



**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
"CAMILO CIENFUEGOS"
FACULTAD DE INGENIERIAS QUÍMICA – MECANICA.**

MONOGRAFÍA

RESEÑA SOBRE ATOMIZADORES Y ESTUDIO ANALÍTICO DE LOS DEL TIPO CECYEN.

Autor: M.Sc Evelio Donate Cartas

Coautores:

Dr. Osvaldo F. García Morales

Dr. Eduardo Lincheta Mesa

Centro de Estudio de Combustión y Energía.

Noviembre, 2007

Índice.

Introducción	1
I – La atomización como proceso. Tipos de atomizadores.	2
1.1-Atomización de líquidos	2
1.2- Caracterización de los atomizadores.....	3
1.3- Tipos de atomizadores.	4
1.3.1- Atomizadores rotatorios.	5
1.3.2- Atomizadores dobles.	6
1.3.3- Inyectores de doble fluido.	7
1.3.4- Atomizadores de encendido y efervescentes.....	7
1.3.5- Pulverizadores electrostáticos (turbobell).	7
1.3.6- Pulverizador vibratorio y ultrasónico.	8
1.4- Nuevos diseños patentados de atomizadores.	8
1.5- Formación del spray.	9
1.6- Combustión de gotas individuales	10
1.7- Tamaño de la gota de pulverización.	10
1.8- Flujos multifásicos	12
1.8.1- Flujo de dos fases gas – líquido.	13
1.9- Boquillas de atomización de combustibles pesados CECYEN.	14
II - Estudio analítico del comportamiento de los principales parámetros de flujo en las boquillas CECYEN.....	15
2.1 – Generalidades.....	15
2.2 - Cálculo de la velocidad de salida del combustible en las ranuras producto del estrechamiento.....	16
2.3 - Cálculo de la caída de presión teniendo en cuenta las pérdidas por energía cinética.....	18
2.4 - Aplicación de la ecuación del momento a las boquillas CECYEN.....	19
2.5 - Análisis de los resultados obtenidos en el estudio analítico.....	22
Bibliografía.....	25

Introducción

En Cuba gran parte de la energía eléctrica se obtiene en Centrales Termoeléctricas (CTE), trayendo como consecuencia un gran gasto por concepto de consumo de combustible, de ahí que los principales esfuerzos del país en este aspecto, estén dirigidos a la búsqueda de nuevas alternativas para la disminución de sus costos de producción. Una de las variables aplicadas es la adaptación de estas para el consumo del crudo nacional, de menor costo que el fuel oil que es el empleado tradicionalmente, pero este cambio de combustible acarrea la necesidad de sustituir las antiguas boquillas de atomización diseñadas para trabajar con combustibles más ligeros, por otras capaces de trabajar de forma eficiente con el crudo cubano; un combustible pesado que posee un alto contenido de azufre y una elevada viscosidad, lo que dificulta su atomización y posterior combustión [8,21,44]. Según los trabajos del Doctor García Rodríguez sobre combustión de gotas individuales [1], el contenido de asfaltenos de un combustible influye de manera determinante en el tiempo de combustión del mismo, lo que implica que los combustibles mexicanos, por su alto contenido de asfaltenos, tardan más en quemarse. Lo anterior se asocia con los problemas de partículas inquemadas y de combustión incompleta. Éste era un hecho observado pero hasta ahora no corroborado experimentalmente con combustible mexicano. Los resultados de dicha investigación son aplicables también al petróleo crudo cubano dado que presenta gran semejanza con los combustibles mexicanos. [26].

Por todo lo antes expuesto, el Centro de Estudios de Combustión y Energía (CECYEN) de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” (UMCC), se ha dado a la tarea de lograr un diseño de boquillas de atomización óptimo para trabajar con combustibles de estas características. Dados los excelentes resultados logrados con dichas boquillas, se ha hecho necesario trabajar en su generalización en las diferentes CTE del país, para de esta manera contribuir al ahorro de combustible en el país y disminuir los impactos medio ambientales producto de la combustión en estos. Se hace evidente que este proceso de generalización a partir del diseño de los atomizadores para cada una de las plantas de manera independiente, traería como consecuencia

una demora considerable para su implementación. Considerando todo lo antes planteado, se han trazado los siguientes objetivos:

Objetivos:

1. Resumir la bibliografía más representativa sobre el tema.
2. Obtener analíticamente el comportamiento de los principales parámetros de flujo en las boquillas CECYEN.

I – La atomización como proceso. Tipos de atomizadores.

Para dar cumplimiento a las tareas técnicas propuestas, se realizó una revisión bibliográfica teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. Atomización de líquidos.
2. Caracterización de los atomizadores.
3. Tipos de atomizadores.
4. Búsqueda de Patentes.
5. Formación del spray.
6. Combustión de gotas individuales.
7. Tamaño de la gota de pulverización.
8. Flujos multifásicos.
9. Boquillas de atomización de combustibles pesados.
10. Semejanza hidrodinámica y números adimensionales.

1.1-Atomización de líquidos .[24]

Los atomizadores se emplean en gran parte de las aplicaciones prácticas, incluyendo los procesos industriales (por ejemplo: secado por spray, enfriamiento por spray, pulverización de metales), en la aplicación de tratamientos (humidificación, lavado de gas), en aplicaciones de recubrimiento (tratamiento superficial, pintado y corte por spray), en la combustión (quemadores, hornos, cohetes, turbinas de gas, motores de inyección de petróleo) y en aplicaciones médicas y de imprenta. Para estar en condiciones de describir los atomizadores es necesario comprender en detalles los procesos de atomización.

En el caso más simple, el líquido a atomizar es inyectado a alta velocidad a través de un pequeño orificio. La atomización es el proceso mediante el cual el líquido inyectado se deshace en gotas minúsculas. Esta tiene una gran influencia en los

regímenes de vaporización por spray, puesto que aumenta en gran medida la superficie total del líquido inyectado. La atomización se logra generalmente forzando a presión un líquido o una mezcla de gas y líquido a través de un agujero pequeño o ranuras de forma que el mismo se mueve a alta velocidad respecto a la atmósfera de gas circundante.

La vaporización rápida es necesaria en determinadas aplicaciones aunque no así en otras, en las que se necesita que el líquido inyectado impacte un objetivo. Las trayectorias de las gotas atomizadas, son determinadas por el momentum de inyección de la gota, fuerza de arrastre y las interacciones entre las gotas y el gas que las circunda. El control de estos y otros procesos de atomización conlleva a mejorar significativamente la calidad y funcionamiento del producto y en la disminución de los niveles de emisión de contaminantes.

1.2- Caracterización de los atomizadores.

En la práctica los atomizadores generan atomizaciones con una distribución del tamaño de las gotas en un rango promedio que va desde un micrómetro ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$) a 0,5 mm. Es importante cuantificar los detalles de la distribución en dependencia de la aplicación. Por ejemplo, las gotas más pequeñas vaporizan rápido y ello contribuye al control de los procesos de ignición en algunos sistemas de combustión. Por otra parte, las grandes gotas representan la mayoría de la masa y del momentum del líquido inyectado y las mismas pueden penetrar en la cámara de combustión de los motores de gases de alta presión.

Entre las características ideales de los atomizadores se incluye la capacidad de atomizar el líquido con un amplio rango de velocidad del fluido, bajo requerimientos de potencia y pocas probabilidades de tupición. Además, los mismos deben atomizar con patrones de fluidos uniformes.

Los atomizadores pueden caracterizarse en:

1. Los que producen conos de atomización huecos.
2. Los que producen conos de atomización sólidos.

En los atomizadores de cono sólido, el líquido se encuentra alrededor del eje del mismo, estos son de gran utilidad en aplicaciones que requieren de gran penetración como es el caso de los motores Diesel.

En los atomizadores de cono hueco, el eje se mantiene libre de gotas, favoreciendo una amplia dispersión. Los mismos son mayormente utilizados en hornos, turbinas de gas y aplicaciones de recubrimiento por spray.

En las aplicaciones se encuentran diferentes diseños de atomizadores. Los tipos más comunes incluyen: presurizados, rotatorios, de doble fluido (efervescentes, que emplean aire o aire forzado), intermitentes, electrostáticos, vibratorios, y ultrasónicos.

1.3- Tipos de atomizadores.

En los atomizadores presurizados la atomización se logra mediante la diferencia de presión entre la presión del líquido en el depósito de abastecimiento y la presión media ambiental a través de una boquilla. El más simple de los diseños es el de la boquilla de orificio plano con orificios de salida de diámetro D . El líquido emerge a la velocidad teórica obtenida por la ecuación de la energía mecánica a lo largo de una línea de fluido en función de la densidad del líquido y la diferencia de presiones antes mencionada. La velocidad real de inyección es menor que la velocidad ideal debido a un factor denominado coeficiente de descarga, C_D que oscila entre 0,6 y 0,9 para las boquillas de agujeros planos. C_D equivale a la pérdida del fluido en la boquilla.

Se han identificado cuatro regímenes principales de la rotura del chorro correspondientes a las diferentes combinaciones de inercia del líquido, tensión superficial, fuerzas aerodinámicas actuantes sobre el surtidor. A baja presión de inyección el chorro de líquido de baja velocidad estalla debido al crecimiento inestable de ondas de larga duración creadas por las tensiones superficiales (régimen Rayleigh). Según se incrementa la velocidad del chorro el aumento de la turbulencia en la superficie del líquido se refuerza debido a la interacción entre este y el gas ambiental (el primero y el segundo regímenes de rompimiento inducido por aire). A altas presiones de inyección el chorro de alta velocidad se desintegra en gotas inmediatamente después de pasar por el orificio de salida de la boquilla (régimen de atomización). Los efectos aerodinámicos se consideran muy importantes con relación a los efectos de la inercia cuando el número de Weber del chorro es mayor que 40.

Los experimentos demuestran que el aumento inestable de las ondas superficiales es asistido por altas velocidades relativas entre el líquido y el gas, así como por la utilización en los atomizadores de líquidos de baja viscosidad y baja tensión superficial.

Las características del rompimiento del líquido tales como el tamaño de la gota atomizada, la duración del rompimiento, y el ángulo de atomización, se han relacionado al mecanismo de aumento inestable de la onda. Los rangos de aumento y dimensión de la onda pueden ser determinados utilizando los resultados de un análisis de estabilidad lineal.

Para los motores del tipo diesel de gran velocidad de reacción en el régimen de atomización, el spray resultante diverge en cuanto al ángulo del cono θ , (el cual se encuentra normalmente en el rango de 5 a 20°). El ángulo θ aumenta con la densidad del gas de la siguiente forma:

$$\tan \theta = A \cdot (\rho_{gas} / \rho_{liq})^{1/2}$$
 (ecuación del ángulo del cono de atomización en función de las densidades del gas y del líquido.)

Donde A es una constante que depende de la longitud del conducto de la boquilla y (en menor cuantía) de la velocidad de inyección. Para producir gotas pequeñas se requieren altas presiones de inyección. En los motores diesel ΔP es habitualmente elevado (hasta los 200Mpa), y se producen las gotas con diámetros medios del orden de los 10 μ .

El diseño de orificio plano también se emplea en las boquillas de dobles fluidos líquidos para los motores de cohetes y en los diseños de boquillas dobles. En el caso de las boquillas dobles, los inyectores crean una película de líquido inestable la cual se rompe para producir el atomizado. Estas delgadas películas de líquido o aberturas de paso conllevan a la producción de gotas pequeñas. También se piensa que el mecanismo de rompimiento de estas películas de líquido trae consigo el crecimiento inestable de ondas superficiales debido a la tensión superficial y las fuerzas aerodinámicas.

1.3.1- Atomizadores rotatorios.

En los atomizadores rotatorios las fuerzas centrífugas se emplean para fortalecer el proceso de rompimiento. En este caso el líquido se proporciona al centro de un disco rotatorio y las películas de líquido se rompen en los extremos del disco. El tamaño de la gota depende de la velocidad rotatoria del disco.

Las fuerzas centrífugas también juegan un papel en el mecanismo de la disolución de pulverizadores de remolino de presión (boquillas simplex). Estos pulverizadores dan

el ángulo de cono de atomización más ancho que las boquillas de orificio plano, y pueden encontrarse tanto en los diseños de cono hueco como en los de cono sólido. El vórtice del cono aéreo dentro de la cámara de remolino juega un papel importante en la determinación del espesor de la película líquida o la capa a la salida de la boquilla. Este tipo de boquilla produce el atomizado relativamente grueso. El ángulo de cono de atomizado depende de la proporción de los componentes de velocidad axiales y tangenciales del líquido a la salida de la boquilla. Este tipo de pulverizador no es recomendado para el uso en las aplicaciones corrientes porque tiende a gotear a la salida y se paraliza cuando el centro aéreo no está formado totalmente.

La desventaja básica de todos los pulverizadores de presión es que la proporción de flujo depende de $[\sqrt{\Delta P}]$. La proporción del flujo volumétrico es:

$Q = A_{inj} \cdot U$ (ecuación de la proporción del flujo volumétrico en función de la velocidad teórica y del área del flujo líquido en la salida de la boquilla)

Donde A_{inj} es el área del flujo líquido en la salida de la boquilla, de forma tal que para un factor de un incremento de 20 en la proporción de flujo (una proporción típica que va desde la marcha en vacío hasta operaciones en condiciones de carga total en un motor de una turbina de gas) requiere un factor de incremento de 400 en la presión de inyección.

1.3.2- Atomizadores dobles.

Esta dificultad ha conllevado al diseño de los llamados atomizadores de amplio-rango. La boquilla doble ofrece dos juegos de aberturas de remolinos tangenciales; el primario (o piloto) suministra combustible a bajas proporciones de flujo, mientras la abertura secundaria se convierte operacional a altas proporciones de flujo. Otra variación es la boquilla de orificio doble que es conceptualmente dos boquillas simplex colocadas concéntricamente, uno que proporciona el flujo primario y el otro proporcionando el flujo secundario. La boquilla de derramamiento-retorno es una boquilla simplex con un pasaje trasero que devuelve el combustible a la bomba de inyección. En este diseño la proporción de flujo es controlada por la cantidad relativa de derramamiento, y no existe ningún pasaje pequeño a taparse. Sin embargo, el combustible siempre se proporciona a la presión máxima, lo que aumenta la demanda

en la bomba de inyección. Pero el elevado remolino siempre se mantiene en la cámara del remolino y la buena atomización se logra incluso a bajas proporciones de flujo.

1.3.3- Inyectores de doble fluido.

En la atomización de inyectores de doble-fluido se ayuda por un flujo de gas a alta velocidad a través de los pasajes del inyector. El caudal de gas a alta velocidad choca con un fluido líquido de una velocidad relativamente baja, internamente (en el caso de las boquillas de mezclado interno) o externamente (en el caso de las de mezclado externo). El flujo de líquido y de gas típicamente son girados en direcciones opuestas por medio de las veletas de remolino para mejorar la atomización. La asistencia por aire se refiere a los diseños que emplean una cantidad relativamente pequeña de aire a altas velocidades (posiblemente sónico). El *aire-forzado* se refiere a los diseños que emplean cantidades grandes de aire a velocidades relativamente pequeñas que a menudo proporcionan algo de aire para ayudar a la disminución de la formación de hollín en el sistema de la combustión.

1.3.4- Atomizadores de encendido y efervescentes.

En los atomizadores de encendido y efervescentes un flujo bifásico se pasa a través de la salida de boquilla del inyector. En este, las burbujas se generan por medio de un cambio de fase que ocurre como el líquido, conteniendo un gas propulsor disuelto o vapor, por debajo de la presión de la gota a través de la boquilla. Este proceso se emplea en muchas latas de spray de casa, pero tiene la desventaja de expulsar el gas propulsor requerido para la atomización a la atmósfera. En los llamados atomizadores efervescentes, las burbujas de aire se introducen en el líquido aguas arriba del orificio de salida. La calidad de rocío se encuentra en dependencia del tamaño de la burbuja de aire y es independiente del diámetro de salida de boquilla. Esto hace a los atomizadores de mezclado interior y a los asistidos por aire muy atractivos para el empleo con fluidos de alta viscosidad.

1.3.5- Pulverizadores electrostáticos (turbobell).

En los pulverizadores electrostáticos el líquido atomizado es cargado aplicando una gota de alto-voltaje a través de la boquilla. La dispersión de las gotas de rocío se aumenta aprovechándose de la fuerza repulsiva eléctrica entre las gotas. Una carga electrostática en las gotas también es útil en las aplicaciones de recubrimiento por

atomizado, como en pintura automotor mediante el atomizado empleando los pulverizadores del turbobell electrostáticos, puesto que las gotas cargadas son atraídas a una superficie designada opuestamente cargada.

1.3.6- Pulverizador vibratorio y ultrasónico.

Otros tipos del pulverizador incluyen el pulverizador vibratorio y ultrasónico (o nebulizers), donde las gotas se forman por la vibración de la boquilla del inyector a altas frecuencias y a grandes amplitudes para producir las perturbaciones de corta longitud de onda al fluido líquido. Los pulverizadores ultrasónicos se emplean en la terapia de la inhalación donde se requiere de un atomizado muy fino (del orden de los submicrómetros), y una representativa correlación de tamaño de gota.

1.4- Nuevos diseños patentados de atomizadores.

Analizando los resultados patentados en los últimos diez años en cuanto a la fabricación de atomizadores, estas se pueden dividir en tres grandes grupos en función de su designación de servicios, los cuales son:

1. Atomizadores de doble fluido para la atomización de combustibles líquidos.[7, 17,18,20, 31,32,33]
2. Atomizadores de partículas sólidas.[3,4,5,47]
3. Atomizadores de líquidos poco viscosos como fármacos, cosméticos y perfumes.[10,34,42]

La principal característica de los atomizadores comprendidos en el primer grupo es que en todos se trabaja en función de disminuir la presión del gas atomizante (vapor de agua o aire en todos los casos analizados) asegurando que de esta forma se reduce el consumo de dicho gas y se mejora el proceso de atomización, además de obtener una geometría que permita un aumento de la velocidad de salida del chorro con vistas a lograr un menor tamaño de gota y por consiguiente una mejor pulverización.

En el caso de los del segundo grupo, se observa principalmente que se trabaja en función de emplear materiales resistentes a la corrosión y que puedan ser intercambiables las partes que estén más expuestas a este fenómeno, principal problema que presentan estos tipos de atomizadores. También se observa una tendencia a aumentar la longitud del conducto de entrada al cabezal del atomizador y de la cámara de mezclado o torsión y a emulsionar las partículas a atomizar para lograr

una mezcla más fluida para evitar el estancamiento en dichas secciones, solución recomendada según la bibliografía analizada [27] para resolver este fenómeno, otro de los más comunes que se presentan en estos atomizadores.

En los atomizadores pertenecientes al tercer grupo, todos los diseños están encaminados en general en función de hacer más sencillo y práctico su uso por parte de los usuarios en el caso de los fármacos, y en el resto de los casos en lograr un diseño más sencillo tanto en lo referente a su uso como en su fabricación, y que en todos los casos el sistema de atomización está acoplado a un recipiente en el cual está contenido el líquido a atomizar.

1.5- Formación del spray. [28]

La desintegración del líquido en un atomizador es el resultado de causas internas y externas. Las primeras provienen de disturbios en el atomizador mismo; éstas se originan por la caída de presión del líquido, la fricción entre el fluido atomizante y el fluido atomizado, y los disturbios del movimiento del líquido en las orillas de los orificios de entrada y salida y en cualquier tipo de irregularidad en la superficie. Las causas externas resultan de la interacción con el medio ambiente y dependen de la velocidad relativa del líquido y del gas del ambiente, así como de la densidad del gas y de las características del líquido que sale del atomizador. El rompimiento inicial del líquido depende de las propiedades del flujo en el interior del atomizador, las propiedades de turbulencia a lo largo de la corriente de líquido antes de la desintegración, las propiedades del medio ambiente y el desarrollo de ondas a lo largo de la superficie del chorro. El mecanismo de desintegración lo controlan la tensión superficial y la viscosidad dinámica dentro del líquido mismo. También es controlado por la interacción de las fuerzas aerodinámicas. Estas interacciones son demasiado complejas para representarlas matemáticamente con un alto grado de precisión. Sin embargo, la propia formación de la lámina de líquido es un fenómeno complejo altamente dependiente de las características específicas de diseño del atomizador, las cuales varían ampliamente. La viscosidad del líquido es la propiedad más importante en el proceso de formación del spray. Su importancia proviene del hecho de que afecta no sólo las distribuciones de tamaño de gota, sino también la velocidad de flujo en el atomizador y en los patrones del spray .

1.6- Combustión de gotas individuales.[1]

El trabajo de García Rodríguez sobre combustión de gotas individuales, tuvo como objetivo estudiar experimentalmente el efecto del cada vez mayor contenido de asfaltenos en los combustóleos mexicanos, lo cuál es aplicable al combustible cubano, pues ambos tienen una gran semejanza [26]. La investigación experimental consistió en analizar las etapas de quemado de gotas individuales utilizando técnicas de video de alta velocidad.

Los combustóleos se atomizan para facilitar la combustión. Las gotas individuales bajo ciertas condiciones de temperatura y velocidad se queman (oxidan) al entrar en contacto con el aire. La adecuada combustión depende en gran medida de la combustión de cada gota.

"Empleando una gota suspendida sobre un filamento y dentro de un horno -señala el doctor García- se determina la temperatura y el tiempo de quemado de la misma. Se analiza también el residuo carbonoso que se forma en la última etapa de combustión. Los resultados indican que el contenido de asfaltenos de un combustible influye de manera determinante en el tiempo de combustión del mismo, lo que implica que los combustóleos mexicanos, por su alto contenido de asfaltenos, tardan más en quemarse. Lo anterior se asocia con los problemas de partículas inquemadas y de combustión incompleta. Éste era un hecho observado pero hasta ahora no corroborado experimentalmente con combustóleo mexicano".

1.7- Tamaño de la gota de pulverización. [19]

El tamaño de gota se refiere al tamaño de gotas de pulverización individuales que forman el modelo de pulverización de una boquilla. No todas las gotas de una pulverización dada tienen el mismo tamaño. El tamaño de la gota se puede indicar de las siguientes formas:

Diámetro Medio de Volumen(DMV), también expresado como(DVM) Diámetro Volumen Medio, DV0,5(DMM) Diámetro Medio de Masa: expresa el tamaño de la gota en relación con el volumen del líquido pulverizado. Esto significa que el tamaño de gota de diámetro medio de volumen (o masa) es un valor donde el 50% del total del volumen del líquido pulverizado se hace en gotas de tamaño mayor que el diámetro medio y el 50 % en gotas más pequeña que ese diámetro medio.

Diámetro Medio Sauter (DMS o SMD): expresa el grado de pulverización en relación con la superficie de las gotas producidas en la pulverización. El Diámetro Medio Sauter es el diámetro de una gota que tenga la misma relación entre su volumen y su área superficial que el total del volumen de todas las gotas y la superficie total de las mismas.

Diámetro Medio en Número(DMN): expresa el tamaño de la gota en relación al número de gotas de la pulverización. Significa que el 50% del número total de gotas es más pequeño que el diámetro medio y el otro 50% de las gotas es mayor que el diámetro medio.

El tamaño de la gota se expresa habitualmente en micras. Una micra equivale a $1/25,400$ pulgadas ó $0,001$ mm; 3175 micras equivalen a $1/8$ pulgada.

Además de los efectos causados por el producto específico que se pulveriza, los tres factores principales que afectan el tamaño de la gota son la capacidad de la boquilla, la presión y la forma de pulverización. Las presiones de pulverización más bajas proporcionan tamaños de gotas mayores, mientras que las presiones de pulverización más altas proporcionan tamaños de gotas más pequeños. Hablando en términos generales, las gotas mayores son las que producen las boquillas de cono sólido. En la serie de boquillas de pulverización hidráulicas, los tamaños de gotas más pequeños son los producidos por las boquillas de pulverización de cono hueco, incluyendo el tipo de atomización hidráulica o el de atomización fina.

Dentro de cada modelo de pulverización los de capacidades más pequeñas producen las gotas de menor tamaño y los de mayor capacidad producen las mayores gotas [19,25]

Según resultados obtenidos en trabajos anteriores [9,39,35,46] el diámetro medio de gota en la atomización, depende en gran medida de la velocidad de salida del chorro de atomización, disminuyendo este con el aumento de la velocidad de salida del chorro, por lo que, en la medida que dicha velocidad aumente, se obtendrá una mayor pulverización en la atomización lo que a la larga se traduce en una mejor combustión y ahorro de combustible.

Teniendo en cuenta estudios realizados a los atomizadores CECYEN empleando las ecuaciones básicas para un volumen de control, se llega a la conclusión de que un

aumento del flujo de combustible a la par de un incremento de la presión del combustible a la entrada de los quemadores, trae consigo una disminución de las componentes de la velocidad de salida de la mezcla y un aumento de la presión a la salida de las ranuras, así como también un incremento en el ángulo base de las ranuras influye de igual manera en las componentes de la velocidad de salida de la mezcla [14], planteándose en la bibliografía especializada sobre el tema [45] que para ángulos del cono menores de 50° , se obtienen los mejores atomizados.

1.8- Flujos multifásicos. [38]

El estudio clásico de la mecánica de los fluidos se concentra en el flujo de fase simple homogénea, sin embargo, muchos procesos industriales importantes traen consigo flujos simultáneos de fases múltiples. Un flujo multifásico ocurre donde quiera que dos o más de las siguientes fases ocurran simultáneamente gas - vapor, gas - sólido, gas - líquido y múltiples fases líquidas que no se mezclan. El más común de los flujos simultáneos es el de vapor/gas y líquidos (localizados en calderas y condensadores). Todos los problemas en los flujos multifásicos tienen sus rasgos distintivos, los cuales son diferentes en cuanto a características a partir de los que fueron encontrados en los problemas de los flujos de fase simple. Los procedimientos para un diseño de ingeniería por flujos multifásicos no han sido tan bien desarrollados como por flujos de fase simple. Una complejidad agregada es la necesidad para predecir las concentraciones relativas de las diferentes fases en los flujos multifásicos, una necesidad que no está presente en los flujos de fase simple.

La concentración relativa de las fases diferentes es usualmente un parámetro de gran importancia en flujos multifásicos, mientras que este parámetro no trae consecuencia alguna en flujos de fase simple. Se observa también que la distribución de varias fases en el canal de flujo afecta fuertemente el comportamiento de este, y la influencia de la fuerza gravitacional en flujos multifásicos es de gran importancia, no sucediendo así en ambos casos en flujos de fase simple. En ninguna de las situaciones de flujo dadas existe la posibilidad para varias fases de asumir diferentes velocidades, dirigido al fenómeno de deslizamiento entre fases y la consecuente transferencia interfacial del impulso (cantidad de movimiento). Por supuesto, la complejidad de las características laminar-turbulento ocurre en flujos multifásicos como en los flujos de

fase simple, con la complejidad agregada de interacciones entre fases alterando las estructuras del flujo laminar-turbulento.

Estas complejidades aumentan exponencialmente con el número de fases encontradas en los problemas de flujos multifásicos. Afortunadamente, un largo número de aplicaciones ocurren en flujos con sólo dos fases, o pueden asumirse como flujos de dos fases.

Dos tipos de análisis son utilizados para el trabajo con flujos de dos fases. El más simple nos acerca a utilizar modelos homogéneos asumiendo que las fases están separadas con idéntica velocidad local de todos los puntos en el fluido. El segundo reconoce la posibilidad que las dos fases puedan fluir a diferentes velocidades a través del fluido, de este modo se requiere separar las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento para cada fase.

1.8.1- Flujo de dos fases gas – líquido. [38]

El caso más común de flujo multifásico es el flujo bifásico de gas y líquido, como los encontrados en generadores de vapor y sistemas de refrigeración. Un rasgo especial de los flujos multifásicos es su capacidad para asumir diferentes distribuciones espaciales de las fases. Este modelo diferente de flujo ha sido clasificado en regímenes de flujo, los cuales son alterados por la dirección relativa de flujo para la aceleración gravitacional. Para una proporción constante de líquido, la fase del gas tiende a ser distribuida como pequeñas burbujas a una proporción baja de gas. El aumento en la proporción de gas causa aglomeración de burbujas a todo lo largo del conducto y en los extremos. El incremento adicional de la proporción de gas causa separación de las fases en un modelo anular en donde el líquido se concentra en la pared del canal y el flujo de gas en el núcleo central del conducto vertical. Para conductos horizontales, la fuerza gravitacional tiende a separar el líquido hacia el fondo del canal, resultando el flujo estratificado y ondulado estratificado. Esta segregación descendente de la fase líquida puede ser superada por las fuerzas cinéticas a altas proporciones de flujo, causando flujos estratificados para volverse flujos anulares. A elevadas proporciones de gas, la mayor parte del líquido tiende a ser arrastrado como gotas dispersas, en el límite se obtiene la niebla del flujo dispersa completamente.

1.9- Boquillas de atomización de combustibles pesados CECYEN.

Las boquillas de atomización de combustibles pesados CECYEN, surgen como respuesta del Centro de Estudios de Combustión y Energía de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” a la investigación por optimizar el proceso de combustión de crudo cubano como sustituto del fuel-oil en las termoeléctricas cubanas con motivo del cambio de algunas de estas a este combustible buscando un ahorro de divisas al país. Dichas boquillas se caracterizan por estar compuestas por dos elementos, boquilla exterior y boquilla interior, que se ajustan entre sí para su funcionamiento, las que se montan al quemador de igual forma que las de tipo “Y”, por lo que no se requieren modificaciones al mismo [28].

La boquilla interior presenta ranuras angulares de sección variable por las que se desplaza el combustible a presión, imprimiéndole a éste mayor velocidad, sentido de rotación y le disminuye el espesor de lámina al comprimirse contra la pared cónica de la boquilla exterior.

Además posee un orificio central pasante con dos diámetros, por el que pasa el vapor a presión que se impacta en el cono invertido de la cámara de desintegración de la boquilla exterior para el rompimiento de la lámina de combustible en gotas y la descarga de la mezcla vapor-combustible (spray) al exterior. La boquilla exterior presenta el orificio cónico de ajuste para la boquilla interior, la cámara de rotación-desintegración y los orificios angulares para la descarga a la atmósfera de la mezcla vapor-combustible [28].

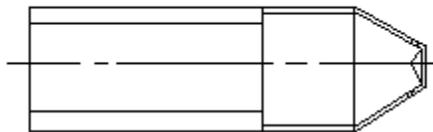
Estudios experimentales realizados con ambas boquillas [6,29,41] arrojan como resultado que a pesar de que los valores de la relación del flujo másico de aire-líquido obtenido era aproximadamente igual y que con la boquilla tipo “Y” se obtiene un mayor coeficiente de descarga, la diferencia radica en que a iguales parámetros de prueba, se obtiene un mayor flujo de agua (sustituto del combustible para las pruebas en frío) con una diferencia del 13% con respecto a la boquilla tipo “Y”, cuestión planteada teóricamente con anterioridad en trabajos realizados sobre el tema [23]. Característica que favorece al proceso de atomización [22] pues al aumentar el flujo de aire necesario para dicho proceso, este tiende a bloquear el área de los orificios de salida. Por otra parte, es necesario una mayor valor de presión absoluta de aire para alcanzar

diferentes condiciones operacionales, resultando en un incremento de la velocidad del aire a la salida de los orificios del atomizador. Estas condiciones contribuyen a la formación de una nube de gotas con un menor diámetro de gotas promedio que el generado por las boquillas tipo “Y” comerciales. Por todas estas razones, se puede esperar un incremento de la eficiencia en la combustión de los petróleos pesados empleando este nuevo tipo de atomizador [30], tesis corroborada en las pruebas comparativas realizadas por INEL en la CTE “José Martí” [15].

II - Estudio analítico del comportamiento de los principales parámetros de flujo en las boquillas CECYEN.

2.1 - Generalidades

Boquillas de atomización CECYEN



Las boquillas CECYEN analizadas están formadas por un ánulo, 18 tubos, 6 ranuras y 8 orificios de descarga. El ángulo de spray (2α) de las boquillas diseñadas para la CTE de Nuevitas es 60° y para la CTE “José Martí” es de 80° .

Datos experimentales.

Datos experimentales de las boquillas analizadas.

Nota: Las boquillas de la #1 a la #6 son las diferentes variantes de parámetros de trabajo de la boquilla CECYEN para la CTE “10 de Octubre” de Nuevitas.

Boquilla(#)	$P_{\text{comb}}(\text{Pa})$	$G_{\text{comb}}(\text{kg/s})$	$P_{\text{Vapor}}(\text{Pa})$
1	500000	0,36111	500000
2	600000	0,5	500000
3	800000	0,58333	500000
4	1000000	0,72222	500000
5	1200000	0,88888	500000
6	1400000	0,97222	500000
Martí	550000	0,5	500000

2.2 - Cálculo de la velocidad de salida del combustible en las ranuras producto del estrechamiento.

Las boquillas CECYEN poseen un estrechamiento en la punta de las ranuras para aumentar la velocidad media de salida del combustible. Dicha velocidad media se calcula en todas las variantes aplicando la “Ley de la conservación de la masa” entre dos secciones [16, 43] (la sección 1 a la entrada de la ranura y la sección 2 a la salida de la ranura), la cuál se plantea a continuación:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} (\rho \cdot dV) + \int_{sc} (\rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}) \quad (2.1)$$

Considerando el flujo uniforme y estable, el primer término de la ecuación se hace 0(cero), por lo que la ecuación se reduce a:

$$0 = \int_{sc} (\rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}) \quad (2.2)$$

Como la densidad es constante, la ecuación puede expresarse en forma de un producto de magnitudes escalares:

$$\int_{An} (\rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}) = \pm |\rho_n \cdot V_n \cdot A_n| \quad (2.3)$$

Boquillas Nuevitas.

$$0 = -|V_1 \cdot A_1| + |V_2 \cdot A_2|$$

$$V_1 \cdot A_c = V_2 \cdot A_{c1} = V_m$$

$$V_2 = \frac{V_m \cdot A_c}{A_{c1}} = V \quad (42)$$

$$A_c = a_1 \cdot b_1 = 3mm \cdot 3,5mm = 10,5mm^2$$

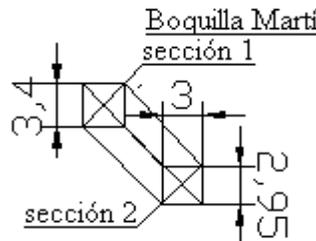
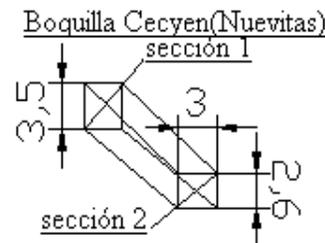
$$A_{c1} = a_2 \cdot b_2 = 3mm \cdot 2,6mm = 7,8mm^2$$

Boquilla Martí.

$$V_2 = \frac{V_{m1} \cdot A_c}{A_{c1}} = V \quad (42)$$

$$A_c = a_1 \cdot b_1 = 3mm \cdot 3,4mm = 10,2mm^2$$

$$A_{c1} = a_2 \cdot b_2 = 3mm \cdot 2,95mm = 8,85mm^2$$

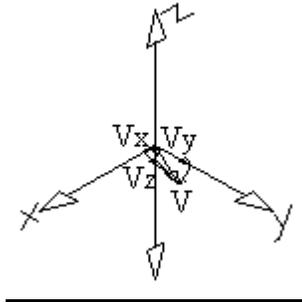


Boquilla #1

$$V = \frac{6.4535175 \frac{m}{s} \cdot 10,5m^2}{7,8m^2} = 8,6874274 \frac{m}{s} \quad (2.4)$$

Nota: Las componentes en x, y, z de la velocidad de salida del combustible por las ranuras considerando el estrechamiento de estas en la punta, se calcularon empleando el software AutoCad.

Componentes de la velocidad de salida del combustible (V) en la ranura.



$$V_x = 2,8258 \text{ m/s}$$

$$V_y = 7,7638 \text{ m/s}$$

$$V_z = 2,6845 \text{ m/s}$$

La tabla a continuación muestra los valores de la velocidad de salida del combustible por las ranuras y sus componentes en x, y, z para el resto de las boquillas analizadas. Estos valores fueron calculados de igual manera que lo efectuado para la boquilla #1.

Boquilla	V(m/s)	Vx(m/s)	Vy(m/s)	Vz(m/s)
#1	8,6874274	2,8258	7,7638	2,6845
#2	12,02730	3,9122	10,7488	3,7166
#3	14,032092	4,5644	12,5405	4,3362
#4	17,373410	5,6512	15,5266	5,3687
#5	21,382993	6,9555	19,1100	6,6077
#6	23,387783	7,6076	20,9017	7,2272
Martí	10,600716	3,4070	9,3607	3,6257

2.3 - Cálculo de la caída de presión teniendo en cuenta las pérdidas por energía cinética.

En el programa en TKSolver empleado, el cálculo de la caída de presiones se realiza sin tenerse en cuenta la pérdida de la energía cinética, por lo que a continuación se realizará este cálculo pero afectando la fórmula por el coeficiente K (K=1 porque se ha considerado como si el fluido pasara por un cambio brusco de sección donde toda la

energía cinética se pierde) [16, 43], el cual comprende dicha pérdida de energía cinética (el análisis es el mismo para todas las boquillas).

Análisis dimensional de la ecuación de la caída de presión (aplicable para todas las boquillas analizadas).

$$p = p - \left[\rho \cdot \left(f \cdot \frac{L}{4 \cdot Rh} + K \right) \cdot \frac{V^2}{2} \right] \quad (2.5)$$

$$p = \frac{N}{m^2} - \frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot m^2} - \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

$$p = \frac{N}{m^2} - \left(\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{m} \cdot \frac{m^2}{s^2} \right)$$

$$p = \frac{kg}{m \cdot s^2} - \frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} = Pa$$

Boquilla #1

$$p3 = 500000 - \left[888,25682 \cdot \left(0,03012022 \cdot \frac{2}{4} \cdot 0,06428571 + 1 \right) \cdot \frac{0,4108095^2}{2} \right] \quad (2.6)$$

$$p3 = 49907,488 Pa$$

$$p2 = p3 - \left[\rho \cdot \left(f_t \cdot \frac{L_t}{d} + K \right) \cdot \frac{V_t^2}{2} \right] \quad (2.7)$$

$$p2 = 499907,49 - \left[888,25682 \cdot \left(0,06516085 \cdot \frac{0,034}{0,003} + 1 \right) \cdot \frac{3,1949199^2}{2} \right]$$

$$p2 = 492026,14 Pa$$

$$p1 = p2 - \left[\rho \cdot \left(f_r \cdot \frac{L_r}{4 \cdot Rh} + K \right) \cdot \frac{V^2}{2} \right] \quad (2.8)$$

$$p1 = 492026,14 - \left[888,25682 \cdot \left(0,04952599 \cdot \frac{14}{4} \cdot 0,80769230 + 1 \right) \cdot \frac{8,6874274^2}{2} \right]$$

$$p1 = 451312,98 Pa$$

La tabla a continuación muestra los valores los cálculos de la caída de presión en los diferentes elementos que componen a las boquillas analizadas teniendo en cuenta

las pérdidas de energía cinética para el resto de las boquillas analizadas. Estos valores fueron calculados de igual manera que lo efectuado para la boquilla #1.

Boquilla	p1(Pa)	p2(Pa)	p3(Pa)	p4(Pa)
#1	500000	49907,488	495026,14	451312,98
#2	600000	599825,01	586495,01	509898,66
#3	800000	799764,02	782521,16	679083,48
#4	1000000	999641,51	974811,91	817846,71
#5	1200000	1199461,4	1163749,5	928106,34
#6	1400000	1399357,8	1363645,9	1082774,9
Martí	550000	549856,30	536533,67	389873,75

2.4 - Aplicación de la ecuación del momento a las boquillas CECYEN.

Para conocer el flujo de vapor de atomización, se tomó el 50 % de la relación existente entre el flujo de vapor de atomización y el de combustible de la CTE “Antonio Guiteras” cuando empleaba boquillas tipo Y en sus quemadores y, posteriormente, se empleó esta relación para determinar el flujo de vapor de atomización de las boquillas CECYEN, pues, según Lincheta E.[8], las boquillas de atomización CECYEN, consumen sólo hasta el 50 % del flujo de vapor que el consumido por las boquillas tipo Y:

Datos para aplicar la ecuación del momento a las boquillas de atomización (aplicable a todas la boquillas analizadas).

$G_{VG} = 330 \text{ kg/h}$ (Flujo másico de vapor de atomización de la CTE “Antonio Guiteras”)

$G_{CG} = 4500 \text{ kg/h}$ (Flujo másico de combustible para un quemador de la CTE “Antonio Guiteras”)

$F = 50 \%$ de la relación entre el flujo másico de combustible y el de vapor de atomización de la CTE “Antonio Guiteras”.

G_v = flujo másico de vapor de atomización para una ranura de la boquilla correspondiente.

$G_{CO} = G_{an}$ (flujo másico de combustible de la boquilla correspondiente)

G_r = flujo másico de combustible para una ranura

G_m = flujo másico de mezcla

V = velocidad de salida del combustible de la ranura

V_v = velocidad del vapor considerando $A_v = A_s$ (para un orificio de salida)

V_{mE} = velocidad de la mezcla

$$A_V = 9,61625 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ (área de salida del vapor)}$$

$$A_C = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ (área de salida de la ranura de las boquillas de Nuevitas)}$$

$$A_{C1} = 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ (área de salida de la ranura de la boquilla Martí)}$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ N} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = \frac{G_{VG}}{G_{CG}} \cdot 0,50 = 0,03667 \quad (2.9)$$

$$G_V = F \cdot G_r \quad (2.10)$$

$$G_V = 0,03667 \cdot 0,06019 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,0022072 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ (Considerando 6 agujeros de salida en las boquillas)}$$

$$V_V = \frac{G_V}{\rho_V \cdot A_V}$$

$$V_V = \frac{0,0022072 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{2,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,00007693 \text{ m}^2} = 11,476407 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$G_m = G_r + G_V \quad (2.11)$$

$$G_m = 0,06019 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0,0022072 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,0623972 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Aplicación de la ecuación del momento a las boquillas de atomización.

$$\vec{F} = \vec{F}_S + \vec{F}_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} (\vec{V} \cdot \rho \cdot dV) + \int_{SC} (\vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}) \quad (2.12)$$

Considerando que la única fuerza másica actuante es la gravedad y que las fuerzas superficiales actuantes son las presiones, el término izquierdo de la ecuación se simplifica; si se considera el flujo uniforme y estable, la relación de cambio del momento dentro del volumen de control se hace cero, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\vec{F} = \vec{F}_S = \int_{SC} \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

$$F_S = p_V \cdot A_V + p_C \cdot A_C - p_m \cdot A_S$$

Pero como se asume que la presión de salida de la mezcla (p_m) es igual a la atmosférica, este término se anula y la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$F_S = p_V \cdot A_V + p_C \cdot A_C$$

Analizando el fenómeno en los ejes Y y Z:

$$\int_{SC} \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int_1 \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} + \int_2 \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} + \int_3 \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

$$F_Y = p_V \cdot A_V \cdot \cos 30^\circ + p_C \cdot A_C \cdot \cos 18^\circ = -v \cdot G_r - v_V \cdot G_V + v_{mE} \cdot G_m$$

$$v_{mE} = \frac{p_V \cdot A_V \cdot \cos 30^\circ + p_C \cdot A_C \cdot \cos 18^\circ + v \cdot G_r + v_V \cdot G_V}{G_m} \quad (2.13)$$

$$F_S = -\int_1 V \cdot \rho \cdot V \cdot dA - \int_2 V \cdot \rho \cdot V \cdot dA + \int_3 V \cdot \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.14)$$

Como:

$$\rho \cdot V \cdot dA = G \quad (2.15)$$

sustituyendo la ecuación (2.15) en la ecuación (2.14):

$$F_S = -\int_1 V \cdot G_r - \int_2 V_V \cdot G_V + \int_3 V_{mE} \cdot G_m$$

$$F_S = -V \cdot G_r - V_V \cdot G_V + V_{mE} \cdot G_m$$

Análisis dimensional (aplicable a todas las boquillas).

$$V_{mE} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{s}{kg} = m/s$$

$$V_{mE} = \frac{N/m^2 \cdot m^2 + N/m^2 \cdot m^2 + m/s \cdot kg/s + m/s \cdot kg/s}{kg/s} = \frac{N + kg \cdot m/s^2}{kg/s}$$

Boquilla #1

$$v = V_Y$$

$$v_V = V_V \cdot \cos 30$$

$$v_{mE} = \frac{p_V \cdot A_V \cdot \cos 30^\circ + p_C \cdot A_C \cdot \cos 18^\circ + v \cdot G_r + v_V \cdot G_V}{G_m}$$

$$v_{mE} = \frac{500000 \cdot 9,61625 \cdot 10^{-6} \cdot \cos 30^\circ + 500000 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \cos 18^\circ + 7,7638 \cdot 0,06019 + 11,476407 \cdot 0,0022072 \cdot \cos 30^\circ}{0,0623972}$$

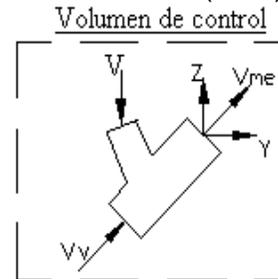
$$v_{mE} = 134,01754 \frac{m}{s}$$

$$F_Z = p_V \cdot A_V + p_C \cdot A_C \cdot \text{sen} 18^\circ = w \cdot G_r - w_V \cdot G_V + w_{mE} \cdot G_m$$

$$w_{mE} = \frac{p_V \cdot A_V \cdot \text{sen} 30^\circ + p_C \cdot A_C \cdot \text{sen} 18^\circ + w \cdot G_r + w_V \cdot G_V}{G_m} \quad (2.16)$$

$$w = -V_Z$$

$$w_V = V_V \cdot \text{sen} 30^\circ$$



$$w_{mE} = \frac{500000 \cdot 9,61625 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen}30^\circ + 500000 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen}18^\circ - 2,6845 \cdot 0,06019 + 11,476407 \cdot 0,0022072 \cdot \text{sen}30^\circ}{0,0623972}$$

$$w_{mE} = 55,456239 \frac{m}{s}$$

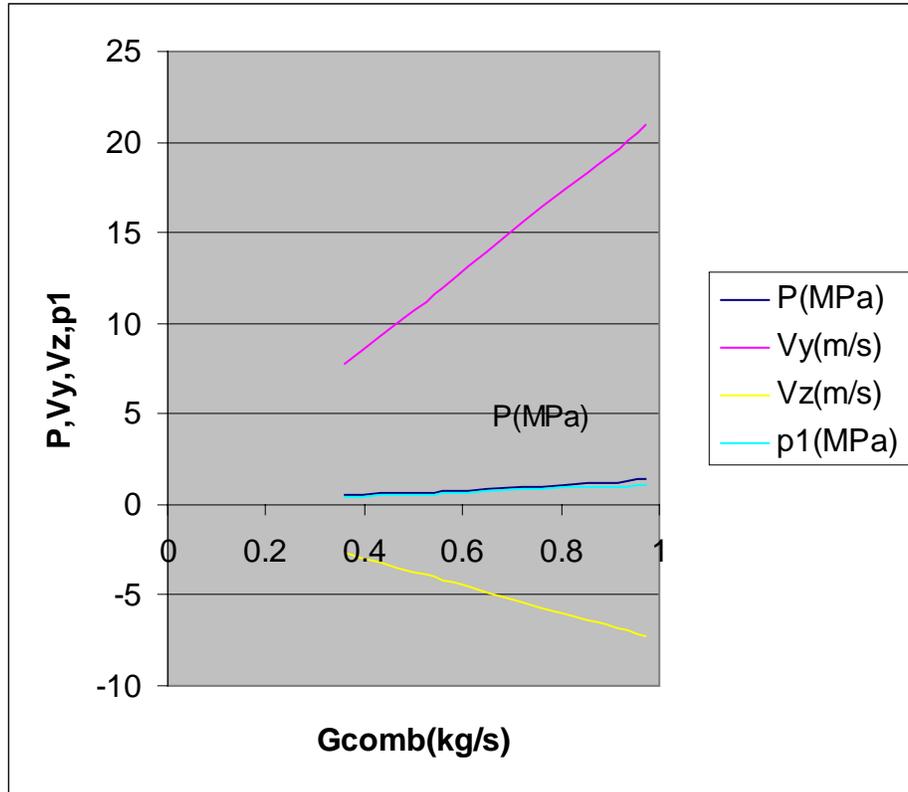
La tabla a continuación muestra los valores de los cálculos del flujo de vapor, la velocidad del vapor, el flujo de mezcla, y las componentes en Y y Z de la velocidad de salida de la mezcla para el resto de las boquillas analizadas teniendo en cuenta las pérdidas de energía cinética para el resto de las boquillas analizadas. Estos valores fueron calculados de igual manera que lo efectuado para la boquilla #1.

Boquilla	Vv(m/s)	Gv(kg/s)	Gm(kg/s)	v _{mE} (m/s)	w _{mE} (m/s)
#1	11,476407	0,0022072	0,0623972	134,01754	55,456239
#2	15,888210	0,0030557	0,0863857	110,58133	41,547447
#3	18,536852	0,0035651	0,1007851	112,86361	39,130844
#4	22,937216	0,0044114	0,1247814	108,60850	34,214634
#5	28,247498	0,0054327	0,1535727	104,37993	28,614086
#6	30,895619	0,0059420	0,1679820	107,72222	27,974566
Martí	15,888730	0,0030558	0,0086389	105,04186	51,910142

2.5 - Análisis de los resultados obtenidos en el estudio analítico.

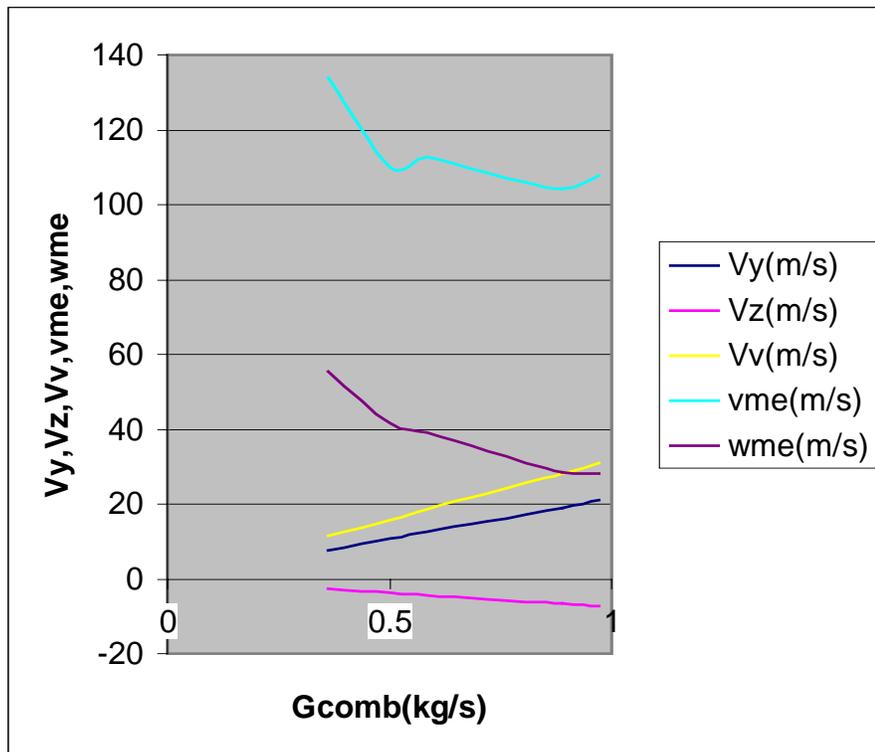
Teniendo en cuenta los análisis realizados en el Capítulo I, podemos determinar que la presión del combustible a la salida de las ranuras de las boquillas analizadas aumenta con el incremento del flujo de combustible producto de que dicho aumento de flujo, se produce acompañado de un incremento de la presión a la entrada de las boquillas, el cual provoca el aumento de la presión del combustible a la salida de las ranuras a pesar del incremento del flujo.

Análisis gráfico de la presión del combustible a la entrada de las boquillas(P), a la salida de la ranura(p1), las componentes de la velocidad en Y(Vy) y Z(Vz) en función del flujo de combustible(Gcom).



Analizando esta gráfica, se puede observar un incremento de las presiones de combustible a la entrada de la boquilla y a la salida de la ranura, P y p1 respectivamente, en función del incremento del flujo de combustible, producto de lo explicado anteriormente. También se observa el incremento de la componente de la velocidad del combustible a la salida de la ranura (V) en el eje Y (Vy) y de su componente en el eje Z (Vz pero esta última en el sentido negativo del eje de coordenadas) en función del incremento del flujo de combustible.

Análisis gráfico de las componentes de la velocidad de salida del combustible en las ranuras en Y (Vy) y Z (Vz), de la velocidad del vapor (Vv), y de las componentes en Y y Z de la velocidad de la mezcla (vme y wme respectivamente) en función del flujo de combustible (Gcom).



En esta gráfica

se puede observar una tendencia a la disminución de las componentes en Y y Z de la velocidad de la mezcla (V_{mE}) en función del aumento del flujo de combustible, lo cual, teniendo en cuenta los análisis realizados con anterioridad, se puede plantear que ocurre producto del aumento, en el sentido negativo del eje de coordenadas de la componente en Z (V_z), de la velocidad de salida de las ranuras (V) del combustible, puesto que de esta manera, dicha componente se contrapone a la velocidad de la mezcla (V_{mE}), conllevando esto a una disminución de la misma.

Si se compara la boquilla de la CTE “José Martí” con la boquilla #1 que tiene parámetros de trabajo semejantes, se puede apreciar como las componentes de la velocidad de salida de la mezcla de la boquilla de la “José Martí” son inferiores a la de Nuevitas, diferenciándose estas solamente en su ángulo de base (18° para las boquillas de Nuevitas y 20° para la boquilla de la “José Martí”), por lo que se puede inferir que un incremento del ángulo de base de la ranura provoca una disminución en las componentes de la velocidad de salida de la mezcla.

Bibliografía.

1. "Actividades de investigación"[online]. México: IIE de México, mayo-junio 1998- [citado 6 de mayo del 2003]. Disponible en Internet: <<http://www.iie.org.mx>>.
2. "Evaluation of the influence of liquid fuel atomization on fuel consumption during of solids in a furnace"[online]. Institute of Thermal Technology. Poland. Energy Magazine #26. 2001, pp. 1135-1144. [citado 10 de septiembre de 2001]. Disponible en Internet: <http://www.elsevier.com>
3. Bailey, Ralph T. Burley, David R., Feeney, Steve. (1996). Extended wear life low pressure drop right angle single exit orifice dual-fluid atomizer with replaceable wear materials. Patent number US5542609.
4. Bailey, Ralph T.(1996). Dual fluid atomizer for high solids soil paste containing pebbles or agglomerates. Patent number US5511728.
5. Bailey, Ralph T., Cline, John R., Myers, Robert B. (1996). Extended wear life low pressure drop right angle multi-exit orifice dual-fluid atomizer with replaceable wear materials. Patent number US5516046.
6. Barreras, F., Lozano, A., Lincheta, E. "Performance of twin-fluid nozzles with an internal swirl chamber". 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp 623-628.
7. Birmingham, Joseph G., Shekarriz, A. (2003). Electrostatic atomizer and method of producing atomized fluid sprays. Patent number WO03031074.
8. Blei, S., Sommerfeld M. "Investigation of droplet collisions of viscous process fluids by imaging techniques" 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp 100-105.
9. Cano, Alexei. "Evaluación de la calidad de pulverización de un spray diesel" Tesis presentada como requisito parcial al Título de Ingeniero Mecánico. 2003. Universidad de Cienfuegos. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Cienfuegos. Cuba.
10. Ceskoslovenska Akademie (1981). Double-acting Mechanical Atomizer of Fluids. Patent number GB2053376.
11. Chistiakov, Vladimir. "Medición de flujo". Ed. Pueblo y Educación. 1ra reimpresión. 1987. SNLC: RA 01.44050.0.

12. Collado, L. E., García, D., Donate, E. García, O. "Metodología para el dimensionamiento de las boquillas CECYEN". Tesis presentada para el título de Ingeniero Mecánico. Universidad de Matanzas, 2005.
13. Domínguez Alonso F.J, 2002. Modelación, Simulación y Optimización del proceso de transferencia de masa que ocurre en la cristalización de azúcar por enfriamiento a nivel industrial. Tesis doctoral, ISPJAE, La Habana.
14. Donate, E., García, O., Lincheta, E. Estudio analítico de las boquillas CECYEN para la atomización de combustibles pesados. Trabajo de Diploma, Universidad de Matanzas, 2003.
15. Fernández, D.; López, H.; Hernández, J. Pruebas Evaluativas de Quemadores. CTE José Martí. Informe Técnico. INEL-UNE Julio 2003.
16. Fox, Robert T W.; Mc Donnal, Alan T. "Introducción a la mecánica de los fluidos". Ed. McGraw – Hill. México. 1995.
17. Hersh, S., Dan, G.V., Kerho, S.E. Conti, A. (1995). V-Jet atomizer. Patent number WO9507761.
18. Holmes, Michael J. (1996), Three-fluid atomizer. Patent number US5484107.
19. <http://www.spray-cas.com>.
20. Hyo-Bong, Kim., Joon-Sik, Lee., Byung-Kyu, Park. (1999). Interchangeable and rotatable twin-fluid atomizer. Patent number EP0919289.
21. Jasuja, Arvind K. "The role of air and fuel properties in mean drop size correlations for airblast atomized gas turbine". 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp31-37.
22. Jicha, M., Jedelsky, J., Otahal, J., Slama, J. "Influence of some geometrical parameters on the characteristics of effervescent atomization". 18th ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, Spain. pp 345-350.
23. Kirpalani, D.M., Mc Cracken, T.W. "Performance diagnostic for nozzles fed with multiphase flow". 18th ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, Spain. pp 369-374.
24. Kreith, Frank. Mechanical Engineering Handbook, Multiphase Flow (online). 1999.3.12 (citado 2004-03-10) Disponible en Internet <http://www.figm.umcc.cu> ISBN 0-8493-9751-0.

25. Kushari, A. "A twin-fluid internally mixed swirl atomizer". 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp 429-433.
26. Landa, Juan. Elementos para el perfeccionamiento del diseño y explotación de sistemas de trasiego y preparación para la combustión del petróleo crudo nacional. Tesis presentada para el título de Master en Termoenergética. Universidad de Matanzas, 2003.
27. Laryea, G. N., No, S. Y. "Spray characteristics of charge injected electrostatic pressure-swirl nozzle". 18th ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, Spain. pp 209-214.
28. Lincheta Mesa, Eduardo, et al "Desarrollo de atomizadores para petróleos pesados". III Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica. 2003.
29. Lincheta Mesa, Eduardo. "Estudio para elevar la eficiencia en los atomizadores de fuel-oil pesado mediante la optimización de su diseño geométrico". Informe técnico. 2003. Matanzas. Cuba.
30. Lincheta, E., Barroso, J., Suárez, J., Barrera, F., Lozano, A. "Performance of internal mixing air-assisted nozzles for heavy fuel oil burners". 18th ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, Spain. pp 321-326.
31. Lincheta, E., Suárez, J., Barroso, J., Lozano, A., Barreras, F. "Cabezal atomizador de alta eficiencia para líquidos viscosos y su uso" Registro de Patente 2002-0322, aprobada en diciembre 2004 en Cuba, P200202944 en España y con extensión Internacional PCT/ES03/00643 que cubre todos los países de la Comunidad Europea y los Estados Unidos de América.
32. Lockwood Hanford, N (2000). Low pressure dual fluid atomizer. Patent number WO0037143.
33. Lockwood Hanford, N. (2000). Low pressure dual fluid atomizer. Patent number US6098897.
34. Ludovic, Petit., Marc, Nicolas. (2002). Fluid product atomizer has pump or valve actuated by side lever for use as a nasal spray. Patent number FR2812826.
35. Mandal, B., Barman, P., Kushari, A. "Study of primary atomisation in a helical passage pressure-swirl atomizer". 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp 423-428.

36. Preobrazhensky V. P., 1980, "Measurements and Instrumentation in Heat Engineering. Edit. Mir, Moscú.
37. Rodríguez Nogueira T, 2003 "El enfoque de Producción más Limpia en el mantenimiento predictivo de agregados del generador de vapor de Centrales Termoeléctricas. Memorias del Trabajo de Investigación en Tesina presentada por Programa de Doctorado en Gestión Ambiental y Desarrollo sostenible. Universidad de Girona. España. Julio, 2003
38. Rodríguez, R., Lincheta, E. Desarrollo de un Visualizador para estudio de fenómenos internos en atomizadores de doble fluido. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas, 2004.
39. Rossmeilssl, M., Wirth, K. E. "Influence of the nozzle geometry on the atomisation of superheated liquids". 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp 384-391.
40. Sánchez A. J. L, 1999, "Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento de los sistemas centralizados de aire acondicionado", Tesis doctoral, Universidad de Matanzas.
41. Sánchez Sánchez, L.M.: Estudio de la estructura turbulenta de un inyector coaxial. Resumen de la Tesis de Doctorado en Tecnologías Industriales [online]. Disponible en INTERNET: <http://www.uc3m.es/uc3m/gral/TC/ESDO/esdo06t.html>
42. Serge, Herry., Ludovic, Petit.(2003). Fluid product atomizer e.g. nasal spray has actuator on dispensing head operated by lateral pressure. Patent number FR2832329.
43. Shames, I. H.: *Mecánica de fluidos*. Tercera Edición, Editorial Mc Graw-Hill, Santa Fe de Bogotá, Colombia, 847 páginas, 1995.
44. Tamaki, N., Shimizu, M., Hiroyasu, H. "Atomization of high-viscous liquid jet by internal mixing twin-fluid atomizer" 19th ILASS EUROPE 2004, Nottingham, United Kingdom pp 400-405.
45. Tapia, Z., Chávez, A. "Internal flow in a Y-jet atomizer. Numerical modelling". 18th ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, Spain. pp 333-338.

46. Triballier, K., Cousin, J., Dumouchel, C. "Relations between internal flow structures and disintegration processes in spray formation". 18th ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, Spain. pp 43-48.
47. Vetterick, Richard E., Bailey, Robert T., Myers, Robert B.(1989) .Atomisers. Patent number EP0299757.
48. Walzel, Peter. (1999). Low pressure atomizer with several adjacent two-substance nozzles, especially for fluid and gaseous mediums. Patent number DE19758557.