

Destilación al Vacío de Etanol usando Bomba Chorro

William Orozco¹

Resumen

En este artículo se presenta una revisión y un análisis del estado del arte de las tecnologías de producción de etanol y las características, dimensiones y funcionamiento de las bombas chorro, las cuales son dispositivos que permiten la obtención de vacío para destilar etanol bajo esta técnica. Para la revisión del estado del arte se tuvo en cuenta principalmente referencias de los últimos 15 años, tanto de investigadores nacionales como internacionales, lo cual permitió obtener información actualizada acerca del uso de las bombas chorro en sistemas de refrigeración y aire acondicionado y establecer que para el caso de la destilación al vacío de etanol las mejores condiciones de funcionamiento y por tanto las mejores dimensiones y geometría de la bomba chorro, se obtienen para la presión motriz y presión a la salida de la tobera que entreguen un vacío de 6 kPa, con el mayor coeficiente de arrastre (*entrainment ratio*) y el mayor número de Mach a la salida de la tobera.

Palabras clave

Bomba chorro, destilación al vacío, etanol, modelo matemático, partes bomba chorro.

1 Grupos GITER Y SINERGIA, INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO, williamorozco@itm.edu.co

Fecha de recepción: 04 de Agosto de 2010
Fecha de aceptación: 05 de Octubre de 2010

Abstract

This paper presents a review and analysis of the literature regarding ethanol production technologies and, the features, dimensions and functioning of jet pumps, which are devices that create a vacuum for distilling ethanol. This review mainly takes into account references from the previous 15 years, both national and international research, which yielded updated information on the use of jet pumps in refrigeration and air conditioning systems and established that, in terms of vacuum distillation of ethanol the best operating conditions and, therefore, the best dimensions and geometry of the jet pump, are obtained for the driving pressure and pressure at the exit nozzle to deliver a 6 kPa vacuum with the greatest entrainment ratio and the highest Mach number at the exit nozzle.

Keywords

Ethanol, jet pump, jet pump parts, mathematical model, vacuum distillation.

1. INTRODUCCIÓN

Las bombas chorro son dispositivos usados en diferentes industrias, como la química, petrolera, minera, especialmente para ser empleadas en los condensadores, en los sistemas de evaporación y secado al vacío, en torres de destilación al vacío, y en donde cumplen un papel muy importante como bombas de generación de vacío (Narmine et al., 1999). En los sistemas de refrigeración y aire acondicionado se han encontrado las principales aplicaciones e investigaciones. En Polonia, Canadá, Kuwait, Portugal, Alemania, Grecia, España, Egipto, Taiwan y China; se han efectuado investigaciones tendientes a obtener las dimensiones y geometría de estos equipos así como las características de los fluidos motriz y secundario que permitan que las bombas chorro trabajen en su punto óptimo; para ello los investigadores han utilizado como fluido motriz vapor obtenido a través de paneles solares y como fluido secundario diferentes refrigerantes, con el fin de obtener la bomba que opere en las mejores condiciones de funcionamiento, en cuanto a la compresión del refrigerante (Butrymowicz et al., 2006; Ouzzane, 2003; El-Dessouky et al., 2002; Varga et al., 2009; Alaa et al., 2002; Alexis, 2003; Xavier et al., 2004; Huang et al., 1999; Jianlin Yu et al., 2006).

La importancia de las bombas chorro en comparación con su competencia, las bombas de vacío, radica en que no utilizan partes móviles, su construcción es fácil, ocupa poco espacio, es fácil de manejar e instalar y tiene bajo costo de adquisición y mantenimiento (GEA, 2009); pero su punto óptimo de funcionamiento solo se obtiene experimentalmente, lo que no las hace tan versátiles como las bombas de vacío (GEA, 2009).

En este artículo se pretende mostrar que las bombas chorro además de ser utilizadas para sistemas de refrigeración, es también posible usarlas para la generación de vacío que permita la destilación de etanol con concentraciones superiores a 95% etanol/agua. Además también se quiere mostrar la forma de obtener las dimensiones y características geométricas que permitan alcanzar el vacío requerido de 6 kPa para la destilación de etanol con la concentración requerida.

2. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE ETANOL

El etanol es elaborado a través de la fermentación de productos con alto contenido de carbohidratos como la papa (Satkofsky, 2002), hemicelulosa como la madera blanda (Schneegurt et al., 2001), inclusive celulosa (Martin, 2000) o residuos de papel (Parkinson, 2002), melazas azucareras, maíz (Tally, 2002, Johnson et al., 2006), almidón de trigo, almidón de papa, almidón de yuca y por hidrólisis y fermentación de residuos celulósicos (Swoboda, 2002).

La separación de las soluciones acuosas diluidas de etanol (EtOH) ha sido un proceso ampliamente estudiado y probado industrialmente. Sin embargo, la necesidad de obtener alcohol deshidratado con el fin de ser usado como aditivo oxigenante de la gasolina, ha impuesto una serie de retos a la industria y a los centros de investigación, a fin de reducir los costos energéticos de la recuperación de EtOH cumpliendo los correspondientes estándares de calidad. Adicionalmente, el impacto ambiental que presentan algunas tecnologías tradicionales de separación ha hecho que la investigación sobre esquemas alternativos y no convencionales sea mucho más intensa (Montoya et al., 2005).

De otro lado, la diversidad de alternativas tecnológicas para la producción de alcohol carburante ha hecho crucial el análisis del proceso global, a la par del diseño y desarrollo de cada una de las operaciones que lo componen. Dentro de las nuevas tendencias de investigación y desarrollo en esta área se cuenta la integración del proceso con miras a develar las muy complejas interacciones entre las diferentes etapas del proceso productivo (Lynd, 1996). El desarrollo de procesos integrados permitirá una reducción sustancial de los costos de producción y el incremento de la competitividad del bioetanol frente a la gasolina.

2.1 Procesos de Separación

Para la separación y deshidratación del etanol se utiliza la destilación convencional, generalmente en dos fases, para obtener una mezcla cercana a la azeotrópica (mezcla líquida cuyo punto de ebullición es constante). En el punto azeotrópico, la composición en el vapor es idéntica a la composición en el líquido (Quintero et al., 2007). Para su deshidratación y purificación, esta mezcla debe ser tratada mediante operaciones de separación no convencionales: destilación azeotrópica, destilación extractiva y destilación a vacío y así obtener purezas superiores a 95/5% etanol/agua, que son la utilizadas en la mezcla con gasolina (Quintero et al., 2007).

La destilación azeotrópica en la cual se obtiene etanol con una concentración de 95/5% etanol/agua, (Uyazan & Gil, 2003); consiste en la adición de un tercer componente a la mezcla etanol-agua, la cual forma nuevos azeótropos, para facilitar la separación en esquemas tecnológicos que involucran dos o tres columnas de destilación. Entre las sustancias (llamadas arrastradores) que se agregan a las mezclas de etanol-agua resultantes del proceso de obtención de alcohol se utiliza principalmente el benceno, aunque también el tolueno y el n-pentano. En la Fig. 1, se presenta el proceso de destilación azeotrópica, el cual consiste de una columna de deshidratación (columna azeotrópica) que se alimenta con una mezcla de cerca de 90% de alcohol. A esta columna se le agrega en el plato superior el benceno, mientras de la parte inferior se retira alcohol anhidro con una concentración de agua menor al 1%. El vapor de salida de la parte superior de la columna, con una composición igual o cercana a la del azeótropo ternario, se condensa y lleva a un separador en donde la fracción rica en agua se alimenta a una pequeña columna de lavado (columna despojadora) para la regeneración del arrastrador, mientras la otra fracción se recircula como reflujo a la parte superior de la columna azeotrópica (Uyazan & Gil, 2003).

Sin embargo el uso de benceno no es deseable debido a sus propiedades carcinogénicas, por lo que se ha propuesto la destilación extractiva.

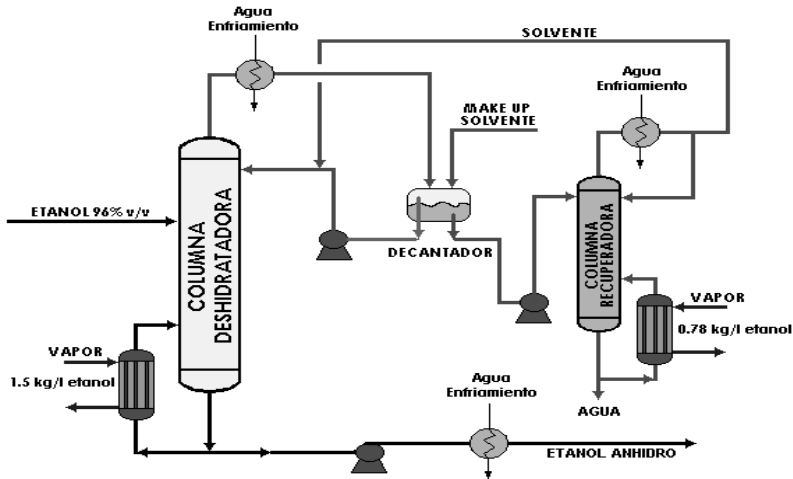


Fig. 1. Destilación azeotrópica (Uyazan & Gil, 2003)

La destilación extractiva 97/3% etanol/agua, se lleva a cabo adicionando una sustancia no volátil y de alto punto de ebullición (llamada solvente) que modifica la volatilidad relativa de los componentes de la mezcla etanol-agua sin formar nuevos azeótropos, permitiendo de esta forma la separación (Meirelles y Telis, 1994). En la Fig. 2, se presenta el proceso de Destilación extractiva en la cual el disolvente alimenta unos platos más arriba que la corriente de etanol que proviene de la columna de rectificación. A diferencia de la destilación azeotrópica, en la columna extractiva se recupera el etanol deshidratado por el destilado mientras que de los fondos se retira una corriente con composición ternaria en donde se concentra la casi totalidad del etilenglicol. Esta corriente se envía a la columna de recuperación del disolvente donde merced a su baja volatilidad se recupera el etilenglicol en los fondos, los cuales se recirculan a la columna extractiva. En el destilado de la columna de recuperación se recupera el agua de la mezcla inicial (Quintero et al., 2007).

El disolvente debe ser de baja volatilidad para que su separación en la segunda torre de destilación, donde se recupera, sea mucho más fácil. Como disolvente se ha usado tradicionalmente etilenglicol, pero los costos energéticos son

mayores comparados con la destilación azeotrópica con benceno. Meirelles & Telis (1994) indican que bajo condiciones de operación específicas, la destilación extractiva para la obtención de EtOH anhidro puede ser competitiva energéticamente en comparación con la destilación azeotrópica, lo cual ha sido corroborado por Montoya et al. (2005) mediante simulación.

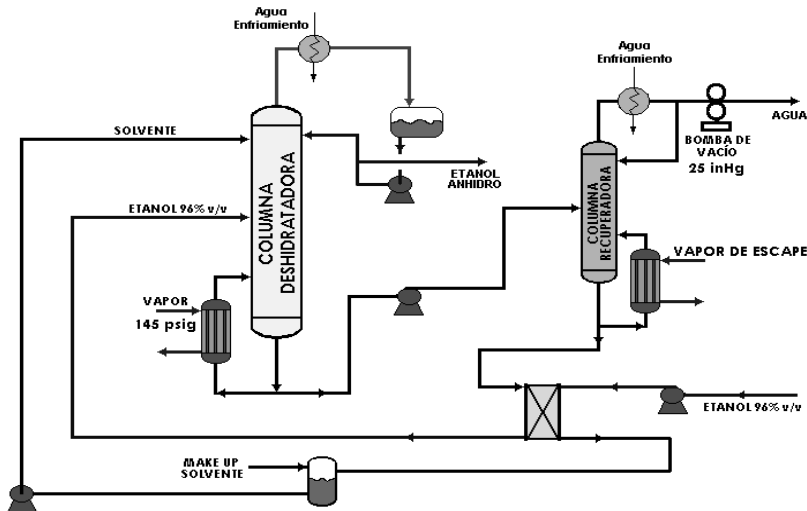


Fig. 2. Destilación extractiva (Uyazan & Gil, 2003)

Finalmente, la destilación a vacío (ver Fig. 3), consiste en la disminución de la presión y la temperatura a la cual destila el etanol azeotrópicamente, es decir, si se utilizan presiones por debajo de 101,3 kPa y temperaturas por debajo de 78,60°C se puede romper el azeótropo de etanol y la destilación puede continuar (Uyazan et al., 2004).

En el caso del etanol el azeótropo se rompe a 6 kPa y se pueden obtener concentraciones de etanol superiores a 95%, como es el caso de concentraciones que utilizan el etanol como aditivo para la gasolina de 97% etanol/agua (Uyazan et al., 2004); aplicación para la cual en Colombia en este momento es muy importante, de acuerdo al decreto de uso de alcoholes carburantes en Colombia (Decreto 1135, 2009) el cual obliga a que en el año 2012 el 60% de

los vehículos de hasta 2000 cm³ que se vendan en el país soporte la tecnología conocida como Flex-Fuel E85, que permite que un automotor funcione con una mezcla de 85% de etanol y 15% con gasolina. El decreto también establece que la oferta de vehículos con esa tecnología debe subir en el 2014 al 80%, y en el 2016 al 100%.

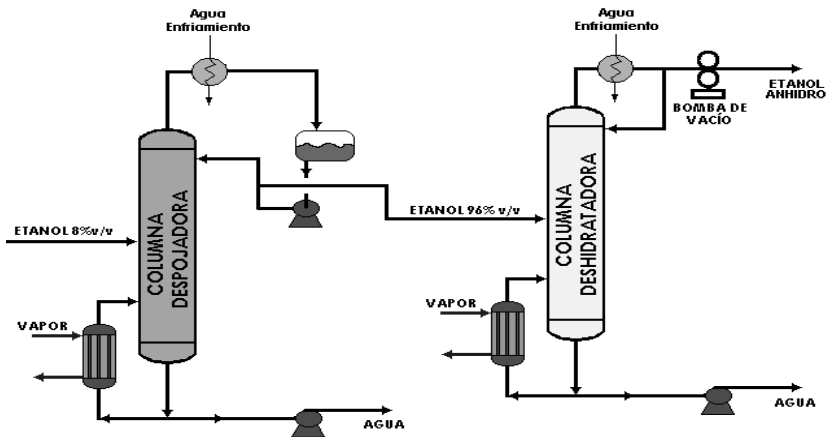


Fig. 3. Destilación al vacío (Uyazan et al., 2004)

3. BOMBA CHORRO

3.1 Funcionamiento

El principio de funcionamiento de las bombas chorro se basa principalmente en el comportamiento que presentan los fluidos al pasar por una boquilla convergente-divergente bajo condiciones subsónicas y supersónicas, ya que un fluido motriz que entre a dicha boquilla a alta presión y baja velocidad se acelera de tal manera que disminuye substancialmente su presión y al mismo tiempo alcanza una elevada velocidad al pasar por la garganta de la boquilla convergente – divergente (ver punto 1 a 2 de la Fig. 4), lo que genera una presión muy baja que permite la succión de otro fluido en reposo o en movimiento (fluido secundario), para proporcionar una mezcla de fluido a una velocidad

moderadamente elevada, que luego disminuye hasta obtener una presión final mayor que la inicial del fluido de menor velocidad (ver punto 3 a 5 de la Fig. 4) (El-Dessouky et al., 2002).

En la Fig. 4 se observa el funcionamiento ideal de una bomba chorro, ya que de acuerdo con El-Dessouky et al. (2002), cuando el fluido motriz alcanza velocidad sónica en la garganta (punto 1) de la boquilla se tendrá velocidad supersónica a la salida de ésta (punto 2), siempre y cuando se tenga una relación de áreas de acuerdo a (1), con lo cual se obtendrá la mayor caída de presión y por ende el mayor coeficiente de arrastre posible del fluido secundario, (este coeficiente se define como la relación entre el flujo másico del fluido secundario y el flujo másico del fluido motriz), siendo estas las mejores condiciones de funcionamiento de la bomba. Igualmente en la Fig. 4 se observan los fluidos que intervienen en el proceso y su comportamiento a lo largo del dispositivo.

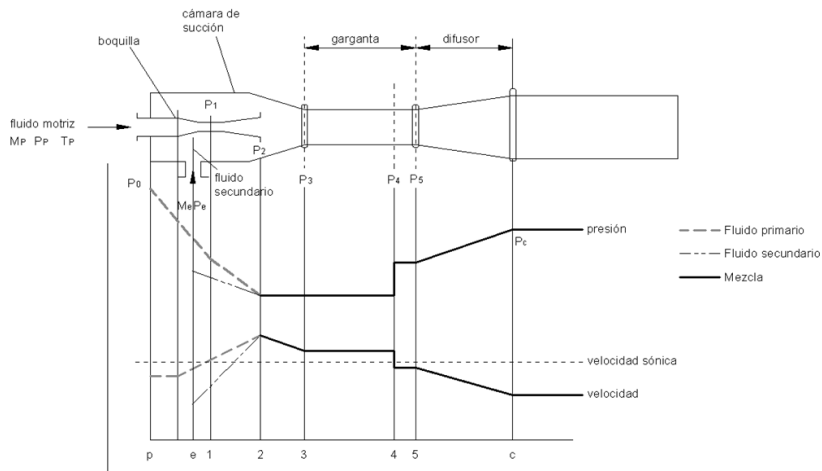


Fig. 4. Funcionamiento de la bomba chorro (El-Dessouky et al., 2002)

$$\frac{A_2}{A_g} = \left[\frac{1}{M^2_{p2}} \left[\frac{2 + (k - 1)M^2_{p2}}{k + 1} \right]^{\frac{k+1}{(k-1)}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

donde A_2 es el área a la salida de la boquilla (m) y $M^2_{p_2}$ es el número de Mach del fluido motriz a la salida de la tobera o boquilla.

Para el caso del etanol las mejores condiciones de funcionamiento y por tanto las mejores dimensiones y geometría de la bomba chorro, se obtendrán para la presión motriz y presión a la salida de la tobera que entreguen un vacío de 6 kPa, con el mayor coeficiente de arrastre (entrainment ratio) y el mayor número de Mach a la salida de la tobera. En la Fig. 5 se observa como al aumentar la presión del fluido motriz se aumenta el vacío producido por la bomba chorro, siendo este máximo para una presión motriz entre 6 a 6,5 mbar.

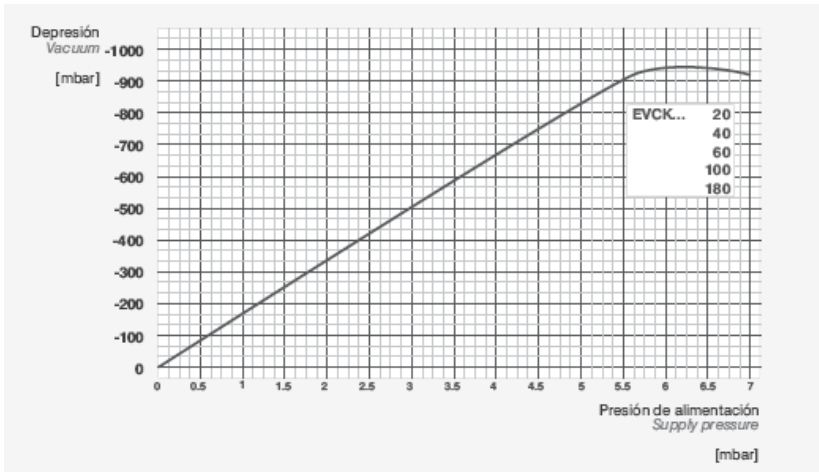


Fig. 5. Presión de vacío vs presión motriz o de alimentación (PIAB, 2009)

3.2 Partes que Generan un Buen Funcionamiento de la Bomba Chorro

Una bomba chorro consta de tres partes básicas que son: la boquilla, el difusor y la cámara de succión o cuerpo. Para obtener una aplicación industrial de la bomba chorro se deben disponer dichas partes en un conjunto como el mostrado en la Fig. 6, de tal manera que la boquilla esté encerrada en una cámara, la cual evita que los fluidos involucrados sean afectados por condiciones

externas a ellos y que podrían incidir en el buen funcionamiento del dispositivo. A continuación se explican cada una de las partes, que generan el mejor funcionamiento de la bomba.

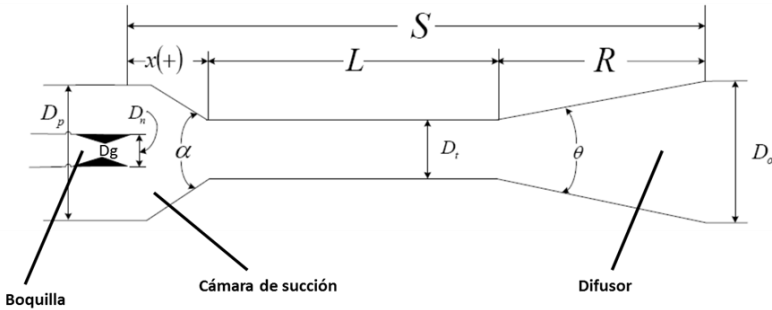


Fig. 6. Partes y dimensiones principales de la bomba chorro (Anaya et al., 1986)

3.2.1 Boquilla

El diseño de la boquilla o tobera, es la parte más importante de la bomba chorro, ya que un diseño inadecuado puede causar ondas de choque y expansiones innecesarias del fluido motriz, además determina el rango de presiones y las demás dimensiones en las cuales la bomba chorro trabaja correctamente (Manrique, 2001). La ecuación fundamental (2), de la cual se obtiene el área de la garganta de la boquilla es la siguiente (Huang et al., 1999).

$$A_g = \frac{m_m}{P_g} \left[\frac{k}{RT_g} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde:

A_g = Área de la garganta de la boquilla (m)

m_m = Flujo másico motriz que pasa por la garganta de la boquilla (kg/s)

P_g = Presión en la garganta de la boquilla (Pa)

R = Constante universal de los gases (Nm/kgK)

T_g = Temperatura en la garganta de la boquilla (K)

k: Relación de calores específicos

Los diámetros de flujo más importantes de la boquilla son: el diámetro de la garganta (D_g) y de la descarga (D_n). La primera porque dependiendo del caudal que pase por ella, hay una sección en la cual habrá una velocidad sónica, si esta se logra la caída de presión del fluido motriz en la parte divergente puede disminuir o aumentar con respecto a la correspondiente de la garganta como se indica en la Fig. 4. Siendo la mejor situación la que se presenta en el punto 2 de la misma Fig. 4, debido a la caída tan grande de presión que se obtiene, la cual se traduce en un aumento sustancial de la velocidad del fluido motriz a la de la salida de la tobera; ocasionando un gran arrastre del fluido secundario. La segunda tiene por objeto que el ángulo del cono divergente se asemeje lo mejor posible al cono generado por el fluido motriz a alta velocidad (El-Dessouky et al., 2002).

3.2.2 Difusor (S)

La parte convergente del difusor debe tener un ángulo α mayor de 20° , con el objeto de evitar que el chorro que se descarga por la tobera, produzca ondas de choque indeseables, pérdida por fricción debido a la formación de vórtices a la entrada.

La forma y diámetro de la garganta del difusor (D_t) son también importantes, si esta es recta (parte L, de la Fig. 6) permite una mejor recuperación de la presión, y por lo tanto un mejor vacío que el generado por un difusor sin esa parte (Anaya et al., 1986).

Lo anterior porque un cambio pequeño en el área de la garganta, origina una gran diferencia en la cantidad de fluido succionado. Si la garganta es muy pequeña se puede estrangular, y si es muy grande puede haber regreso del fluido secundario (Anaya et al., 1986).

3.2.3 Distancia de la descarga de la boquilla a la garganta del difusor (X)

Esta distancia afecta el desempeño de la bomba chorro, y depende entre otras cosas del área de la garganta y de la descarga

de la boquilla, de la presión del fluido motriz y de la forma de la cámara de succión o de mezclado y del difusor (Varga et al., 2009).

Si la bomba chorro trabaja a alto vacío y con poca cabeza de succión, esta distancia es mínima, y cuando se incrementa la presión del fluido motriz, esta distancia aumenta debido principalmente a que se elevan las dimensiones del chorro que descarga la boquilla (Varga et al., 2009).

3.2.4 Descarga del difusor (Do)

Después de la sección recta del difusor, se utiliza una sección divergente, cuyo objetivo es lograr la máxima recuperación posible de presión (Manrique, 2001).

3.3 Modelado de la Bomba Chorro

La revisión realizada por Sun (1996) y Eames et al. (1995) describe la evolución en el modelado matemático y en el diseño de las bombas chorro. La revisión muestra que hay dos enfoques fundamentales para el análisis de la bomba. Estos incluyen la mezcla del fluido motriz y secundario, ya sea a presión constante o a área constante.

El diseño de los modelos con la mezcla a presión constante es el más común en la literatura, porque el funcionamiento de las bombas chorro diseñadas por este método presentan un mejor funcionamiento en comparación con el del área constante, lo cual fue comprobado experimentalmente por Keenan et al. (1950). Posteriormente, varios investigadores han utilizado el modelo para la evaluación del diseño y el rendimiento de varios tipos de bombas chorro. Esto implicó una serie de modificaciones en el modelo, especialmente en lo relacionado con las pérdidas en la bomba y en la mezcla de los fluidos motriz y secundario.

A continuación se presentan una serie de trabajos realizados con base en el modelo de la presión constante, por la importancia que tiene este método en el desarrollo de las bombas chorro.

Un gran número de investigaciones experimentales se han llevado a cabo para estudiar el efecto de la geometría de la bomba chorro sobre su desempeño, por ejemplo, la posición de salida de la

boquilla fue estudiada por Aphornratana & Eames (1997), Chunnanond & Aphornratana (2004), Eames et al. (2007) y Yapici (2008); la relación entre el área de la cámara de mezcla (Succión) y el área de la boquilla por Huang & Chang (1999), Sankarlal & Mani (2007), Chang & Chen (2000) y Yapici (2008); la salida y el diseño de la boquilla por Chang & Chen (2000) y Eames (2002); así como el efecto del fluido motriz por Cizungu (2001), Godefroy (2007), Sun (1999) y Hernández (2004).

En los últimos años, los investigadores han tratado de encontrar una aplicación más amplia de estos dispositivos para los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, es así como, Eames et al. (1995) y Aphornratana & Eames (1997) llevaron a cabo una investigación a pequeña escala de un refrigerador con chorro de vapor, en la que un eyector con boquilla principal móvil fue utilizado.

Posteriormente los estudios de Sun (1996), mostraron que el uso de bombas chorro de geometría variable puede alcanzar un rendimiento óptimo en virtud de diversas condiciones de funcionamiento.

Aly et al. (1999) describe un modelo de simulación por computador para eyectores de chorro de vapor. El modelo fue desarrollado aplicando las ecuaciones de continuidad, de momentum y de energía para el funcionamiento individual de la boquilla (tobera), cámara de mezcla y difusor, para ello se utilizaron dos enfoques diferentes para las restricciones hechas en cada una de las partes. Igualmente se investigó el efecto de la presión del vapor motriz, la temperatura del evaporador y el aumento de presión a través del eyector para la relación de flujo, fluido motriz - fluido secundario.

Finalmente, para probar la bondad de los modelos se compararon los resultados con los gráficos empíricos de Power (1994), encontrándose que están muy cercanos.

La mayoría de los trabajos teóricos publicados se basan en estudios unidimensionales de la bomba chorro utilizada para sistemas de refrigeración y aire acondicionado, en los cuales se supone que la presión es constante en la zona de mezcla de los dos fluidos de la bomba, el primer desarrollo bajo esta teoría fue hecho por Keenan et al., (1950). En este desarrollo, varias suposiciones

fueron hechas, como el comportamiento de los fluidos como un gas ideal, las velocidades de entrada y de salida de los fluidos son despreciables, la mezcla entre los fluidos primario y secundario se produce a presión constante, a partir de un punto en que el fluido secundario alcanza una cierta distancia de la salida de la boquilla (tobera). Sin embargo, el proceso de mezcla en una bomba chorro no es sencillo, como fue verificado experimentalmente por Desevaux (2001), mediante una investigación utilizando un método óptico para visualizar cualitativamente los fenómenos de la mezcla. Más recientemente, el análisis de CFD (Computational fluid dynamics), usando el software FLUENT (Varga et al., 2009), ha demostrado ser una herramienta valiosa para la comprensión y el análisis de los problemas en el flujo de fluidos complejos, tales como los que se presentan en los procesos de arrastre y de mezcla en las bombas chorro.

Otro factor que se debe tener en cuenta para el diseño de las bombas chorro, además de considerar la presión constante en la zona de mezcla de los dos fluidos, es el factor geométrico. En este sentido Chunnanond & Aphornratana (2004) y Aphornratana & Eames (1997), han hecho investigaciones experimentales para determinar la influencia en el rendimiento COP (coeficiente de operación) de la posición de la salida de la boquilla, con respecto a la entrada de la sección convergente del difusor. En este último caso, se constató experimentalmente que el punto óptimo de esta posición depende de las condiciones de funcionamiento.

Pianthong (2007) analizó el desempeño de una bomba chorro de vapor para diferentes condiciones de funcionamiento y algunos factores geométricos (posición de la salida de la boquilla y la longitud de la garganta del difusor). Dicho análisis se realizó con un modelo de computador en 3D, en el cual se encontró que la posición de la salida de la boquilla afecta tanto a la contrapresión crítica como a la relación de arrastre, y que existe un punto óptimo en el cual la bomba chorro trabaja eficientemente, en cada una de las variables analizadas. Pianthong encontró que variando la posición de salida de boquilla en un rango de 15 a 10 mm desde la entrada de la cámara de mezcla se logra un incremento en la relación de arrastre, a medida que esta posición se aleja de la entrada de la cámara. Otro factor geométrico importante que

afecta el rendimiento de la bomba chorro es la relación de áreas entre el área de la garganta de la boquilla y el área de la garganta de la sección constante del difusor. En general, cada vez que aumente esta relación se incrementa la relación de arrastre y disminuye la contrapresión crítica y por lo tanto un valor óptimo debería existir, en función de las condiciones de funcionamiento (características de los fluidos primario y secundario) (Varga et al., 2009).

Varga et al. (2009) analizó el rendimiento de la bomba chorro en función de tres factores geométricos: relación de áreas entre el área de la garganta de la boquilla y el área de la garganta de la sección constante del difusor; posición de la salida de la boquilla con respecto a la entrada de la sección convergente del difusor y la longitud del área constante del difusor, para ello utilizó el CFD, y su objetivo era hallar el diseño óptimo de la bomba, utilizando agua como fluido de trabajo y ser utilizado en aplicaciones con aire acondicionado.

Las conclusiones más importantes de la investigación de Varga, fueron, que utilizando una temperatura de 90°C para el generador de vapor motriz y de 10°C para el fluido secundario en el evaporador; la ubicación óptima para la salida de la boquilla con respecto a la entrada de la sección convergente del difusor es de 60 mm, la longitud del área constante del difusor es de 155mm, por encima de este valor se incrementa la contrapresión crítica, la relación de áreas entre el área de la garganta de la boquilla y el área de la garganta de la sección constante del difusor es de 22, siendo estos valores los puntos óptimos de trabajo de la bomba chorro para la aplicación anterior.

De acuerdo a lo anterior las bombas chorro tienen unas dimensiones, una geometría y unas características específicas de los fluidos utilizados para cada aplicación, por lo que las investigaciones se han enfocado a hallar estas dimensiones para cada aplicación en particular, pero la mayoría de estas investigaciones se han enfocado a sistemas de refrigeración y aire acondicionado, dejando de lado otras aplicaciones de la bombas chorro como es la generación de vacío en la destilación de líquidos, como es el caso del etanol.

4. CONCLUSIONES

El diseño de la boquilla o tobera, es la parte más importante de la bomba chorro, ya que un diseño inadecuado puede causar ondas de choque y expansiones innecesarias del fluido motriz, que no permiten obtener el número de Mach necesario a la salida de la tobera para la producción del vacío necesario para la destilación del etanol.

Para el caso del etanol las mejores condiciones de funcionamiento y por tanto las mejores dimensiones y geometría de la bomba chorro, se obtendrán para la presión motriz y presión a la salida de la tobera que entreguen un vacío de 6 kPa, con el mayor coeficiente de arrastre (*entrainment ratio*) y el mayor número de Mach a la salida de la tobera.

Las bombas chorro no requieren de energía eléctrica para su funcionamiento como las bombas de vacío, debido a que es una bomba estática, constituida principalmente por una boquilla, un difusor y la cámara de succión o cuerpo, que utiliza la energía de un fluido primario a presión, llamado también fluido motor, que puede ser agua, aire, vapor u otro tipo de fluido provenientes de otros procesos, para generar vacío, aspirar, mezclar y comprimir un fluido secundario, también llamado fluido aspirado, por ejemplo, agua, aire, vapor u otros fluidos, según el principio de Bernoulli. Lo anterior permite reducir los costos de producción del etanol al reducirse los costos de consumo de energía eléctrica de la bomba de vacío mecánica al reemplazarla por una bomba chorro.

5. REFERENCIAS

- Alaa, F., Dieter, M., Klaus, O., (2002); On the integration of jet ejectors into hybrid dehydration processes. *Journal of Membrane Science* 196, 79-84.
- Alexis, G.K., Rogdakis, E.D. (2003); A verification study of steam-ejector refrigeration model. *Applied Thermal Engineering* 23 29–36.
- Aly, N.H., Karameldin, A., Shamloul, M.M. (1999); Modelling and simulation of steam jet ejectors, *Desalination*, 123, 1–8.

- Anaya, A., Gonzalez, E., Pérez, M.T., Robles, P.E. (1986); Desarrollo de Tecnología de Diseño de Eyectores, En: Instituto Mexicano del Petróleo, México: Vol. 18, No. 2, pp 65-77. Abril.
- Aphornratana, S., Eames, I.W. (1997); A small capacity steamejector refrigerator: experimental investigation of a system using ejector with movable primary nozzle. *Int. J. Refrigeration* 20 (5), 352–358.
- ASOCAÑA (Asociación Colombiana de cultivadores de caña de azúcar). (2004); Informe anual, disponible en: www.asocaña.com.co.
- Butrymowicz, D., Karwacki, J., Trela, M., (2006); Investigación experimental de eyector bifásico para refrigeración. 6a Conferencia internacional de compresores y refrigerantes, celebrada en Casta Papiernicka, República de Eslovaquia.
- Cizungu, K., Mani, A., Groll, M. (2001); Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids. *Appl. Therm. Eng.* 21, 585–598.
- Chang, Y.J., Chen, Y.M. (2000); Enhancement of a steam-jet refrigerator using a novel application of the petal nozzle. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 22, 203–211.
- Chunnanond, K., Aphornratana, S. (2004); An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector. *Appl. Therm. Eng.* 24, 311–322.
- Decreto 1135, (2009); En el cual se modifica el Decreto 2629 de 2007, en relación con el uso de alcoholes carburantes en Colombia y con las medidas aplicables a los vehículos automotores que utilicen gasolinas para su funcionamiento. Colombia: Diario Oficial núm. 47308, 31 de Marzo.
- Desevaux, P. (2001); A method for visualizing the mixing zone between two co-axial flows in an ejector. *Opt. Lasers Eng.* 35, 317–323.
- Eames, I.W. (2002); A new prescription for the design of supersonic jet pumps: the constant rate of momentum change method. *Appl. Therm. Eng.* 22, 121–131.
- Eames, I.W., Aphornratana, S., Haider, H., (1995); A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator. *Int. J. Refrigeration* 18 (6), 378–386.
- El-Dessouky, H., Ettouney, H., Alatiqi, I., Al-Nuwaibit, G., (2002); Evaluation of steam jet ejectors. En: *Chemical Engineering and Processing* 41 551–561.

- GEA Wiegand GmbH, (2009); Jet Vacuum Systems Hinkel & Junghans, Werbeagentur, KA.
- Godefroy, J., Boukhanouf, R., Riffat, S. (2007); Design, testing and mathematical modelling of a small-scale CHP and cooling system (small CHP-ejector trigeneration). *Appl. Therm. Eng.* 27, 68–77.
- Hernandez, J.I., Dorantes, R.J., Best, R., Estrada, C.A. (2004); The behaviour of a hybrid compressor and ejector refrigeration system with refrigerants 134a and 142b. *Appl. Therm. Eng.* 24, 1765–1783.
- Huang, B.J., Chang, J.M., (1999); Empirical correlation for ejector design. *Int. J. Refrigeration* 22, 379–388.
- Keenan, J.H., Neuman, E.P., Lustwerk, F. (1950); An investigation of ejector design by analysis and experiment. *ASME J. Appl.Mech.* 72, 299–309.
- Lynd L.R. (1996); Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: Technology, Economics, the Environment, and Policy. *Annu. Rev. Energy Environ.* 21: 403-465.
- Manrique, J.A., (2001); *Termodinámica*. 3ed. México: Oxford University press. Pp. 475-499.
- Martin K., (2000); Why solid waste managers should look at the ethanol option. *BioCycle*, Vol.41, No. 2.
- Meirelles, A., Telis, V., (1994); Mass transfer in extractive distillation of ethanol/water by packed columns. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 27 no. 6, 824-827.
- Montoya, M., Quintero, J.A., Sánchez, O.J., Cardona, C.A., (2005); Efecto del esquema de separación de producto en la producción biotecnológica de alcohol carburante. En: II simposio sobre biofábricas. Medellín.
- PIAB, (2009); Catálogo de Bombas chorro de vacío.
- Pianthong, K., Sheehanam, W., Behnia, M., Sriveerakul, T., Aphornratana, S., (2007); Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. *Energy Convers. Manag.* 48, 2556–2564.
- Power, B.R., (1994); *Steam Jet Ejectors for Process Industries*, McGraw-Hill, New York. 235-250.
- Quintero, J.A., Montoya, M.I., Sánchez, O.J., Cardona, C.A., (2007); Evaluación de la deshidratación de alcohol carburante mediante

- simulación de procesos. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Vol 5 No. 2, agosto.
- Sankarlal, T., Mani, A. (2007); Experimental investigations on ejector refrigeration system with ammonia. *Renew. Energy* 32, 1403–1413.
- Satkofsky, A. (2002); Evaluation of a biomass entrepreneur. *BioCycle*, vol.43, pp. 37-9.
- Schneegurt, M.A., Jain J.C., Menicucci, J.A. (2001); Biomass byproducts for the remediation of wastewaters contaminated with toxic metals, *Environmental Science & Technology*, vol. 35, 3786 - 379.
- Sun, D.W. (1996); Variable geometry ejectors and their applications in ejector refrigeration systems, *Energy* 21 (10) 919–929.
- Swoboda, R., (2002); Corn cellulose on the menu, *Wallaces Farmer*, 127, 11, BI/INFORM Trade & Industry, pp. 20, Aug.
- Tally, S., (2002); Making biofuel from corn stover. *BioCycle*, 43, 11, ABI/INFORM Global, 62, Noviembre.
- Uyazan, A.M., Gil, I.D., (2003); Simulación de la deshidratación de etanol azeotrópico por destilación extractiva. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Uyazan, A.M., Gil, I.D., Aguilar, J.L., Rodríguez, G., Caicedo, L.A., (2004); Deshidratación del etanol. *Ingeniería e investigación*, diciembre, vol. 24, # 003. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Varga, S., Oliveira, A.C., Diaconu, B. (2009); Numerical assessment of steam ejector efficiencies using CFD. *Int. J. Refrigeration* in press, 10.1016/j.ijrefrig. 01.007.
- Gamisans, X., Sarra. M., Lafuente, F.J., (2004); Fluid flow and pumping efficiency in an ejector-venturi scrubber. *Chemical Engineering and Processing* 43, 127–136
- Yapici, R., Ersoy, H.K., Aktoprakoğlu, A., Halkacı, H.S., Yiğit, O., (2008); Experimental determination of optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio. *Int. J. Refrigeration* 31, 1183–1189.
- Yu, J., Chen, H., Ren, Y., Li, Y., (2006); A new ejector refrigeration system with an additional jet pump, *Applied Thermal Engineering* 26, 312–319.