

**Estudio teórico de inyectores para combustibles alternativos.****Theoretical study of injectors for alternative fuels.****Estudo teórico de injetores para combustível alternativos.****Samir Boset Rojas Chávez<sup>1</sup>, Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque<sup>2</sup>.****Resumen**

La inyección de hidrocarburos es una etapa importante en la combustión, donde está involucrado el proceso de atomización, el cual consiste en desintegrar en pequeñas gotas, el combustible, por un inyector para así agregar mayor área de transferencia. El tamaño de gotas generadas por el inyector debe de ser menores a 80  $\mu\text{m}$  para que pueda asegurarse así una buena combustión y evitar los contaminantes como el CO y NOx. En esta investigación se procura dar realce al uso de hidrocarburos alternativos de poca emisión, los cuales cuentan con viscosidades elevadas que dificultan la tarea de llegar a un correcto diámetro de gotas. Este tipo de estudio precisa de ser abordado, en primer lugar, de manera teórica para poder comprender las similitudes que contienen el mismo proceso de atomización con diferentes combustibles. De modo que, se realizó la revisión de libros y papers referidos al tema, de donde se obtuvo las relaciones que guardan los diferentes inyectores con los parámetros de diseño, variables de estado y tasas del flujo aire/combustible, los que influyen directamente en la calidad de la atomización.

*Palabras clave:* Atomización, combustibles alternativos, inyectores.

**Abstract**

The hydrocarbon injection is an important stage in the combustion, where the atomization process is involved, which consists in disintegrating in small drops, the fuel, by an injector to add a larger transfer area. The droplet size generated by the injector should be less than 80  $\mu\text{m}$  so that a good combustion can be ensured and avoid contaminants such as CO and NOx. This research seeks to highlight the use of alternative low emission hydrocarbons, which have high viscosities that make it difficult to reach a correct droplet diameter. This type of study needs to be approached, first, theoretically in order to understand the similarities that contain the same atomization process with different fuels. Therefore, a review of books and papers on the subject was carried out, from which the relationships between the different injectors were obtained with design parameters, state variables and air / fuel flow rates, which directly influence the quality of atomization..

*Keywords:* Atomization, nozzles, alternative fuels.

**Resumo**

A injeção de hidrocarbonetos é uma etapa importante na combustão, que está envolvida no processo de atomização, a qual consiste em desintegrar em pequenas gotas o combustível por um injetor para adicionar uma maior área de transferência. O tamanho da gota gerada pelo bocal deve ser inferior a 80  $\mu\text{m}$  de modo que possa assim garantir uma boa combustão e impedir que os contaminantes, tais como o CO e NOx. Esta investigação visa aumentar o uso de hidrocarbonetos de baixa emissão alternativos, que têm altas viscosidades que dificultam a tarefa de alcançar um diâmetro correto de gotas. Este tipo de estudo exige ser abordadas, primeiro, teoricamente para compreender semelhanças contendo o mesmo processo de atomização com diferentes combustíveis. Assim, a revisão de livros e papers relativos ao assunto foi conduzido, onde as relações que mantêm os diferentes inyectores com parâmetros de projeto, variáveis de

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería en Energía. Bachiller. Universidad Nacional del Santa. Chimbote. Perú. [samir.rojaschavez@hotmail.com](mailto:samir.rojaschavez@hotmail.com).

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería en Energía. Maestro. Universidad Nacional del Santa. Chimbote. Perú. [roberto\\_chucuya@yahoo.es](mailto:roberto_chucuya@yahoo.es). <http://orcid.org/0000-0001-9175-5545>

Recibido: 15/04/2017      Aceptado: 12/05/2017

estado e as taxas de fluxo de ar / combustível é obtido, que influenciam diretamente a qualidade atomização.

**Palavras-chave:** atomização, injetores, combustíveis alternativos.

## Introducción

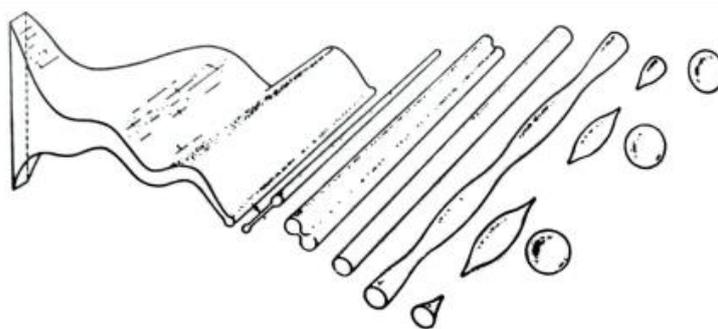
Desde el siglo XIX, la humanidad hizo uso del petróleo como combustible. Sin embargo, este recurso se está volviendo escaso en nuestro planeta. Bajo la nueva visión de sostenibilidad, la cual exige que cualquier proceso esté en armonía con el medio ambiente, la sociedad y la economía; necesitamos nuevas alternativas que atiendan estos tres parámetros. Actualmente, hablamos de combustibles alternativos, los cuales ofrecen una alternativa muy interesante al diésel mineral en relación a las emisiones nocivas, desgaste, costo y disponibilidad.

Los inyectores son responsables de la atomización del combustible para un proceso de combustión, por ejemplo, en un motor o en un horno. La atomización es un proceso caracterizado por la transformación de una masa de líquido en un spray o en otra dispersión física de pequeñas gotas en una atmósfera gaseosa, esto es realizado por la energía cinética que transporta el fluido (Lefebvre, 1989). La energía que lleva la masa surge de la presión que viene de línea de admisión. En esta investigación se estudiará el proceso de atomización (Ashgriz, 2011), así como diferentes combustibles (Bae, Kim, 2016). También se estudiarán específicamente los parámetros de inyección de los combustibles alternativos (Kegl, Hribernik, 2006).

El estudio de los inyectores para combustibles alternativos como biodiesel, etanol, aceite pirolítico, etc; es una línea de investigación muy importante en estos últimos años, ya que su progreso proporciona alternativas a los procesos industriales. Los inyectores tipo Y son muy utilizados en la generación de vapor, generación de energía eléctrica y hornos en donde cumplen la función de atomizar en pequeñas gotas el combustible líquido que se desea ingresar a la cámara de combustión. La mayoría de combustibles, actualmente utilizados, tales como Diesel, Fuel Oil, Jet Fuel, petróleo, etc., son alternativas que han causado mucho daño a nuestra a nuestro planeta. En vista de que la población es dependiente de la energía, nuevas soluciones han surgido, hidrocarburos como el metanol, hidrógeno, propanol y biodiesel son la alternativa para poder seguir generando la energía necesaria pero sin contaminar. Para estas nuevas alternativas se necesitan cambios tecnológicos en los accesorios que forman parte de la combustión, en este trabajo no enfocamos en la atomización en el inyector, para lo cual será necesario un estudio de los principales parámetros que influyen en este proceso.

Estos estudios necesitan un análisis teórico y experimental de las diferentes variables involucradas en el proceso de atomización. Algunos trabajos experimentales publicados en periódicos internacionales son los trabajos de Cai, Li y Tian (2016), Kegl y Hribernik (2006), Khalid (2014) y Suh y Lee (2008). Los trabajos arriba citados comparan resultados numéricos con datos experimentales de los sistemas de inyección. Los fundamentos de la mecánica de los fluidos pueden ser aplicados para descubrir cuánto de energía es necesario para alcanzar las velocidades requeridas y presión adecuada para conseguir una atomizada adecuada. El flujo en un inyector fue analizado por Volmajer y Kegl (2001), en el que se utilizó un modelo de ordenador y el software CFD program FIRE, a fin de encontrar la tasa de flujo, los resultados numéricos se compararon con los datos experimentales obtenidos en un inyector Bosh DLLA 147 S. Para poder abordar una investigación en inyectores, son necesarios los resultados experimentales, los cuales son incluidos en la teoría, por la naturaleza teórico experimental de la atomización.

En procesos de combustión es necesario que el combustible líquido sea desintegrado en gotas pequeñas para asegurar una rápida vaporización y transferencia de calor. El principio fundamental de la desintegración de un líquido consiste en el incremento del área superficial hasta quedar inestable y dividirse en pequeñas gotas. El proceso por el cual el líquido se transforma en gotas depende de la naturaleza del flujo y de la geometría del atomizador. El mecanismo básico, consiste esencialmente en la ruptura de los hilos inestables de líquido en columnas de gotas, donde la ruptura es dependiente de la longitud y la circunferencia de la columna de líquido (Figura 1) (Quispe, Carvalho y Costa, 2011, Beér y Chigier, 1983).



**Figura 1. Proceso ideal de la formación de gotas a partir de una lámina líquida.**

**Fuente:** Beer y Chigier, 1983.

Para cada tipo de atomizador, el tamaño medio de la gota y la distribución del tamaño de las gotas en el spray son muy dependientes del atomizador condiciones de funcionamiento, las propiedades del líquido atomizado y del medio circundante. Los principales tipos se muestran a continuación.

#### a) Atomizadores por presión

Cuando un líquido es descargado bajo presión por una pequeña abertura, la entalpía del líquido se convierte en energía cinética proporcionando una velocidad relativa elevada entre el líquido y el gas circundante, acelerando y desintegrando el líquido en pequeñas gotas por efecto de la turbulencia generada.

El mecanismo de atomización de estos atomizadores se basa en la capilaridad o la ruptura caótica del chorro u hoja de líquido expulsado con alta velocidad de la boquilla bajo elevada presión de la inyección. Son diseñados con pequeños orificios de salida que no son apropiados para líquidos viscosos, debido a la obstrucción que puede ocurrir. En esta categoría están: inyector de orificio (simple orificio), centrífugo simple (pressure-swirl simplex), inyector de centrifugado dual (Presión swirl dual), inyector centrifugado con retorno (pressure swirl con spill return), y con spray en abanico.

#### b) Atomizadores rotativos

El fluido se inserta en un disco o un vaso rotativo de alta rotación, que transmite una cantidad de movimiento angular para el fluido. El líquido fluye radialmente hacia la periferia del disco y se descarga al ambiente en virtud de la alta velocidad tangencial adquirida, es por eso que el grado de atomización depende de la velocidad periférica, las propiedades del líquido y el caudal.

En comparación, con los atomizadores por presión, permiten una variación independientemente del caudal y la velocidad del disco, proporcionando una mayor flexibilidad en la operación.

#### c) Atomizadores con dos fluidos

Incluye atomizadores asistidos por aire (air assist) y por ráfaga de aire (airblast) que utilizan la velocidad del aire para la quiebra del chorro o la hoja del líquido, primero en ligamentos, y después en gotas.

La diferencia entre ellos, es la velocidad y cantidad de aire utilizado en la atomización, el inyector por ráfaga de aire (airblast) hace uso de altas cantidades de aire o vapor en comparación con los asistidos de aire (air assist).

El atomizador efervescente es un caso especial de atomizador de dos fluidos con mezcla interna, donde las burbujas de aire o gas se dispersan en la corriente de líquido. En estos inyectores el aire de atomización se inyecta directamente en el líquido en una cámara de mezcla anterior orificio de descarga. El gas inyectado forma burbujas que dan lugar a una mezcla bifásica. Al mismo tiempo,

pasar por el orificio de salida del inyector, la mezcla experimenta una rápida disminución en la presión, causando la expansión del gas y generando fuerzas de burbuja, por encima de la tensión superficial. A la expansión del gas causa la explosión de las burbujas y desintegra el líquido, creando un fino spray.

Estos inyectores requieren una pequeña cantidad de aire para producir un spray muy fino. El mecanismo de ruptura del líquido con un inyector efervescente es fundamentalmente diferente de los inyectores por presión, asistidos por aire (air-assist) y ráfagas de aire (airblast).

Comparado con un inyector airblast, los inyectores efervescentes presentan ventajas tales como como la formación de un spray con gotas más finas para una amplia gama de condiciones de la operación.

## Material y método

El presente estudio presenta un análisis teórico de los inyectores para combustibles alternativos como glicerol, etanol, y aceite pirolítico para mostrar las consideraciones de su uso para la quema en hornos industriales turbinas y motores de combustión interna.

Inicialmente se evaluarán las propiedades de los combustibles, analizando la influencia de la viscosidad en el proceso de atomización.

Se presentará un cálculo basado en la teoría unidimensional del flujo monofásico para determinar proyectar un inyector tipo Y. Así también, se propondrá la geometría de un inyector efervescente. Ambos inyectores proporcionan buenos parámetros de atomización para fluidos de alta viscosidad.

Se realizará un análisis teórico-experimental sobre el funcionamiento del inyector tipo Y en condiciones de régimen subsónico. Se aplicarán las gotas del spray producido por el arma, con diferentes tipos de combustibles líquidos.

Para la realización del estudio se proyectarán dos inyectores, uno de tipo Y-Jet y otro de tipo efervescente, los cuales presentan ventajas de producir pequeñas gotas en un amplio intervalo de operación. El inyector tipo Y es de geometría simple y de fácil construcción. El diseño del inyector efervescente es más complejo, además de tener varios parámetros que influyen la calidad de atomización.

Estos inyectores se caracterizarán por utilizar agua, aceite diesel y los diferentes combustibles alternativos como líquidos de prueba. Los gases como el aire y el helio se utilizarán como gas de atomización. Se comparan las características de los sprays producidos por los inyectores bajo estas condiciones de las pruebas. El helio se utiliza para comparar las características del spray cuando el líquido se atomiza con gases más ligeros que el aire (Chumpitaz, 2016; Quispe, 2013).

## Resultados

Son varios los factores que afectan la calidad de la atomización, el diámetro de las gotas y la facilidad para romper los hilos y ligamentos del líquido después de salir del inyector.

### 1) Masa específica

Al atomizar líquidos de mayor masa específica, se produce un incremento en el tamaño de las gotas y, en consecuencia, se incrementa el trabajo para obtener una buena atomización. Además, la masa específica, tiene un efecto en el caudal del líquido; cuanto menor sea la masa específica del líquido, mayor será la velocidad en la salida del inyector y viceversa.

### 2) Viscosidad

El incremento de la viscosidad provoca una disminución en el caudal másico, generando grandes esfuerzos cizallantes, precisando una mayor presión para mover el fluido, mantener el ángulo del

cono del spray y la amplitud. El incremento de la viscosidad provoca un aumento del tamaño de las gotas, además de requerir una mayor potencia de alimentación.

### 3) Temperatura

Aunque los cambios de temperatura no afectan el rendimiento del inyector, si afecta las propiedades del líquido, como la viscosidad, la masa específica y la tensión superficial.

### 4) Tensión superficial

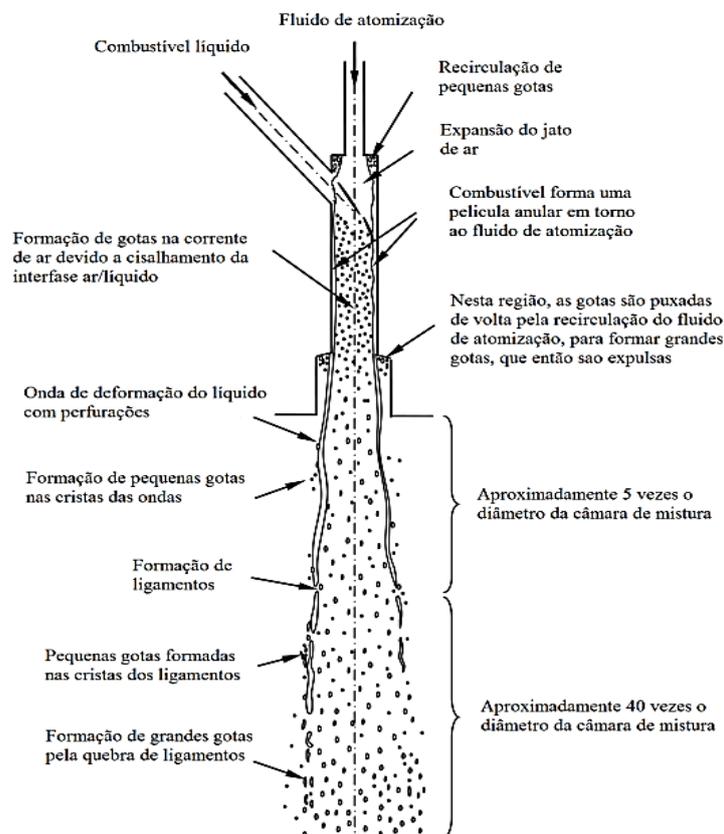
Un aumento en la tensión superficial del líquido incrementa el tamaño de las gotas y la presión mínima de operación, además de disminuir el ángulo de cono del spray (Quispe, 2013).

## **Inyectores de mezcla interna del tipo Y**

Es un atomizador eficiente de doble fluido, con mezcla interna de multi-orificio, con boquillas del tipo Y, han sido ampliamente utilizadas en calderas de aceite, hornos industriales, pulverizadores agrícolas, secados por spray (spray dryer) y sprays de pintura. El inyector tipo Y, es un del tipo de inyector asistida por aire, ya que cuenta con un fluido auxiliar a alta velocidad, sobre el combustible líquido, siendo influenciado el rendimiento de la atomización por la presión en la inyección, las propiedades del líquido y el gas son configuración geométrica del inyector (Lacava, Pimenta y Carvalho, 2004; Song y Lee, 1996).

Estos inyectores inicialmente desintegran el combustible líquido dentro de una cámara de mezcla, generando gotas y una capa fina que se adhiere a la pared de la cámara, prosiguiendo se rompe esta capa fuera del inyector. El combustible ya desintegrado en finas gotas se dispersa dentro de la cámara de combustión, donde ocurre la quema de estas gotas.

El proceso físico de atomización del inyector del tipo Y se muestra en la Figura 2, donde combustible líquido se inyecta en la cámara de mezcla con un ángulo determinado, mientras que el fluido de atomización (aire o vapor comprimido) se introduce en la cámara central con la presión necesaria para proporcionar condiciones sónicas al chorro de salida. El combustible líquido forma una película anular alrededor de la pared de la cámara de mezcla, con el chorro atomizado a alta velocidad pasando por el centro a lo largo de la cámara de mezcla. Una cierta atomización ocurre en la cámara de mezcla, pero la mayor cantidad sale de la cámara en forma de láminas de líquido, que son desintegradas en ligamentos y luego en gotas. La segunda atomización ocurre a continuación, fuera del atomizador por algunos 50 diámetros de la cámara de mezcla, aguas abajo.



**Figura 2. Atomización del líquido en un inyector tipo Y.**

**Fuente:** Mullinger y Chigier, 1974.

El proceso se ve afectado por la relación aire / combustible, la geometría de la cámara de mezcla y velocidad del líquido atomizador (Chigier, 1976).

Song y Lee (1996), hicieron la descripción del mecanismo de atomización basadas en la visualización del flujo de agua con aire. La primera se llama "modo de colisión directa", se muestra en la Figura 3, se caracteriza por el choque de la corriente de aire con el líquido, generando gotas cerca de la salida del líquido. La siguiente región, B es la región "modo de arrastre / deposición" que presenta una película delgada circunferencial, no uniforme, en una amplia franja, donde las gotas son generadas por el corte del chorro de aire a alta velocidad y el anillo de líquido en la pared de la cámara. Al mismo tiempo, en esta zona algunas gotas ya generadas por el modo de colisión directa se aglutinan y depositan en la película líquida. Así, la longitud de la puerta de mezcla desempeña un papel primordial en esta zona de flujo de niebla-anular, porque las posibilidades de arrastre / deposición de las gotas se incrementa con el incremento de la cámara de mezcla, una vez que el tiempo de residencia se vuelve más largo y la superficie interfacial entre el aire y la película de agua también aumenta. La atomización por el "modo de desintegración de la película líquida" (región C) también se ve afectada por la longitud de la cámara de mezcla debido al movimiento entre el aire y el chorro de agua. La Tabla 1 muestra un resumen del mecanismo descrito.

**Tabla 1. Resumen de la descripción del mecanismo de atomización de un inyector tipo Y.**

| Región | Modo                                  | Fenómeno principal   |
|--------|---------------------------------------|--|
| A      | Colisión directa                      | -Gotas generadas por la colisión entre el chorro líquido y el fluido de atomización (gas).   |
| B      | Trayectoria de formación de gotas     | -Una película líquida es formada y el flujo de aire es distorsionada y direccionada en la dirección axial.<br>-Se generan gotas por el flujo de aire cizallante y por la entrada de aire al núcleo.<br>-Algunas gotas se aglutinan entre sí mismas y son depositadas en la película líquida. |
| C      | Desintegración de la película líquida | -La película líquida se desintegra en ligamentos y después en gotas largas fuera del atomizador.   |

Fuente: Song y Lee, 1996.

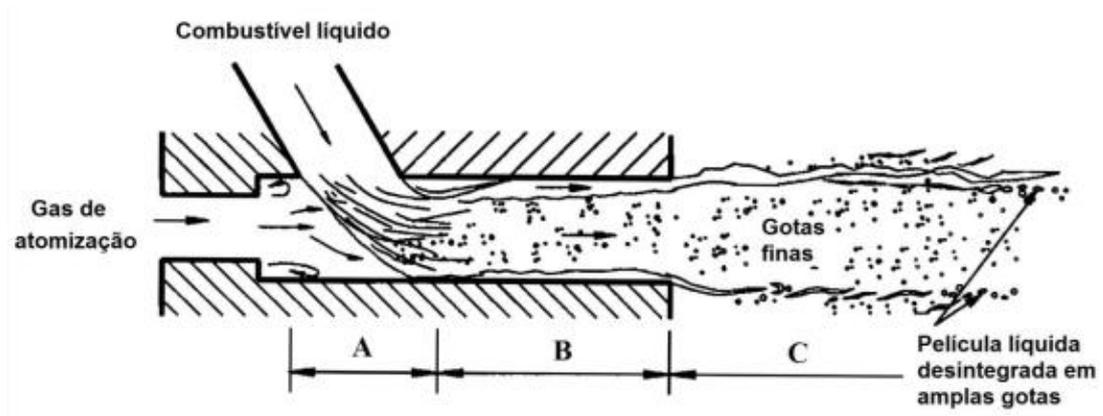
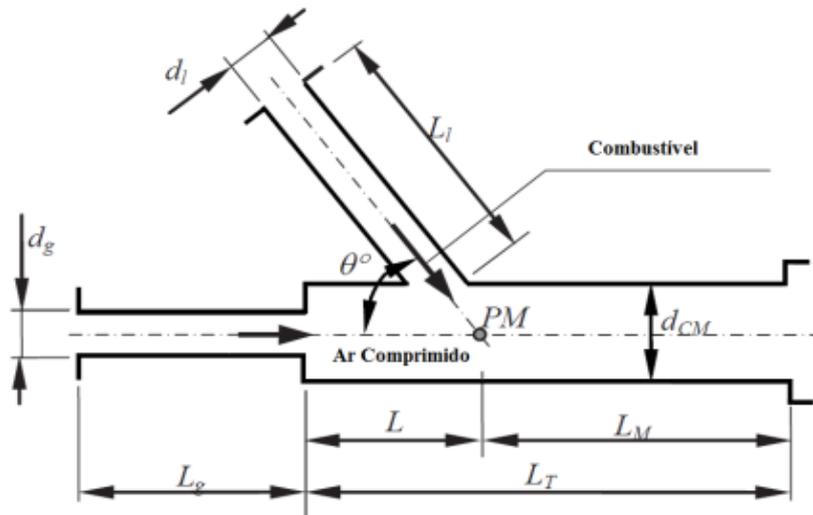


Figura 3. Ilustración esquemática del mecanismo de atomización en atomizadores tipo Y.

Fuente: Song y Lee, 1996.

La Figura 4, presenta un esquema típico de este tipo, donde el fluido auxiliar puede ser aire comprimido, o en caso de vapor en el proceso, como en calderas. También, la figura presenta las características geométricas que definen la configuración del inyector Y (Lacava, Pimenta y Carvalho, 2004).



**Figura 4. Esquema de un inyector tipo Y-Jet e sus principales dimensiones.**

**Fuente:** Mullinger y Chigier, 1974.

Entre los inyectores conocidos, los inyectores de tipo Y se clasifican como inyectores de chorro de aire de mezcla interna y son muy utilizados debido a:

- 1) Su configuración es relativamente simple, siendo adaptables para la construcción con materiales resistentes a la erosión y a la corrosión térmica.
- 2) El ángulo de pulverización (spray angle) no varía con el cambio del caudal de combustible o gas de atomización, lo que difiere de otros inyectores.
- 3) Una buena calidad del spray con bajo consumo del fluido auxiliar (gas de atomización). Capacidad de trabajo con combustibles altamente viscosos (Quispe, 2013).

Muchas metodologías fueron propuestas y estudiadas para el proyecto de atomizador tipo Y, siendo la metodología presentada por Mullinger y Chigier (1974), y luego utilizada por Lacava, Carvalho y Mc Quay (1998), Lacava, Pimenta y Carvalho (2004) y Quispe (2013), a metodología utilizada en este trabajo. Esta metodología contiene los parámetros del proyecto recomendados, los cuales se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Recomendaciones de las dimensiones de un atomizador tipo Y-jet.**

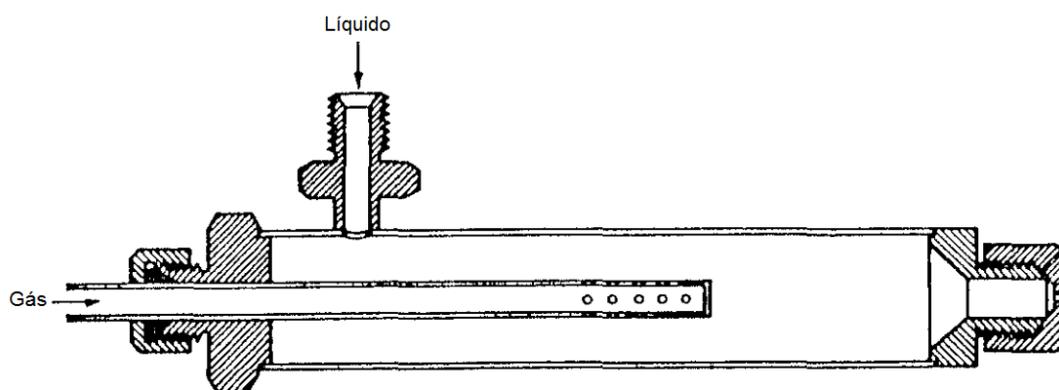
| Parámetro   | Recomendado       |
|---|-------------------|
| Diámetro de la línea de aire                        | $d_g$ (Calculado) |
| Diámetro de la línea de combustible                 | $d_l$             |
| Diámetro de cámara de mezcla                        | $d_{CM}$          |
| Longitud de pre-mezcla                              | $L$               |
| Longitud de mezcla                                  | $L_M$             |
| Longitud total de la cámara                         | $L_T$             |
| Longitud de la línea de aire                        | $L_g$             |
| Longitud de la línea de combustible                 | $L_l$             |
| Ángulo entre los ejes de las líneas de alimentación | $\theta$          |

**Fuente:** Mullinger y Chigier, 1974.

### Inyectores efervescentes

La técnica de la atomización efervescente fue desarrollada a finales de 1980 por Lefebvre y sus colaboradores, siendo descrita, la técnica formalmente como: "atomización de líquido aerado" y no obtuvo el nombre de efervescente hasta 1990. El desarrollo del atomizador efervescente fue debido a las desventajas asociadas con la atomización flash y la disolución del gas de atomización. La atomización de flash depende de la rápida evaporación de una pequeña cantidad de líquido, porque en este estado (gaseoso) el volumen ocupado es mayor ocupando un volumen mayor a la salida de la boquilla. El problema con esta técnica es la baja tasa de crecimiento de las burbujas en líquido, y que está limitada a líquidos con alta volatilidad o tienen alto contenido de gas disuelto.

Una solución para el problema descrito fue la atomización efervescente. En la atomización efervescente, el gas se introduce (aire para el caso de la combustión) directamente dentro del caudal para crear un flujo de burbujas de dos fases. El método para inyectar el aire en el interior es el método de la inyección supercrítica, basado en la disolución (flashing) intermitente de gas en el líquido. Este tipo de atomizador se muestra en la Figura 5 (Lefebvre, 1989; Qian, Lin, 2011; Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).



**Figura 5. Atomizador de flujo efervescente.**

**Fuente:** Lefebvre, 1989.

Como el líquido que fluye a través del orificio de salida, es presionado por las burbujas y se forman ligamentos y hojas planas de líquido. Si la caída de presión es suficiente a lo largo del orificio de descarga, aquellas hojas planas son rotas en pequeñas gotas, debido a la rápida expansión de las burbujas del gas, que se encuentra en el orificio de descarga. Una de las principales ventajas del atomizador efervescente, es el uso eficiente del aire, es posible una buena atomización con un pequeño caudal del gas atomizador, siendo usado cuando el gas de atomización es escaso (Lefebvre, 1989).

Las ventajas del atomizador efervescente son:

- Buena atomización con una baja presión de inyección, y bajas tasas de flujo del gas. El tamaño del diámetro medio es comparable al obtenido para la misma tasa de gas / líquido con atomizadores de tipo asistidos por aire (Lefebvre, 1989).
- El sistema contiene grandes agujeros y pasajes, lo que reduce considerablemente los problemas (Tapado) que ocurren, por ejemplo, con combustibles residuales que, necesitan grandes orificios y pasos para evitar la obstrucción, se puede utilizar con soluciones viscosas, suspensiones, fluidos no newtonianos, etc. (Lefebvre, 1989).
- Para aplicaciones de combustión, la aireación del spray por las burbujas del aire disminuye hollín y humo en la salida (Lefebvre, 1989).

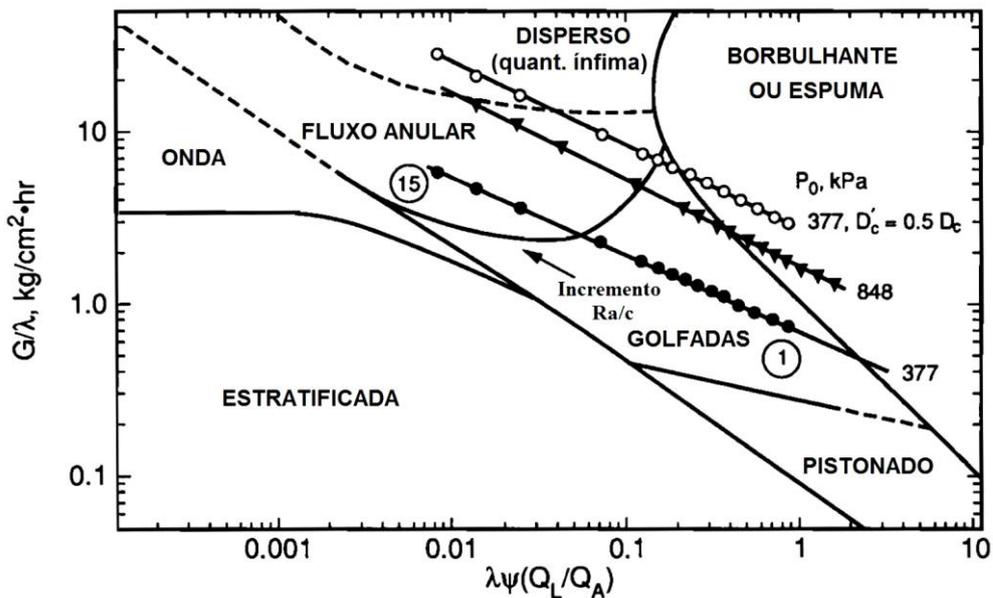
- La simplicidad del dispositivo permite una buena confiabilidad, resistencia, fácil mantenimiento y bajo costo (Lefebvre, 1989; Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).
- Para una determinada presión de inyección, se obtienen menores gotas en comparación otros tipos de atomizadores (Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).
- Las tasas de flujo de gas son menores en comparación con otras formas de producción atomización de fluido doble (Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001).
- El tamaño medio de la gota es insensible a la viscosidad del líquido, lo que permite el uso con varios líquidos sin modificar el rendimiento. (Sovani, Sojka y Lefebvre, 2001)

Desventaja

- La principal desventaja y la necesidad de suministro de gas a alta presión.

Los patrones de flujo que ocurren en un conducto son variables y con comportamiento en el caso de un conducto horizontal se determinaron experimentalmente diferentes tipos de regímenes: estratificada, ola, anular, de golf, pistón, dispersión y burbujeante.

El régimen burbujeante se caracteriza por la presencia de pequeñas gotas de aire dentro del cuerpo líquido, donde como en otros regímenes éste está determinado por las características del líquido, gas, y el conducto de fuga. El patrón de flujo para el flujo bifásico horizontal, puede ser previsto en la Figura 6.



**Figura 6. Regimes de fluxo para misturas ar/água num escoamento horizontal.**  
**Fuente:** Chin y Lefebvre, 1993.

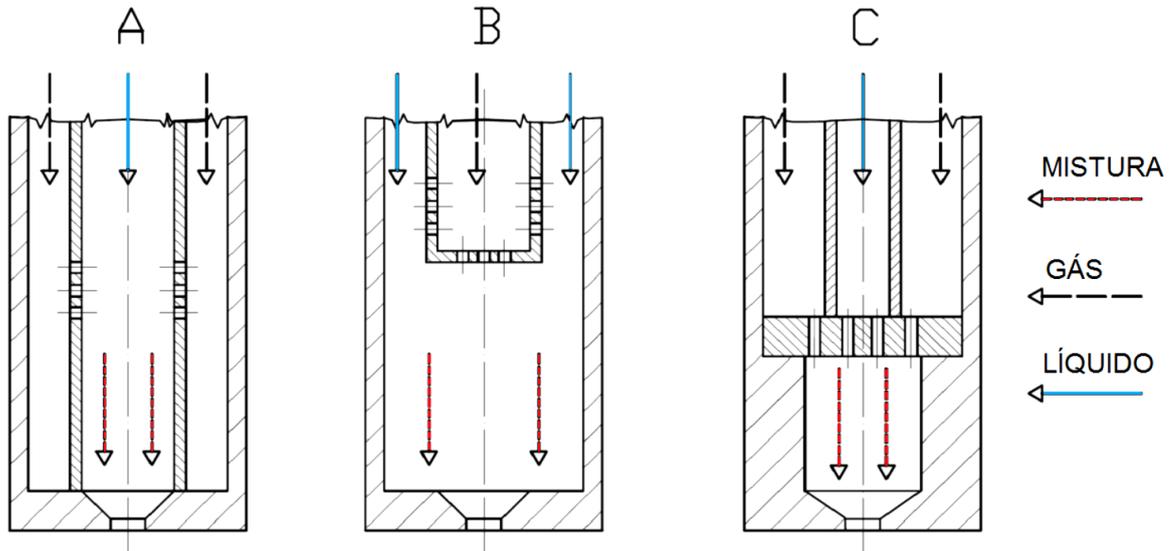
Donde se muestra la influencia de la tasa aire / líquido, presión y diámetro de la cámara de mezcla (ALR,  $D_c$ ,  $P$ ) en el régimen del flujo bifásico, donde  $G$  es el flujo másico del gas en  $kg / cm^2h$ , y:

$$\lambda = (\rho'_G \rho'_L)^{0.5} \quad , \quad \Psi = (\sigma')^{-1} (\mu'_L)^{1/3} (\rho'_L)^{-2/3}$$

Siendo,  $\rho'_L$ ,  $\mu'_L$  y  $\sigma'$  las tasas de viscosidad, masa específica y tensión superficial del suelo con los correspondientes valores del agua.

Los atomizadores efervescentes trabajan en el régimen de burbujas o burbujas, y por eso es importante el régimen de flujo en el atomizador, este tipo de atomizador aprovecha la presencia de pequeñas gotas en el flujo, las cuales se aceleran en la boquilla de salida del inyector aumento de presión en las gotas, las cuales al salir al ambiente (con presión atmosférica) explotan generando una mejor atomización con un menor gasto de energía.

Los atomizadores efervescentes son divididos en 3 grupos según la Figura 7.



**Figura 7. Esquemas simplificados de los diseños de las diferentes configuraciones de los atomizadores efervescentes, Tipo A, B, C.**

**Fuente:** Jedelsky, Jicha, 2009.

**Tipo A:** En este tipo el líquido fluye generalmente en el tubo central y el gas se introduce en el líquido por un conjunto de pequeños orificios. Esta configuración con inyección de gas de fuera para dentro permite un flujo del área líquida grande. Esta configuración evita la obstrucción, lo que es adecuado para las suspensiones. Esta es la más utilizada por los investigadores, pues la configuración con los fluidos intercambiados son menos usados. Esta configuración también se conoce como de tipo outside-inside.

**Tipo B:** El líquido fluye en el conducto anular y el gas se introduce en el líquido por un conjunto de los agujeros situados en los lados o en la parte final del aireador. Esta configuración también es conocida como inyector del tipo inside-outside.

**Tipo C:** Los dos flujos entran en la cámara de mezcla por separado, permitiendo el control independientemente de la velocidad de entrada, dirección y distribución del líquido y el gas.

## Material y método

El presente estudio presenta un análisis teórico de los inyectores para combustibles alternativos como glicerol, etanol, y aceite pirolítico para mostrar las consideraciones de su uso para la quema en hornos industriales turbinas y motores de combustión interna.

Inicialmente, se evaluó las propiedades de los combustibles, analizando la influencia de la viscosidad en el proceso de atomización. Se presenta un cálculo basado en la teoría unidimensional del flujo monofásico para determinar proyectar un inyector tipo Y. Así también, se propone la geometría de un inyector efervescente. Ambos inyectores proporcionan buenos parámetros de atomización para fluidos de alta viscosidad.

Se realizó un análisis teórico-experimental sobre el funcionamiento del inyector tipo Y en condiciones de régimen subsónico. Se aplicaron las gotas del spray producido por el arma, con diferentes tipos de combustibles líquidos.

Para la realización del estudio se proyectaron dos inyectores, uno de tipo Y-Jet y otro de tipo efervescente, los cuales presentan ventajas de producir pequeñas gotas en un amplio intervalo de operación. El inyector tipo Y es de geometría simple y de fácil construcción. El diseño del inyector efervescente es más complejo, además de tener varios parámetros que influyen la calidad de atomización.

Estos inyectores se caracterizarán utilizando agua, aceite diesel y los diferentes combustibles alternativos como líquidos de prueba. Los gases como el aire y el helio se utilizarán como gas de atomización. Se comparan las características de los sprays producidos por los inyectores bajo estas condiciones de las pruebas. El helio se utiliza para comparar las características del spray cuando el líquido se atomiza con gases más ligeros que el aire (Chumpitaz, 2016; Quispe, 2013; Rodriguez, 2016).

La influencia del tipo de atomizador está marcada por la propia geometría y el principio físico para la desintegración del líquido. Típicamente, los inyectores de orificio completo producen conos de atomización que tienen el mayor tamaño de gota seguido por sprays planos (fat spray) e inyectores de chorro cónico hueco (hollow cono). Esta tendencia se aplica también a los inyectores hidráulicos (hydraulic atomizing nozzles) e inyectores asistidos por aire (inyectores de fluido doble y asistidos por aire); sin embargo, los inyectores asistidos por aire suministran sprays con gotas muy finas que son menores en tamaño que las tradicionales obtenidas en inyectores hidráulicos.

El ángulo del cono del spray depende de la geometría del inyector. El ángulo del cono produce efectos inversos, ya que al aumentar la medida del ángulo del cono se reduce el tamaño de las gotas y viceversa.

Los parámetros de funcionamiento que afectan la atomización son el caudal másico, la presión de inyección y la razón entre el caudal másico del gas y el caudal de líquido (GLR).

El caudal másico del líquido tiene una relación directa con el tamaño de las gotas, ya que al aumentar el caudal másico del líquido el tamaño de las gotas aumenta y viceversa. La presión de la inyección tiene un efecto inverso sobre el tamaño de las gotas. El incremento de la presión reduce el riesgo tamaño de las gotas, sin embargo una reducción de la presión incrementa las medidas de ellas.

La razón másica de gas / líquido (GLR) se define como la razón del caudal másico del gas de atomización  $m_g$ , para el caudal del líquido,  $m_l$ .

$$GLR = \frac{m_g}{m_l}$$

Tiene una influencia directa ya que aumentando el GLR disminuye tanto el caudal másico del agua líquido y el diámetro de las gotas. El valor máximo del GLR se produce cuando el flujo de gas de la atomización alcanza las condiciones críticas.

En la Tabla 3, se resume la influencia de las propiedades anteriormente indicadas sobre el producto, rendimiento de la atomización.

**Tabla 3. Factores que afectan el desempeño de la atomización.**

| Característica del inyector | Incremento de la presión de operación | Incremento de la densidad | Incremento de la viscosidad                  | Incremento de la temperatura del fluido           | Incremento de la tensión superficial |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--|---|--------------------------------------|
| Calidad de distribución     | Mejora                                | Despreciable              | Se deteriora                                 | Mejora  | Despreciable                         |
| Tamaño de la gota           | Disminuye                             | Despreciable              | Aumenta                                      | Disminuye   | Aumenta                              |
| Angulo de cono              | Aumenta y luego disminuye             | Despreciable              | Disminuye                                    | Aumenta   | Disminuye                            |
| Caudal del líquido          | Aumenta                               | Disminuye                 | Cono lleno: Aumenta<br>Cono Plano: Disminuye | Depende del fluido atomizado y del inyector usado | Sin efecto                           |
| Velocidad de las gotas      | Aumenta                               | Disminuye                 | Disminuye                                    | Aumenta   | Despreciable                         |
| Desgaste del inyector       | Aumenta                               | Despreciable              | Disminuye                                    | Depende del fluido atomizado y del inyector usado | Sin efecto                           |

Fuente: Spray Systems Co., Technical Reference, <http://www.spray.com/cat70/index.html>

### Discusión

Según la literatura revisada, podemos decir que la atomización en los inyectores, de combustible alternativos, depende mucho del tipo por lo que hablaremos individualmente de ellos en cuanto a las conclusiones obtenidas de trabajos experimentales y teóricos.

Para el inyector de mezcla interna tipo Y que es diseñado y desarrollado para atomizar líquidos de viscosidad relativamente alta usando una baja presión de suministro de combustible y gas de atomización. Los resultados de Quispe Gonzales (2013) revelaron que el atomizador tiene una capacidad de suministro combustible bajo tasas de 0,5 a 3,0 g/s, utilizando una presión de inyección de aire en el rango de 150 hasta 800 kPa absolutos. En este trabajo, la presión del líquido de prueba se mantuvo constante, mientras que el caudal másico de aire se ha variado a lo largo de un intervalo de inyección de gas de atomización para obtener una amplia gama de razón de flujo de gas para caudal de líquido, GLR, en la rango de 0,05 - 0,45. A medida que el caudal de gas aumenta, los ligamentos iniciales se vuelven más cortos, siendo que la ruptura del ligamento que genera las gotitas ocurre más cerca de la salida del inyector. Así, cuando el caudal másico de gas de atomización se disminuye, el punto de la rotura de los ligamentos se mueve lejos de la salida del inyector.

Se ha demostrado que dentro del inyector de mezcla interna tipo Y, no pueden existir condiciones supersónicas. A lo máximo, el flujo puede ser sónico en la salida de la boquilla (entrada a la cámara de). Siendo subsónico luego hasta alcanzar el medio externo, a diferencia de lo sugerido por Pacifico (2000) sobre la observancia de velocidades ligeramente más grandes que las sónicas cerca del punto de mezcla.

El flujo del gas de atomización en régimen subsónico puede generar una atomización con moderada calidad, donde el diámetro medio de las gotas del spray alcanza medidas menores que 80  $\mu\text{m}$ . Los resultados experimentales muestran que la velocidad máxima dentro del inyector es orden de 180 m/s y el número de Mach alcanzado menor de 0,6. También se realizó una comparación para el flujo del gas, siendo tratado como adiabático e isentrópico y, seguidamente, sólo como isotérmico. Los resultados obtenidos muestran ligeras diferencias, por lo que el flujo fue tratado íntegramente como adiabático e isentrópico al ser este proceso más conocido.

## Conclusiones

Se ha comprobado que los diámetros de las gotas disminuyen con el aumento de la presión de inyección gas, además, existe un efecto de succión por parte del flujo gaseoso, explicando las diferencias sustanciales entre las presiones en ambas líneas de suministro.

Se presentó una propuesta para calcular el coeficiente de descarga del inyector. Puede ser como un sistema hidráulico, siendo que las pérdidas de carga (caída de presión) deben ser divididas entre la línea de suministro de líquido y el propio inyector. La caída de presión mínima calculada para la línea de suministro es aproximadamente igual al 20% de la caída de presión en todo el sistema (línea de suministro + inyector).

El atomizador efervescente fue operado en diferentes regímenes del flujo bifásico y se han observado varias características para poder establecer las franjas de operación en un régimen estable. Las observaciones visuales y sonoras se utilizaron para determinar los límites de régimen estable, siendo que el régimen de transición es abrupto y fácilmente distinguido por la eyección de los ligamentos de líquido que generan grandes gotas y el ruido audible que emite el inyector. El incremento de la razón GLR disminuye gradualmente las inestabilidades en el spray y comienza de nuevo a generar un spray con buen tamaño de gotas. Las fluctuaciones de presión y el ruido también son disminuidos.

Además se apreció la influencia del número de filas de orificio de aireación, observándose mejor rendimiento del inyector proyectado en este trabajo cuando se opera con tres o cuatro filas. La diferencia de presión en las líneas de líquido y gas fue de 2 - 3 kPa en el caso del agua destilada y 2 - 5 kPa en el caso de la mezcla compuesta de 60% etanol + 40% glicerina en peso.

También se observó que la dependencia de la razón GLR con la presión de inyección del líquido casi no depende del número de filas, pero ejerce una influencia en la geometría del inyector. El aumento del diámetro de salida del inyector  $\phi$  conduce a una disminución del rango de presiones de operación, siendo estas presiones menores cuando el diámetro de salida es mayor. La dependencia de la razón GLR con la presión de inyección no es lineal, posiblemente por la influencia dominante ejercida por la presión del líquido o de gas. El diámetro de salida del inyector no influye solamente en los parámetros operativos del inyector, pero también en los parámetros geométricos. Como se explicó en el punto anterior, cuando se cambia el diámetro de salida del inyector, también varía la razón de área de aireación para área de salida.

No fue posible establecer una influencia de la longitud relativa sobre la razón GLR, posiblemente, los valores probados de la longitud relativa se encontraban en un rango óptimo.

Con respecto al diámetro de gotas, él aumentaba al aumentar el número de filas, tendencia similar se observó cuando se aumentó el diámetro de salida del inyector. El rango de diámetros Sauter de gotas ( $32 D$ ) se encontraba entre 20 y 40 micrones para el agua, mientras que para la mezcla compuesta de 60% etanol + 40% glicerina estaba en el rango de 35 a 55 micrones. Para el caso de aceite diesel, las gotas se quedaban en un rango intermedio. La solidez del spray generado por ambos inyectores fue de un cono lleno, con mayor penetración en el caso del inyector tipo Y. El ángulo de cono del spray del inyector Y fue de  $14^\circ$  hasta  $16^\circ$ , mientras que para el inyector efervescente fue de  $16^\circ$  a  $18^\circ$ .

Se observó que las pruebas utilizando helio como gas de atomización y el inyector tipo Y. Mayores velocidades del gas se obtienen, debido a la mayor compresibilidad del gas. El caudal fue mucho menor, debido a la menor densidad del helio en comparación con el aire. En consecuencia, la razón GLR fue mucho menor, siendo menor del 3%.

Como conclusión final, se puede apuntar que ambos inyectores pueden ser empleados para su uso en cámaras de combustión industriales, cuando se utiliza la mezcla correcta de combustibles alternativos para poder llegar así a una adecuada performance del inyector en su atomización, que para este caso es de 60% etanol + 40% glicerina.

**Referencias bibliográficas**

- Ashgriz, (2011). *Handbook of atomization and sprays*. S.l.: s.n. ISBN 9781441972637.
- Baukal, C.E., (2014). *Combustion Handbook*. S.l.: s.n. ISBN 9781439839638.
- Beér, J. y Chigier N. (1983). *Combustion aerodynamics*. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company.
- Chumpitaz Ayala, G.R., (2016). *Estudo da atomização e caracterização de injetores utilizando óleo pirolítico de pneu usado puro e em misturas com diesel*. S.l.: Universidade Federal de Itajubá.
- González, C.A.Q., Torres, W.E.A., Costa, F.S., Jr, J.A.C. y San, M. De, (2013). *Análisis de flujo y su influencia en el diámetro medio de las gotas para inyectores de mistura interna tipo Y*, vol. 121501652, no. 2012, pp. 1-9.
- Jr, C.E.B., (2012). *The John Zink Hamworthy combustion Handbook*, Second Edition: Volume 1 - Fundamentals [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 1439839638. Disponible en: [https://books.google.com/books?id=Ax\\_OBQAAQBAJ&pgis=1%5Cnhttp://bookzz.org/book/2199075/40ea53](https://books.google.com/books?id=Ax_OBQAAQBAJ&pgis=1%5Cnhttp://bookzz.org/book/2199075/40ea53).
- Lacava, P.T., (2004). *Atomizador tipo «y-jet» – projeto, características do spray e combustão*. Proceedings of the 10o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering,
- Lefebvre, A.H., (1989). *Atomization and spray*. 1989. S.l.: s.n. ISBN 0-89116-603-3.
- Mullinger, P., y Chigier, N. (1974). *The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers*. Journal of the institute of fuel, 47, pp. 251 - 261.
- Quispe G., C. A., (2013). *Investigação de injetores tipo Y e efervescentes para a atomização da mistura de glicerina e etanol* [en línea]. S.l.: UNESP. Disponible en: [http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106397/gonzales\\_caq\\_dr\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106397/gonzales_caq_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Song, S., & Lee, S. (1996). *Study of atomization mechanism of gas/liquid mixtures flowing through YJet atomizers*. *Atomization and Sprays*, 6, pp. 193 - 209.