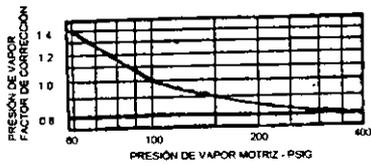


Fig.4.5.-Factor de corrección por presión de vapor.

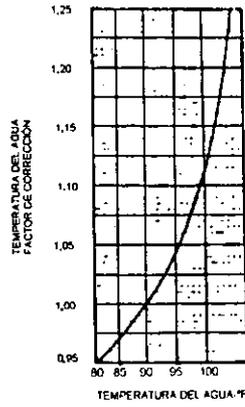


Fig.4.6.-Factor de corrección por temperatura del agua.

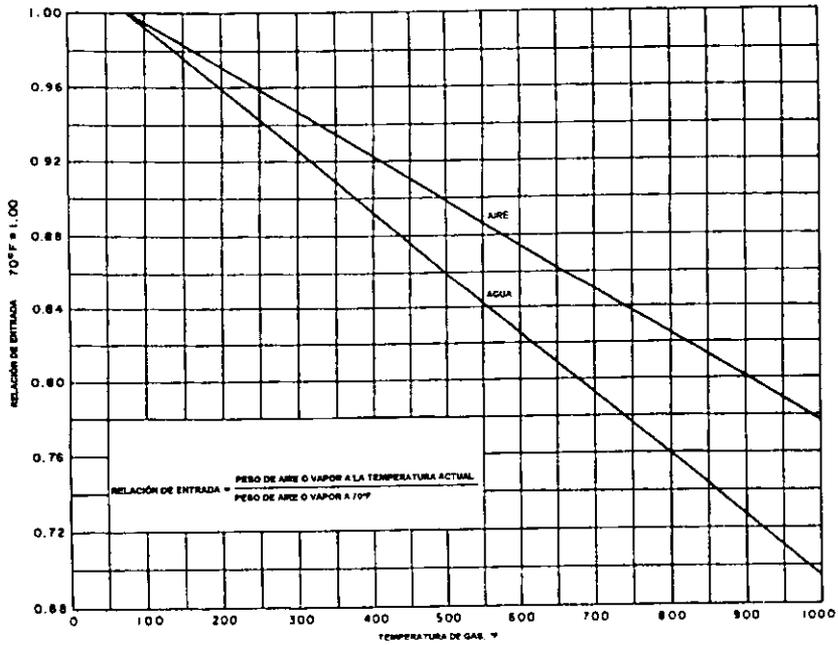


Fig. 4.7.-Factor de corrección por diferencia de temperatura.

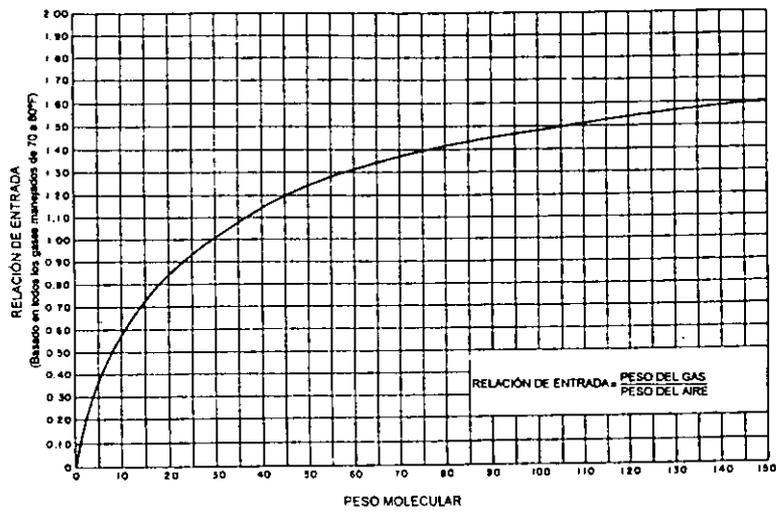


Fig.4.8.-Factor de corrección por diferencia de peso molecular.

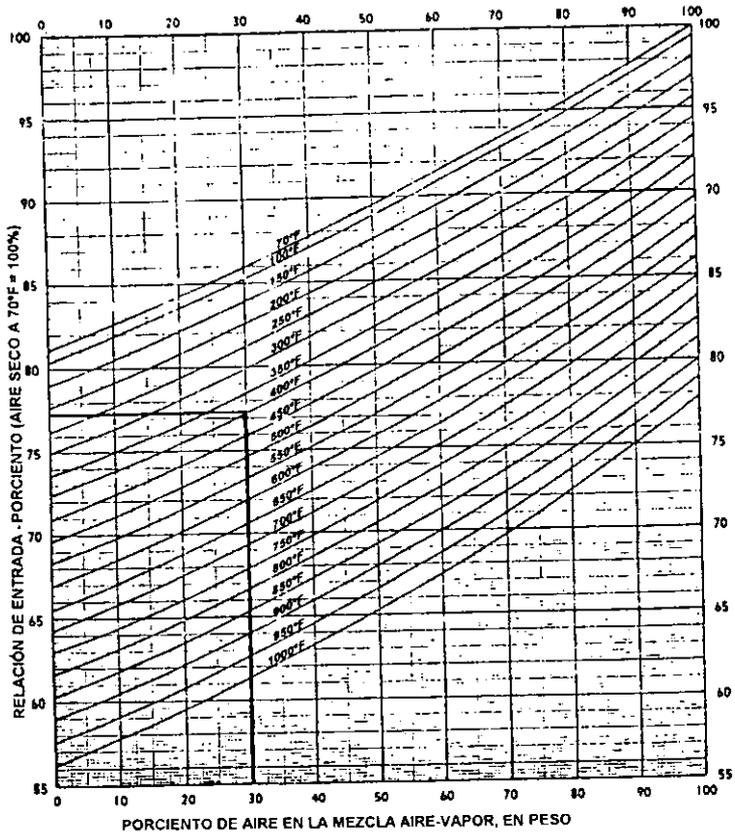


Fig.4.9.-Curvas de relación de entrada para la mezcla vapor-aire.

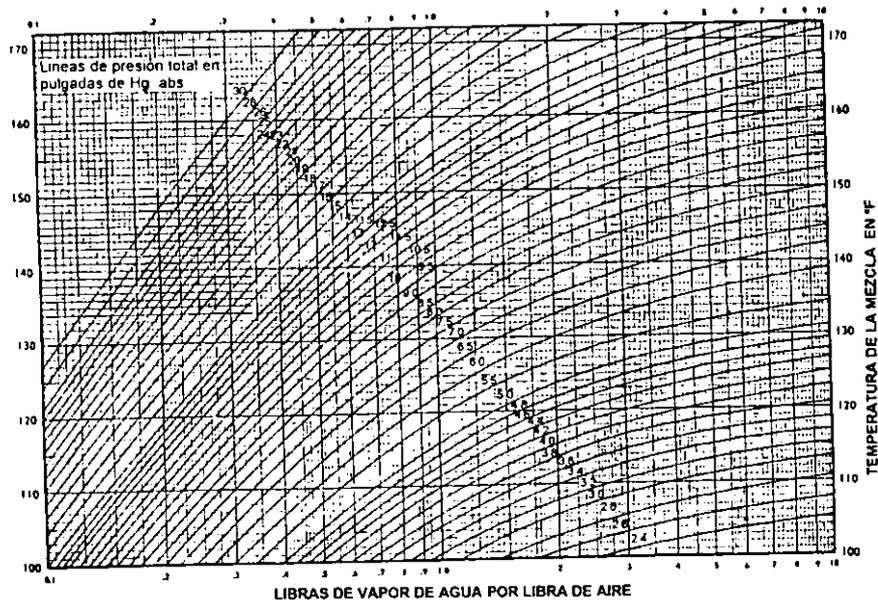


Fig. 4.10.-Cantidad de vapor de agua que satura el aire.

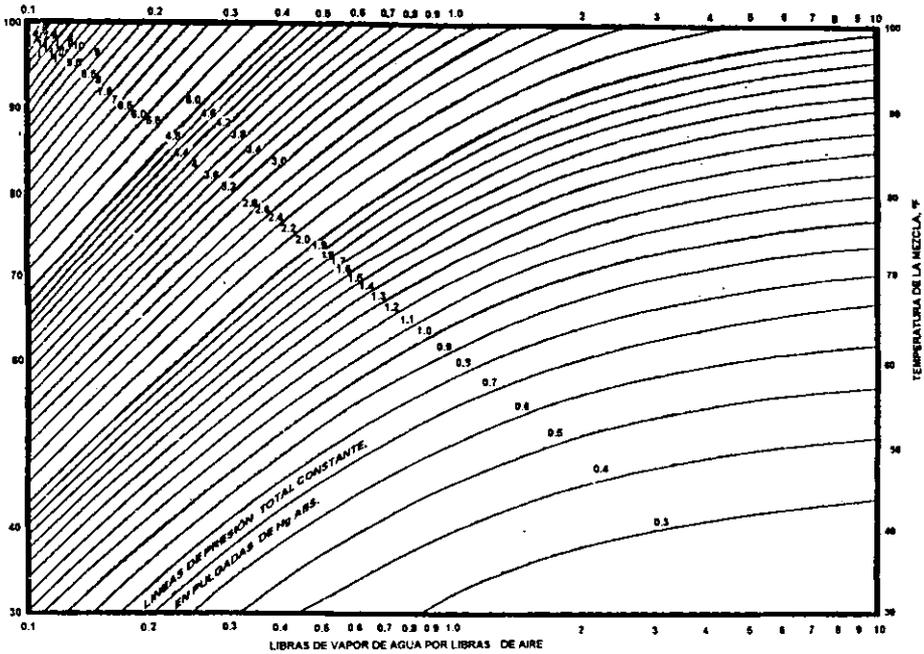


Fig.4.11.-Libras de vapor de agua por cada libra de aire en función de la temperatura de la mezcla.

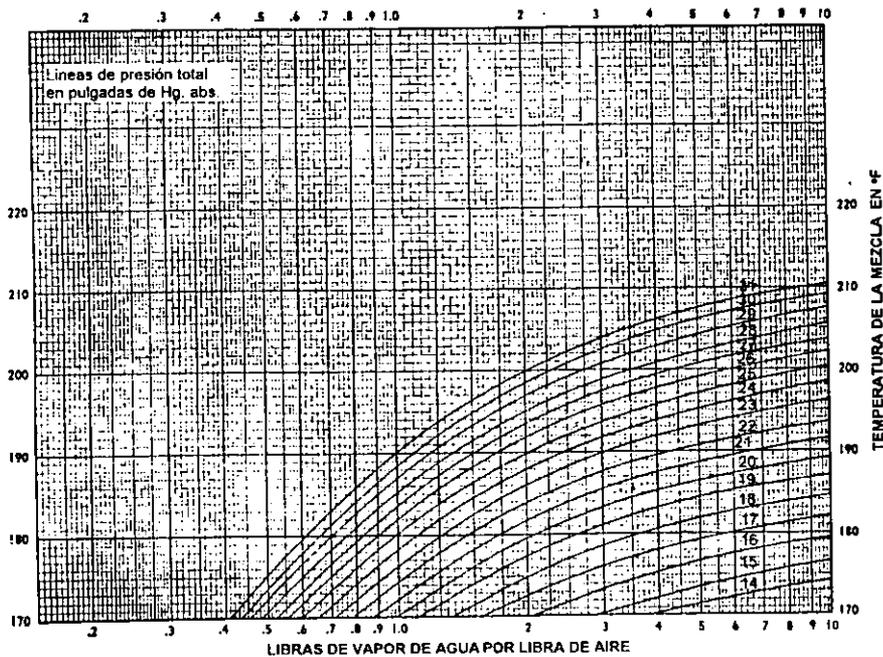


Fig.4.12.-Libras de vapor de agua por libra de agua en función de la temperatura.

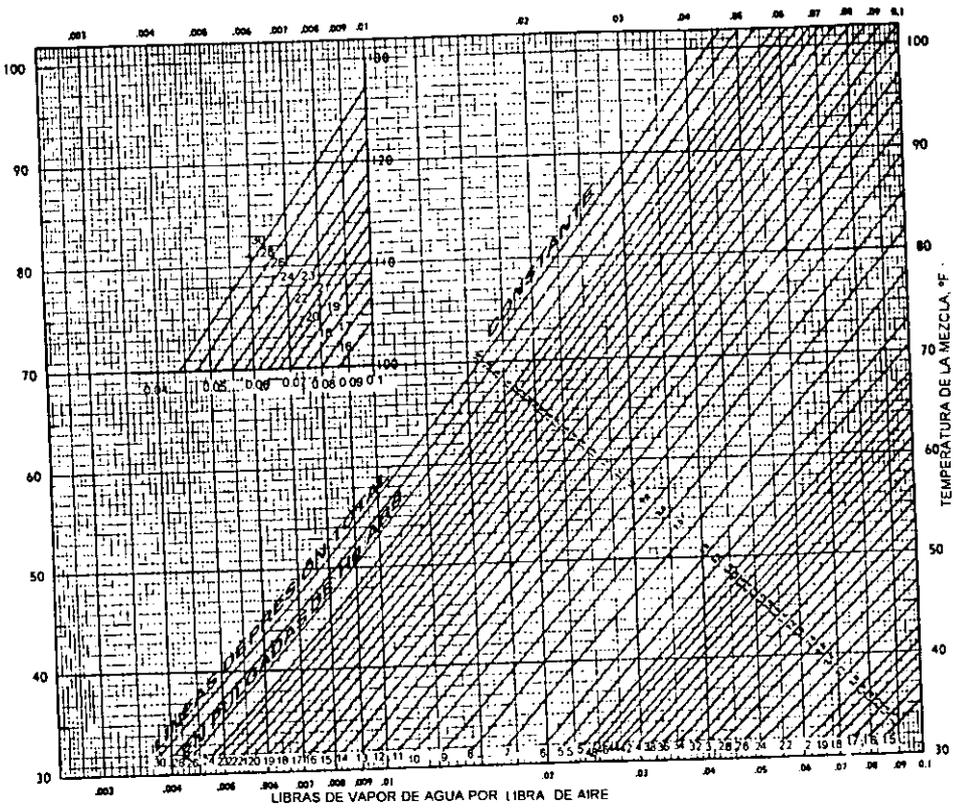


Fig.4.13.-Determinación de las libras de vapor de agua por libra de aire en función de la temperatura de la mezcla.

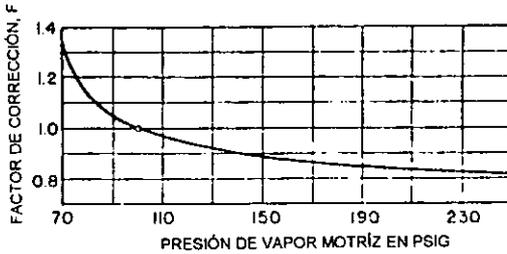


Fig.4.14.-Factor de corrección para cuando la presión del vapor motriz es diferente de 100 psig. Si la presión del vapor motriz es más alta que la de diseño, se requerirá menor cantidad de vapor.

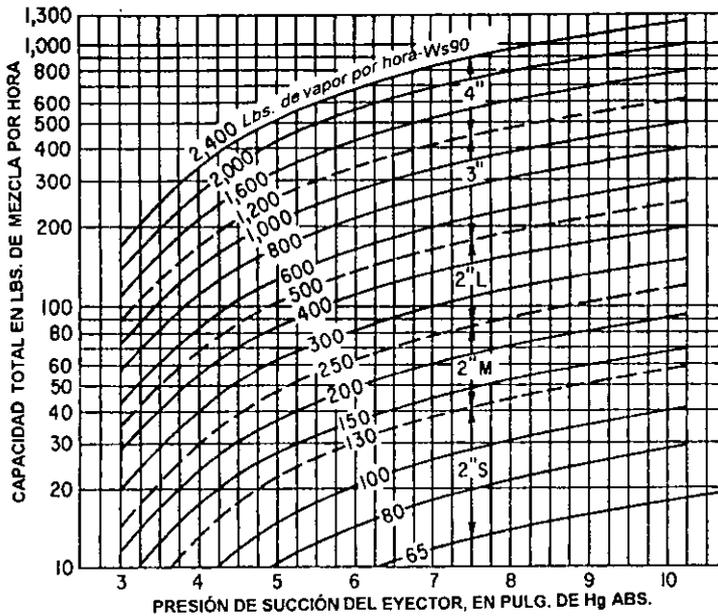


Fig.4.15.-Consumo de vapor para un eyector de una sola etapa con presión de succión entre 3 y 10 pulgadas de Hg. absolutas

Fig. 4. 16.-Factor de corrección para el consumo obtenido en la figura 4.15, cuando la presión es diferente de 90 psig.

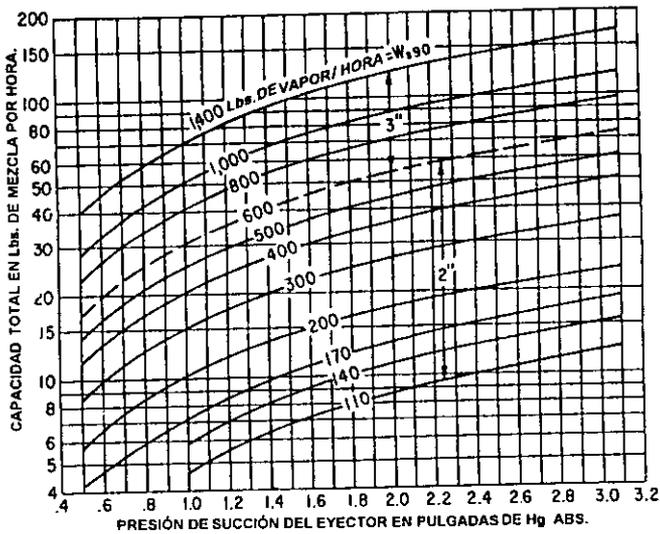
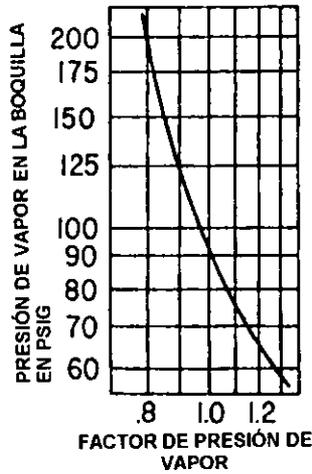


Fig. 4.17.-Consumo de vapor para un sistema de dos etapas.

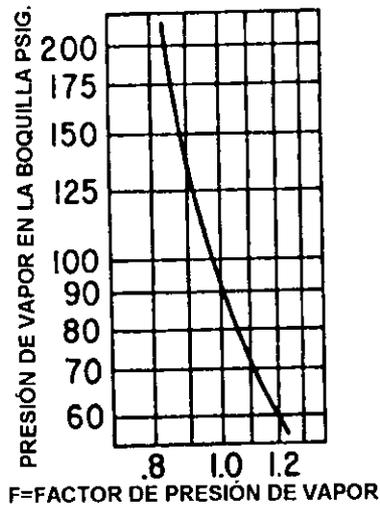


Fig.4.18.-Factor de corrección para el consumo obtenido en la figura 4.17.

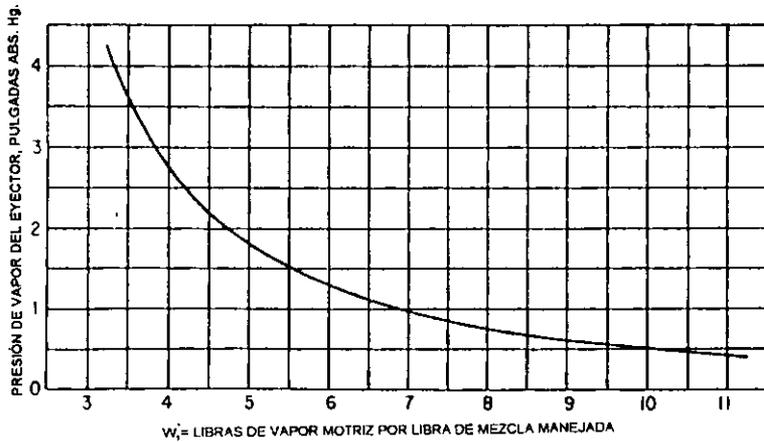


Fig.4.19.-Consumo de vapor para dos etapas con un intercondensador barométrico.

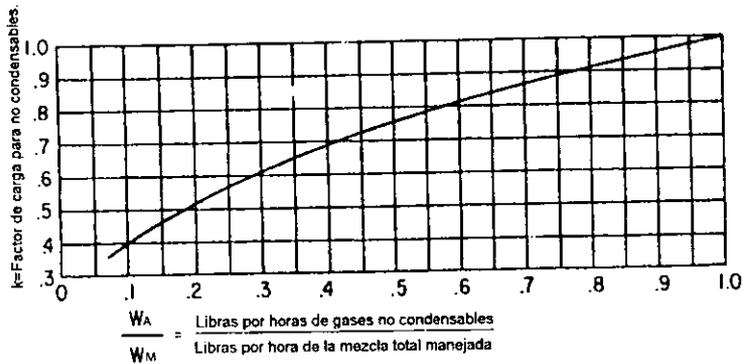


Fig.4.20.-Factor de corrección para la cantidad de gases no condensantes de la mezcla.

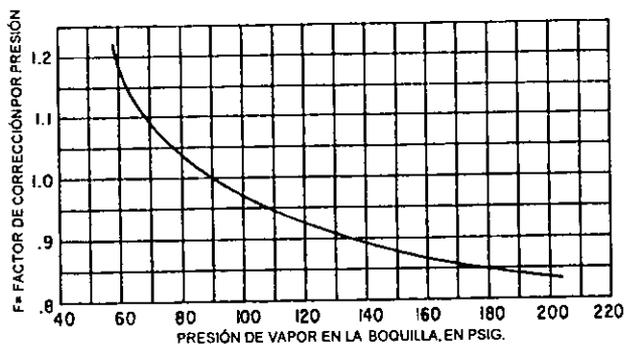


Fig.4.21.-Factor de corrección para una presión del vapor motriz diferente de 90 psig.

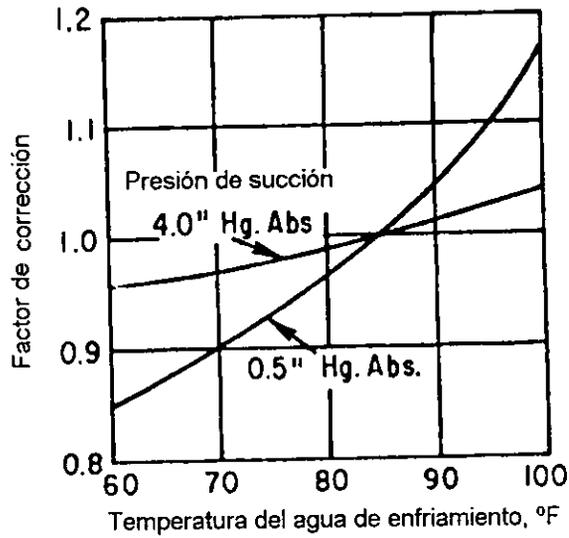


Fig.4.22.-Determinación del diámetro aproximado de las conexiones de succión y descarga del eyector, la cual no tiene ningún efecto sobre el consumo de vapor.

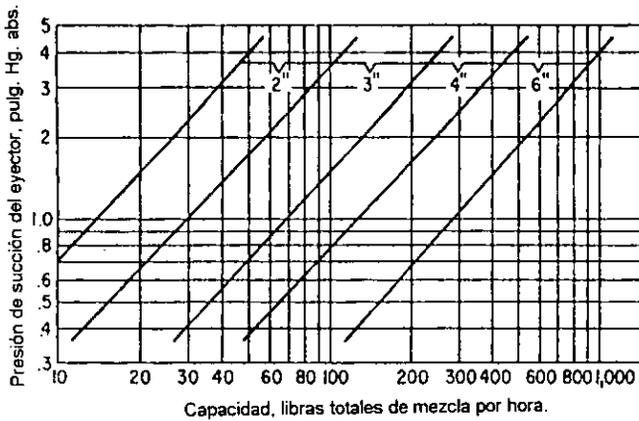


Fig.3.23.-Corrección del consumo de vapor cuando la temperatura del agua es diferente de 85°F.

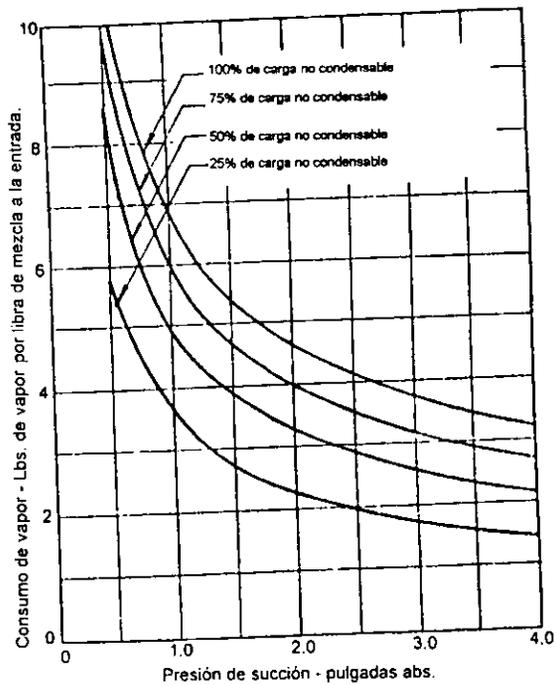


Fig.4.24.-Consumo de vapor unitario para un sistema eyector de dos etapas condensantes

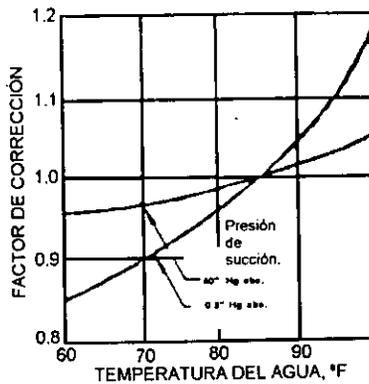


Fig.4.25.-Factor de corrección por diferencia de temperatura.

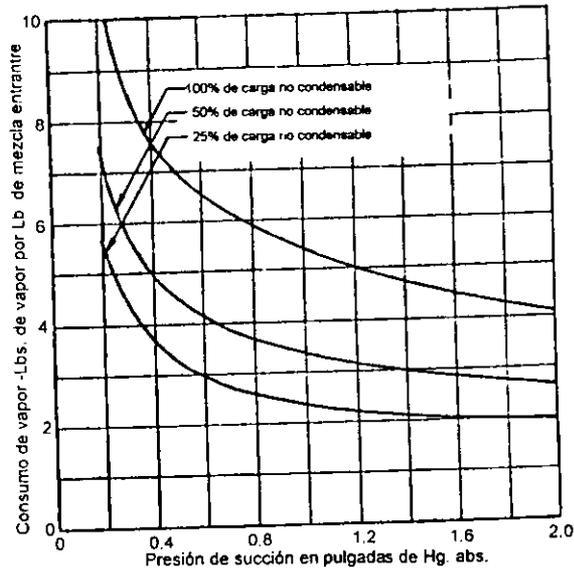


Fig. 4.26.-Consumo unitario de vapor para un sistema eyector de tres etapas condensantes

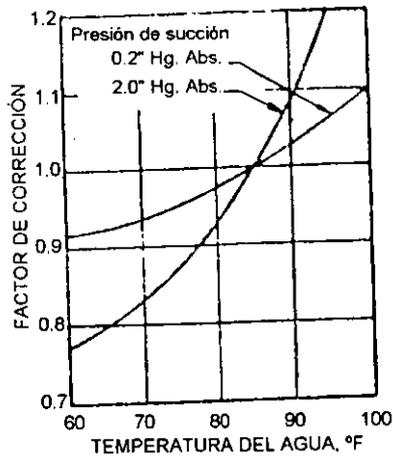


Fig. 4.27.-Factor de corrección para el consumo de vapor obtenido en la figura 4.26.

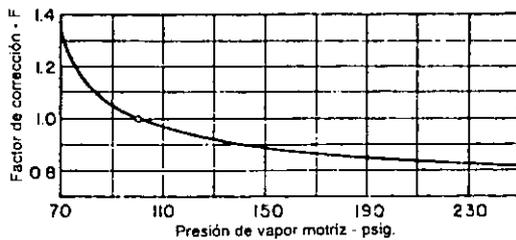


Fig. 4.28.-Factor de corrección cuando la presión del vapor matriz es diferente de 100 psig.

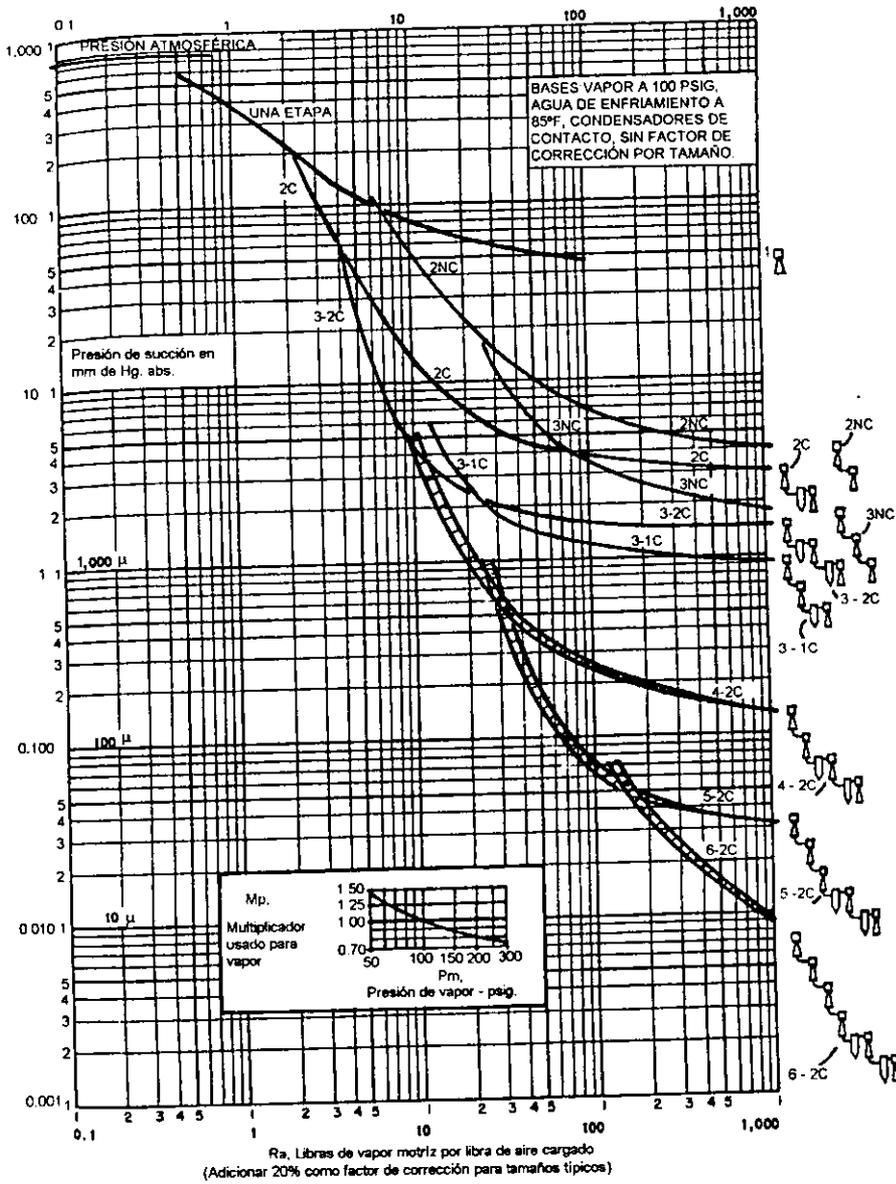


Fig.4.29.-Razón básica , Ra, de vapor para eyectores del tipo no condensante

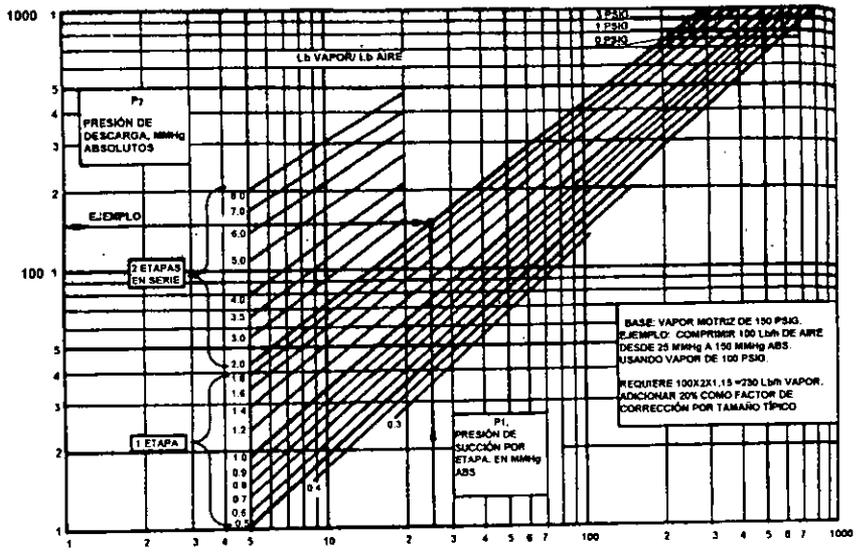


Fig.4.30.-Vapor requerido para comprimir aire a las condiciones de diseño.

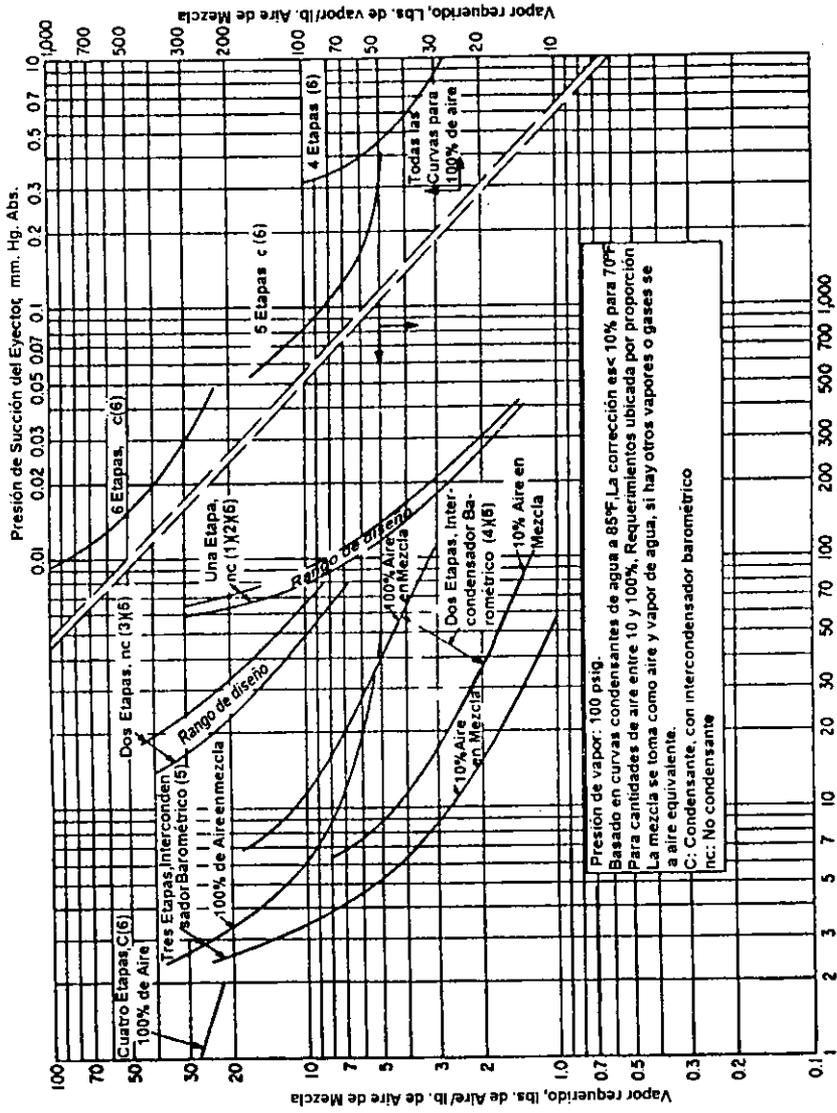


Fig. 4.31.-Estimación del requerimiento de vapor por el eyector.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- 1.-How to specify, evaluate and operate steam-jet air ejectors: Robert R Power. Hydrocarbon Processing & Petroleum Refiner. Vol. 43. N° 2, N° 3 y N° 4. Febrero de 1964.
- 2.-cut Steam-Heating Cost With on Ejector Thermocompressor: Robert R. Power. Chemical Engineering, Vol.101, N° 2, Febrero de 1994.
- 3.-How do vacuum devices work, and wich one -or combination- should you choose? How large a system do you need? Answers to these crucial questions are found here: J. L. Ryans; Stephen Croll. Chemical Engineering, Diciembre 14, 1981.
- 4.-Characteristics of the Steam-Jet Vacuum Pump: L. S. Harris; A. S. Fischer: Transactins of the ASME, Serie Journal of Engineering for Industry. Noviembre de 1964.
- 5.-Designing Vacuum Steam-Jet System: David B. Birgenheier, Chemical Engineering, Vol.100, N° 7, Julio de 1993.
- 6.-Vacuum Upgrade Cuts Steam & Water Use: Harry Sung and Peter Chong, Chemical Engineering, Agosto de 1994.
- 7.-Frank Aerstin ; Gary Street: Applied Chemical Process Design. Plenum Press. USA, 1989.
- 8.-G. D. Ulrich : Procesos de Ingeniería Química, Ed. Interamericana, México 1986.
- 9.- Alan S. Foust: Principios de Operaciones Unitarias. Ed. CECSA, México 1961.
- 10.-E. E. Ludwig: Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants. Vol. I Ed. Gulf Publishing Co; USA, 1964.
- 11.-R. H. Perry; C. H. Chilton; S. D. Kirkpatrick. Chemical Engineering Handbook, 4ª edición; McGraw-Hill, USA, 1963.
- 12.-ASME Performance Test Codes on Ejectors, 1996.
- 13.-Heat Exchange Institute, Inc; General Constrution Standards for Ejector Components others than Ejector Condensers, Primer edición, 1979.
- 14.-Heat Exchange Institute, Code for the measurement of sound from steam jet ejectors. Primera edición, USA, 1978..
- 15.- Heat Exchange Institute for surface type condensers for ejector service.

16.-Heat Exchange Institute. Standards for direct contact barometric and low level condensers. 5ª edición, 1970.

17.-Ejector and Boosters. Power Test Codes Committee of ASME. Agosto 1956.

18.-Heat Exchange Institute. Standards for Field testing addendum to Standards for Steam Jet Ejectors. Tercer edición, 1975.

19.-How to Specify Steam-Jet Ejectors: Eugene F. Newman, Chemical Engineering, Abril, 10, 1967.

20.- N. H. Johannesen: Ejector, Theory and experiments. Transaction of the Danish Academy of Technical Sciences, N° 1. Dinamarca 1951.

21.-High-vacuum Technology and Equipment: H. A. Steinhertz. Chemical Engineering; Agosto 20, 1962.