

Wilson line determination for 2-2-4 trimethyl-pentane (iso-octane)

Numa Márquez¹, Malcolm Lawes², Yung-yu Lee³

¹Departamento de Energía, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Zulia, Maracaibo, 4011-A 526, Venezuela, Telf.: (0261) 7598794, numa.marquez@gmail.com.

²School of Mechanical Engineering, The University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, U.K. T:+44 (113) 3432108. m.lawes@leeds.ac.uk. ³Engine R&D Center, Environment and Energy Division, Korea Institute of Machinery and Materials. 171 Jang-dong Youseong-ku Daejeon Korea 305-343. T:+82 (42)-8687381 F:+82 (42)-8687305. ylee@kimm.re.kr

Abstract

Traditionally, properties for most substances are determined using graphs or equations obtained under thermodynamic equilibrium, however, real processes seldom occur in such circumstances. In a system under non-equilibrium thermodynamic conditions, condensation does not begin precisely when saturation is reached, this delay in the onset of condensation is called supersaturation and is defined as the ratio of the instantaneous fuel partial pressure to its vapour pressure. The onset of homogeneous nucleation (start of condensation), in terms of thermodynamic properties, is commonly called the Wilson point. The Wilson line is defined by a series of Wilson points obtained at different expansion conditions and represents the deviation with respect to the equilibrium condition in the process of condensation. This line was determined for iso-octane in the present work, at low expansion rates, based on a significant amount of measurements of pressure, temperature and drop size during expansion processes out of equilibrium in a combustion vessel at laminar and turbulent conditions.

Keywords: onset of condensation, Wilson line, supersaturation.

Determinación de la línea Wilson para el 2-2-4 trimetil-pentano (iso-octano)

Resumen

La determinación de propiedades para sustancias se realiza usando ecuaciones o gráficos obtenidos bajo condiciones de equilibrio termodinámico, sin embargo, muy pocos procesos reales ocurren en tales condiciones. En un proceso de expansión fuera del equilibrio, la condensación no comienza cuando se alcanza la saturación, este retraso se conoce como sobresaturación definiéndose en términos de la relación entre la presión parcial instantánea después del inicio teórico de la condensación, a su presión de vapor. Al punto de sobresaturación crítica donde se inicia la condensación fuera de equilibrio (formación de núcleos) se le llama, en términos de propiedades termodinámicas, el punto Wilson. La línea Wilson está definida por una serie de puntos Wilson obtenidos a diferentes condiciones de expansión y representa la desviación con respecto a la condición de equilibrio en el proceso de condensación. Esta línea fue determinada para iso-octano en este trabajo a bajas tasas de expansión, basada en una significativa cantidad de mediciones de presión, temperatura y diámetro de gotas (aerosol) durante procesos de expansión fuera de equilibrio en un recipiente para combustión mayormente bajo condiciones laminares y también turbulentas.

Palabras clave: sobresaturación, línea Wilson, inicio condensación.

Introducción

La sobresaturación, S , puede definirse en términos de la relación entre la presión parcial del combustible en la mezcla sobresaturada en cualquier instante después del inicio de la condensación, P_{fs} , a su presión de vapor, P_v .

$$S = P_{fs} / P_v \quad (1)$$

Donde la presión parcial del iso-octano en cualquier instante viene dada por:

$$P_f = P \frac{\phi}{59.5 + \phi} \quad (2)$$

La relación de equivalencia, ϕ , es un valor adimensional correspondiente a la riqueza de la mezcla que viene dado por el cociente entre las relaciones aire-combustible estequiométrica y real (estas relaciones son en base de masa). Y la correspondiente presión de vapor fue calculada mediante

$$P_v = 133.3 * 10^{(A+BT+C \log(T)+DT+ET^2)} \quad (3)$$

con $A=50.3422$, $B=-3278.9$, $C=-16.111$, $D=0.007426$, $E = -9.1804E-14$ y la constante, 133.3, convierte la presión desde mmHg a Pa [1].

Esto implica, que la mezcla está seca cuando $S < 1$, saturada a $S = 1$, y sobresaturada para $S > 1$. Una sobresaturación crítica, S_{cr} (cierta cantidad de subenfriamiento), es necesaria para iniciar el proceso de condensación fuera de equilibrio [2]. Al principio en el proceso de condensación se forman núcleos sobre los cuales crecen las micro-gotas a medida que la presión y temperatura decrecen en un proceso de expansión. Los datos aportados por la presente investigación permiten obtener directamente valores de S_{cr} y contribuir en la validación de modelos.

La tasa de reducción de presión o tasa de expansión (dP/dt) puede tener un efecto significativo en el comienzo de la nucleación [3]. Gyarmathy y Meyer (1965) [4] mostraron en forma inequívoca que la posición de la línea de Wilson, con respecto a la línea de saturación, era una función de $-(1/P)(dP/dt)$. Donde P es la presión al inicio de la condensación.

Aparato experimental

Los aerosoles fueron generados en dos aparatos de combustión o bombas una cilíndrica y otra esférica, usando el principio de la cámara de nube Wilson. Los dos equipos podían ser operados a presiones iniciales de hasta 300 y 1000kPa (respectivamente). La descripción detallada de los componentes para cada equipo se encuentra en [5]. El aparato de combustión y equipos auxiliares para la preparación y calibración de nubes de aerosoles se muestra esquemáticamente en la Figura 1. El aparato de combustión comprende el recipiente cilíndrico o esférico (bombas) los cuales poseen acceso óptico para diagnósticos con laser, el recipiente de expansión y la tubería de conexión entre ambos. La temperatura podía ser controlada mediante el uso de dos calentadores eléctricos internos a las bombas.

En el presente trabajo fueron llevadas a cabo una significativa cantidad de mediciones de presión, temperatura y diámetro de gotas durante el proceso de expansión para caracterizar las propiedades del aerosol y los equipos auxiliares requeridos para esto están descritos a continuación.

La termocupla utilizada para la medición de temperaturas durante la expansión fue del tipo K con respuesta de alta frecuencia, con alambres muy finos, de tan solo 25 μ m de diámetro. La termocupla estaba conectada a un termómetro, Digitron Ltd, modelo 2751-K, con indicación digital y salida analógica, a través de un selector de doce vías. La lectura digital tenía una resolución de 0.1°C. La salida analógica era usada para grabar los registros en computador. La respuesta rápida es requerida ya que el aerosol solo se forma muy brevemente y la variación de temperatura es abrupta.

Mediciones de presión estática total absoluta y presión parcial del combustible, así como el cambio de presión durante la expansión fueron realizadas en la bomba cilíndrica usando un sistema transductor-amplificador de presión DRUCK Ltd. PDCR 911 de precisión. Estaba colocado inmediatamente detrás de la válvula de aislamiento, tan cerca como fue posible de la bomba. Tenía un rango de presión de 0 a 700kPa ab-

solos, con una resolución de 0.1kPa, y fue calibrado por el fabricante. La respuesta en tiempo del dispositivo era significativamente más rápida que la requerida durante el proceso de expansión. El transductor no tuvo significativas variaciones en pruebas a condiciones idénticas, aún para cambios de presión pequeños (1.5kPa).

La presión y temperatura fueron digitalizados en una tarjeta de conversión analógico-a-digital (CAD) de Keithley Instruments Inc., DAS 801, la cual estaba instalada en un PC Elonex 433. La precisión global de la adquisición de datos era típicamente de 0.01%. Las señales de entrada al CAD eran voltajes analógicos del termómetro y transductor de presión (amplificada). La sensibilidad de salida del termómetro era de 1mV/K y aquella del transductor/amplificador 1mV/kPa. Una medición típica de temperatura tenía un ancho de banda de aproximadamente 50K, o 50mV y una medición de presión típica tenía una de aproximadamente 100-200kPa o 100-200mV. La conversión A/D era 4096 bits de rango completo, el rango de voltaje de entrada más apropiado, entre las opciones disponibles, para ambos presión y temperatura, era $\pm 500\text{mV}$ rango completo. Esto devolvió una resolución de 0.25K/bit, con una precisión de 0.1K (0.01% rango completo).

Se requirió medir otros parámetros tales como la distribución temporal y espacial del tamaño de gotas, un anemómetro de fase Doppler (AFD) fue utilizado para ello, dicho equipo fue descrito detalladamente en [5] y puede apreciarse esquemáticamente en la Figura 1. Con él se efectuó la caracterización de los aerosoles producidos por ambas bombas y consta de: (i) Un laser Ar-ion de 30mW, (ii) sistema óptico divisor de haz y manipulador, capaz de dividir el haz Ar-ion en dos diferentes longitudes de onda 514 (verde) y 488nm (cian), (iii) monitor de señal Doppler, el cual contenía una celda Bragg, para desfazar los haces duplicados de ambas longitudes de onda, (iv) Cable de fibra-óptica, preservante de polarización, para llevar los cuatro haces al transmisor. (v) Transmisor con lente convergente, $f=600\text{mm}$. (vi) Receptor con tres foto-detectores y longitud focal de 600mm, (vii) Sistema de posicionamiento.

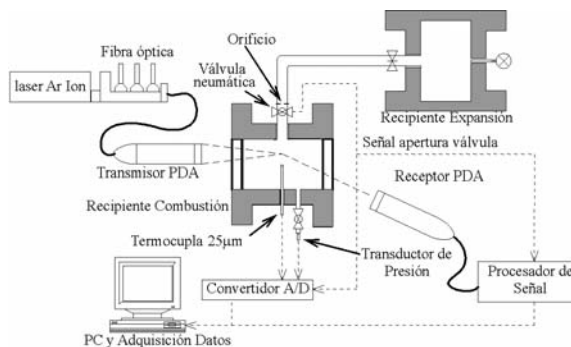


Figura 1. Equipo experimental.

Metodología

Para la producción de los aerosoles, se evacuaba la bomba y el recipiente de expansión utilizando una bomba de vacío, luego se aislaba la bomba del resto usando una válvula neumática. Entonces se inyectaba el iso-octano, mientras los ventiladores internos a la bomba permanecían encendidos para ayudar a evaporar el líquido y mantener las condiciones homogéneas, posteriormente se introdujo el aire para llevar la mezcla gaseosa a la condición de presión y relación de equivalencia requerida, las presiones iniciales para la bomba cilíndrica fueron de 150, 200, 250 y 300kPa y las relaciones de equivalencia 0.8, 1, 1.2 y 1.4, estas mismas relaciones de equivalencia se usaron en la bomba esférica y las presiones iniciales fueron de 700 y 1000kPa y las temperaturas iniciales 323 y 333K, respectivamente.

Para las mediciones laminares reportadas aquí los ventiladores fueron detenidos antes de la expansión. Luego de unos 10s en los cuales la mezcla se estabilizaba se abría la válvula que permitía el paso controlado de parte de la sustancia al recipiente de expansión, lo cual causaba una reducción en la presión y temperatura de la mezcla que la lleva a un régimen de condensación, en forma de una neblina de micro-gotas de líquido (aerosol), en este caso termodinámicamente generado. El control en la expansión de la mezcla se logró utilizando placas orificios con diversos diámetros de orificio (5, 6, 7, 8 y 10mm para laminares y 25mm y sin orificio para turbulentos), colocadas en la tubería de conexión entre la bomba y el recipiente de expansión. El proceso de expan-

sión causó niveles de turbulencia despreciables. En los casos de mediciones turbulentas los ventiladores fueron dejados operando al momento de abrir la válvula que permitía la expansión de la mezcla. La técnica fue previamente desarrollada por [6] en uno de los aparatos usados por los presentes autores. También [7, 8, 9] usaron este método previamente.

Un control exacto de las condiciones experimentales y la adquisición de datos requirió una sincronización precisa de los equipos de medición y adquisición de datos con la expansión. El parámetro clave para todos los experimentos era el comienzo de la expansión. Todos los equipos eran iniciados por un interruptor principal (IPI), conectado a la válvula de expansión. Este consistía de un micro-interruptor, el cual era activado por el desplazamiento (de aproximadamente 2°) del vástago del actuador de la válvula de expansión, antes de que la válvula comience a abrir realmente. La consistencia en la apertura de la válvula fue evaluada y discutida por [6].

Resultados

De las mediciones efectuadas con el AFD, se graficaron los diámetros de gotas individuales como función del tiempo desde el inicio de la expansión. Los símbolos en la Figura 2 representan mediciones en 6 diferentes posiciones dentro de la región central de la bomba cilíndrica. Los aerosoles son todos de iso-octano estequiométrico expandidos desde 200kPa y 300K. La Figura 2 muestra la tendencia de incremento en tamaño de gotas con el tiempo en el período mostrado. La línea entera es una curva de ajuste a los datos experimentales y fue extrapolada a cero para encontrar el tiempo de inicio de la condensación. También mostrado en la Figura 2 aparece la desviación estándar del diámetro individual de gota, el cual resultó bastante bajo, considerando la variación espacial y entre pruebas combinada.

En la Figura 3 se muestra la variación de los diámetros de gotas promediados cada 0.1s, D_{10} , con el tiempo, para aerosoles de iso-octano a las mismas condiciones iniciales de la Figura 2, en un rango de relaciones de equivalencia desde 0.8 a 1.4. Cada curva representa el promedio de al menos dos expansiones. Estos resultados demuestran que el comienzo de la condensación

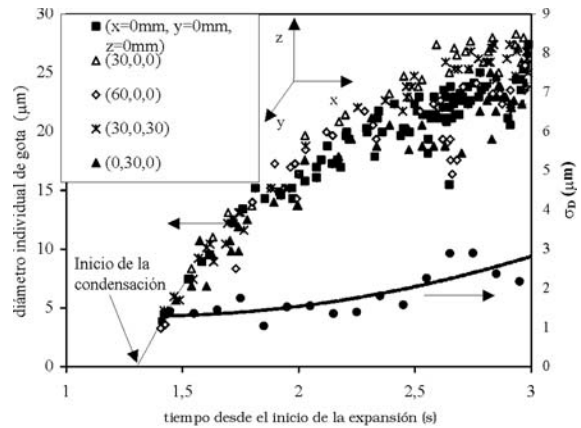


Figura 2. Variación en el diámetro individual de gota con el tiempo para aerosoles de iso-octano.

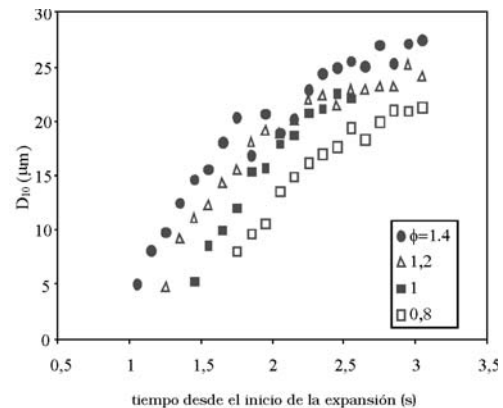


Figura 3. Variación en D_{10} con el tiempo para aerosoles de iso-octano a varias relaciones de equivalencia formados por expansión desde 200kPa y 303K.

depende de la relación de equivalencia al igual que el máximo D_{10} obtenible. También fue posible demostrar que el inicio de la condensación depende de la presión inicial y la tasa de expansión, tal como se puede apreciar en las Figuras 4 y 5, a medida que la presión inicial es mayor, el inicio de la condensación llega antes. También a medida que se incrementa el diámetro del orificio que conecta la bomba al recipiente de expansión, lo que significa que la tasa de expansión es mayor, la condensación ocurre más tempranamente.

Los resultados de la medición de presión y temperatura muestran el efecto en un sistema cuyas condiciones difieren del equilibrio termodinámico, la condensación no comienza cuando

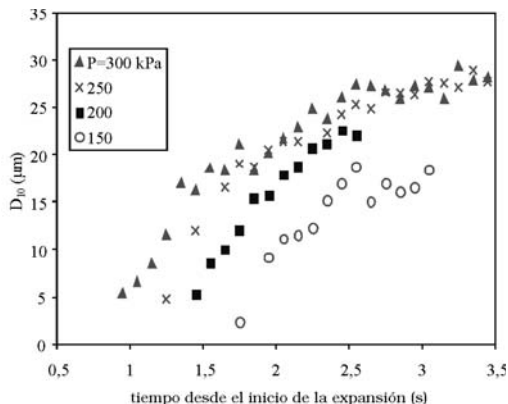


Figura 4. Variación en D_{10} con el tiempo para aerosoles de iso-octano estequiométricos formados por expansión desde varias presiones iniciales (150, 200, 250 y 300 kPa) y 303K.

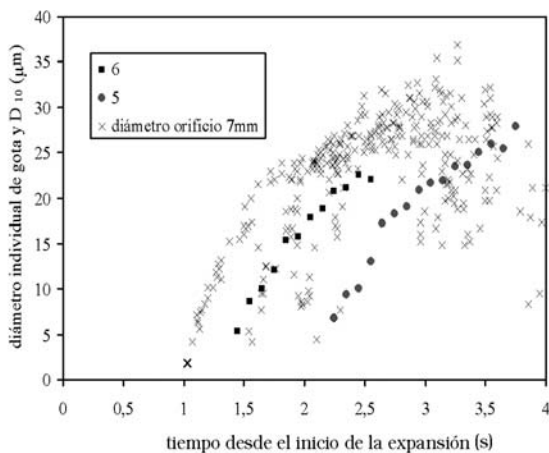


Figura 5. Variación en D_{10} y diámetro individual de gota con el tiempo para aerosoles de iso-octano a las mismas condiciones de la Figura 2 y diámetro de orificios de 5, 6 y 7 mm.

se alcanza la saturación, esto se ilustra en la Figura 6. Esta muestra la variación típica de temperatura y presión del combustible con el tiempo para un aerosol formado por expansión a partir de una mezcla gaseosa estequiométrica de iso-octano, expandido desde una presión de 1000 kPa y 333K, el tamaño del orificio era de 10 mm. La línea fina en la Figura 6 representa la variación de la temperatura con el tiempo. La línea gruesa representa la presión parcial del combustible, P_f , calculada a partir de la correspondiente variación de presión con el tiempo usando la Ec. (2). La otra línea en la Figura representa la

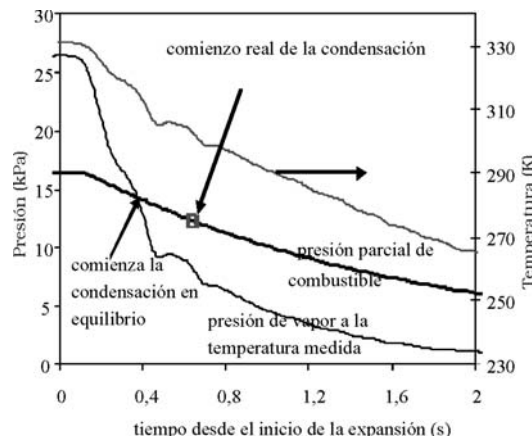


Figura 6. Variación de presión y temperatura con el tiempo, para un aerosol de iso-octano.

presión de vapor, la cual ha sido determinada como una función de la temperatura únicamente usando la Ec. (3).

Para las condiciones de equilibrio termodinámico, la condensación comenzara cuando $P_f = P_v$, donde las dos curvas de presión se cruzan en la Figura 6. Sin embargo, la condensación no comienza realmente hasta el punto indicado con el cuadrado en la Figura 6, en el cual $P_v < P_f$. Lo que implica que la mezcla está sobresaturada ($S > 1$) al instante de iniciarse la condensación.

La Figura 7 muestra la variación de presión con el tiempo y la correspondiente tasa de reducción de presión para una expansión de iso-octano estequiométrico desde una presión inicial de 200 kPa y temperatura inicial de 303K. La caída de presión está representada por la línea fina y la tasa de caída de presión por la gruesa. Como es de esperarse, mientras la presión se reduce, la tasa de reducción de presión disminuye desde una tasa alta (valores negativos), durante las etapas iniciales de expansión, hasta cero, cercano al punto de equilibrio de presión, el cual ocurre alrededor de 4 s a partir del comienzo de la expansión en la Figura 7. Resultados similares fueron hallados para diferentes tasas de expansión proporcionadas por los diámetros de orificios utilizados, presiones iniciales y relaciones de equivalencia.

Líneas Wilson para iso-octano en condiciones pertinentes a este trabajo pueden verse en las Figuras 8 a la 10. Los símbolos en estas figuras representan valores medidos de la presión parcial y la temperatura del combustible al inicio

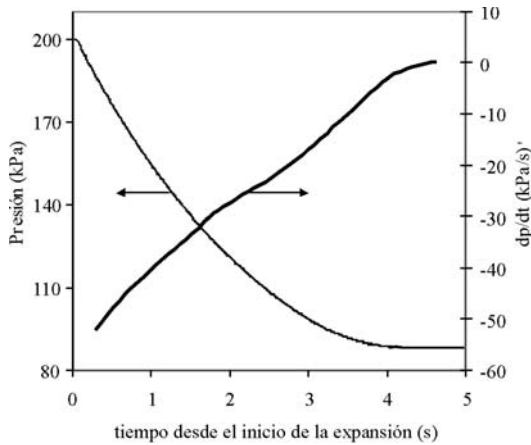


Figura 7. Variación de la presión y del gradiente de presión con el tiempo para iso-octano. Diámetro del orificio 6mm.

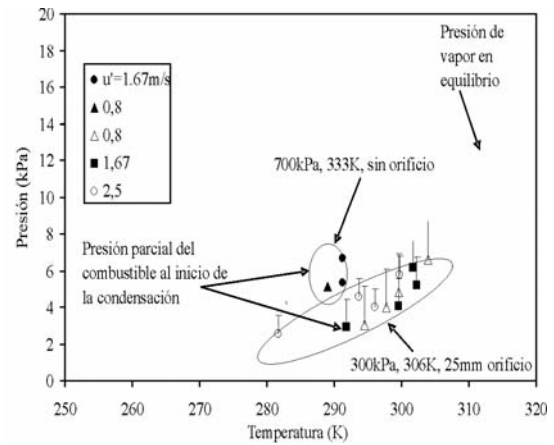


Figura 10. Comparación de presión parcial del combustible y presión de vapor para un aerosol de iso-octano al inicio de la condensación sometido a u' entre 0.84 y 2.5m/s y $-(1/P)(dP/dt)$ entre 2.5 y $5s^{-1}$.

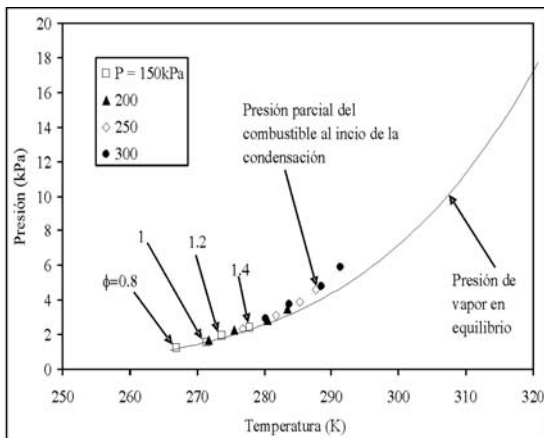


Figura 8. Línea Wilson para un aerosol de iso-octano sometido a $-(1/P)(dP/dt) < 0.2s^{-1}$.

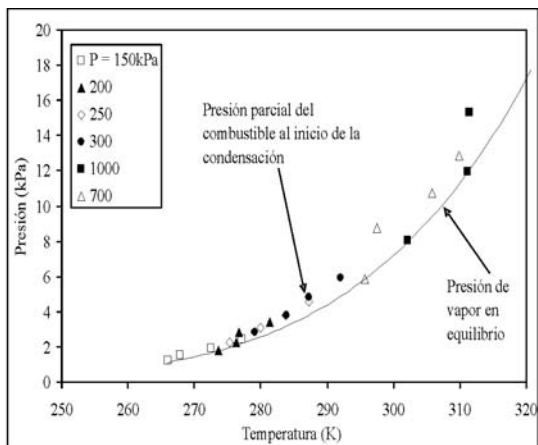


Figura 9. Línea Wilson para un aerosol de iso-octano sometido a $-(1/P)(dP/dt)$ entre 0.3 y $0.4s^{-1}$

de la nucleación, determinados como en las Figuras 2 y 6 (el momento de la nucleación determinado a partir de la gráfica de tamaño de gota contra tiempo y utilizado para hallar la P y T correspondiente). Cada símbolo representa un punto Wilson, y todos los puntos juntos constituyen la línea Wilson. Cada punto Wilson fue obtenido por expansión desde una diferente condición inicial de presión, temperatura, relación de equivalencia y tasa de expansión. Las líneas llenas en las Figuras 8 a la 11 muestran la variación de la presión de vapor saturado, P_v , de iso-octano con la temperatura. Fueron determinadas a partir de la correspondiente temperatura de condensación, a cada una de las condiciones mencionadas anteriormente, usando la Ec. (3). Como se muestra en la Figura 8, la presión parcial del combustible, al inicio de la condensación, se incrementa con la presión inicial y la relación de equivalencia. Los mismos comentarios aplican a las Figuras 9 y 10. En la Figura 8 la separación entre las líneas Wilson y de saturación es muy pequeña. Esto era de esperarse, tal como lo explica [4], debido a los valores pequeños del parámetro $-(1/P)(dP/dt)$ el cual era menor que $0.2s^{-1}$. La separación entre las dos líneas se incrementa con P_{fs} y T. Esto implica que aquellas condiciones a las cuales ocurre el inicio de la condensación tempranamente, alto P_{fs} y T, están más lejos de la condición de equilibrio que aquellos que se condensan tardíamente, a baja P_{fs} y T. La Figura 9 exhibe las mis-

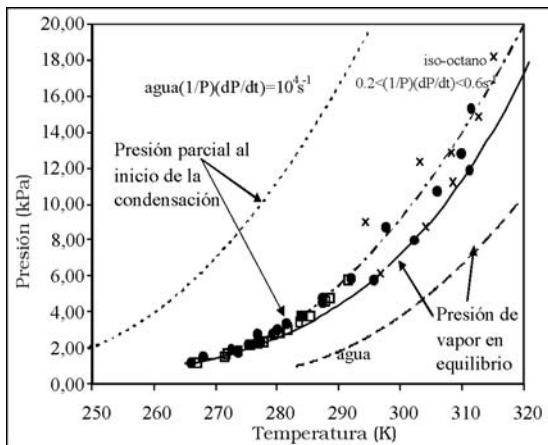


Figura 11. Líneas Wilson para iso-octano sometido a $-(1/P)(dP/dt)$ entre 0.2 y 0.6 s^{-1} y agua.

mas tendencias descritas para la Figura 8, aunque los resultados son mas dispersos, la separación entre la presión de vapor y las líneas Wilson es mayor, esto probablemente debido a la mayor tasa de expansión experimentada por los aerosoles en este caso. Resultados similares a los de las Figuras 8 y 9 fueron obtenidos para valores de $-(1/P)(dP/dt)$ menores que $0.6s^{-1}$ en condiciones laminares.

La Figura 10 exhibe resultados para condiciones turbulentas, con velocidad turbulenta (u) raíz media cuadrada (rms) entre 0.84 y 2.5m/s. El parámetro $-(1/P)(dP/dt)$ es un orden de magnitud mayor en la Figura 10 que en la 8 y 9. Los resultados están más dispersos y ambiguos que para las condiciones laminares. En muchos casos el inicio de la condensación fue alcanzado antes que la correspondiente condición de equilibrio, esto puede estar asociado con el campo de temperatura fluctuante presente en la region central de las bombas debido a la turbulencia. La alta dispersión en la supersaturación crítica podría deberse a la incertidumbre en la determinación del inicio de la nucleación por extrapolación de la línea ajustada a los valores de D_{10} (en Figura 2) a cero. Probablemente, esta incertidumbre podría ser resuelta por mediciones de atenuación de laser. Sin embargo, los autores no pudieron efectuar esta medición debido a restricciones experimentales y de tiempo.

Los símbolos en la Figura 10 indican el inicio de la nucleación a partir de la extrapolación y

la barra ha sido dibujada hasta el punto donde las primeras gotas fueron medidas con AFD. Es evidente cuan cerca están estos valores de la línea de presión de vapor. Es obvio que los datos mostrados en la Figura 10 no están en concordancia con las mediciones laminares previas, prescindiendo de los datos discrepantes de la última Figura todos los datos laminares colapsan a una línea única. Teniendo en cuenta que la variación en el parámetro $-(1/P)(dP/dt)$ es pequeña (para las condiciones de las Figuras 8 y 9), lo anterior es un resultado lógico. La Figura 11 muestra todos los datos de los experimentos laminares representados por símbolos. La línea de trazos y puntos es un ajuste polinomial a estos datos experimentales. La línea llena representa, como previamente, la línea de saturación para iso-octano. Una comparación con valores reproducidos de [3] para agua se muestra también. La línea de trazos largos es la de saturación para el agua, y la línea de trazos cortos es la de presión parcial del vapor condensado a $-(1/P)(dP/dt)=10^4s^{-1}$. Es evidente que la separación entre las dos líneas para el agua es considerablemente mayor que la correspondiente al iso-octano, esto es de esperarse, debido al significativamente mayor valor de $-(1/P)(dP/dt)$ usado en [3].

La Figura 12 muestra valores de sobresaturación crítica, S_{cr} , que son los puntos de partida para la condensación en condiciones fuera de equilibrio termodinámico, como función de $-(1/P)(dP/dt)$. Dos líneas de trazos se dibujaron indicando los valores máximo y mínimo de S_{cr} . Aunque los resultados están bastante dispersos, se puede observar, que los valores mínimos de S_{cr} permanecen constantes mientras que los valores máximos se incrementan. La línea llena en la Figura 12 representa los valores medios de S_{cr} en cada intervalo de $-(1/P)(dP/dt)$, como es de esperarse, estos valores también muestran tendencia al incremento. Para el rango evaluado en el presente trabajo, los valores medios de S_{cr} no cambian significativamente y concuerdan bastante bien con valores estimados por [6] que utilizó un modelo termodinámico para predecir fracciones de vapor y líquido en aerosoles de iso-octano a condiciones semejantes a los de la presente investigación. La Figura 13 es un gráfico similar al de la Figura 12 pero el primero incluye los valores de [3] para agua. Desestimando la diferencia significativa en los valores de $-(1/P)(dP/dt)$, entre

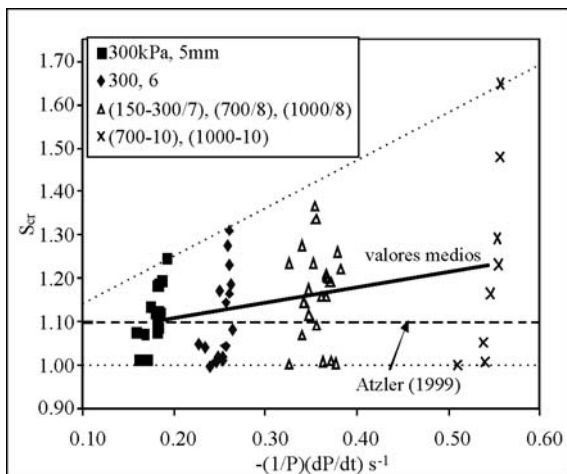


Figura 12. Factor de supersaturación crítica para aerosoles de iso-octano estequiométricos expandidos desde varias presiones y temperaturas iniciales y diámetros de orificios entre 5 y 10mm.

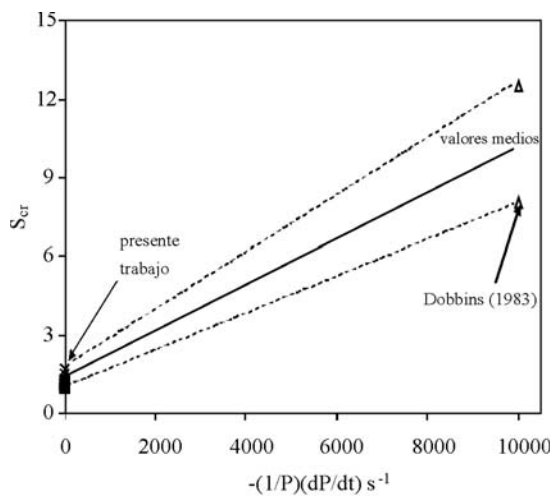


Figura 13. Comparación de la variación S_{cr} con $-(1/P)(dP/dt)$ entre aerosoles de iso-octano y agua.

los dos equipos experimentales, se puede apreciar la misma tendencia creciente del valor medio de S_{cr} en la Figura 13.

Conclusiones

Se efectuó la caracterización de aerosoles de 2-2-4 trimetil-pentano (iso-octano) generados termodinámicamente en recipientes de combustión a partir de la expansión de mezclas gaseosas aire-combustible laminares desde un rango de pre-

siones de 150, 200, 250, 300, 700 y 1000kPa y temperatura inicial desde 300 hasta 333K. La tasa de expansión (dP/dt) fue controlada y se obtuvo rangos del parámetro $-(1/P)(dP/dt)$ desde valores menores a $0.2s^{-1}$ hasta valores alrededor de $0.6s^{-1}$

Se estableció el inicio de la condensación en base a los datos experimentales obteniéndose las condiciones de presión y temperatura correspondientes, pudiéndose establecer a partir de ellas las presiones de saturación y de vapor.

Se determinó la línea Wilson para el iso-octano correspondiente a los rangos de presión de entre 2 y 20kPa y de temperatura entre 260 y 320K. Se comparó la tendencia de la línea Wilson con respecto a la presión de vapor calculada a partir de los registros experimentales, pudiéndose apreciar que la línea Wilson tiende a separarse y lo hace en mayor medida, de la de presión de vapor (condición de equilibrio) a medida que el parámetro $-(1/P)(dP/dt)$ aumenta, esto es, la presión desde la cual se expande es mayor y consecuentemente su temperatura o la tasa de expansión es más alta debido al uso de un orificio de mayor diámetro. También se comparó la línea de Wilson para iso-octano con la correspondiente para vapor de agua pudiéndose apreciar tendencias similares en cuanto a la separación entre líneas Wilson y aquellas de presión de vapor y también en lo referente a los valores medios de S_{cr} Los cuales van en aumento a medida que $-(1/P)(dP/dt)$ crece. Con respecto a esto último los datos aportados por este trabajo resultaron útiles para la validación del modelo de [6].

Unidades y nomenclatura

- D : Diámetro, μm
 - f : Longitud focal, mm
 - P : Presión, kPa
 - S : Sobresaturación (adimensional)
 - t : Tiempo, s, ms
 - T : Temperatura, K, C
 - u' : Velocidad turbulenta raíz media cuadrada (rms), m/s
- Símbolos griegos
- ϕ : Relación de equivalencia, (adimensional)
 - σ_D : Desviación estándar del diámetro individual, μm

Subíndices

l_0 : Medio basado en longitud, μm

cr : Crítico

Abreviaturas

CAD : Convertidor analógico a digital

PC : Computador personal

AFD : Anemómetro de fase Doppler

IPI : Interruptor principal de inicio

rms : Raíz media cuadrada

f : Combustible

v : Vapor

Referencias bibliográficas

1. Yaws, C. L., Handbook of vapor pressures, Vol. 3, Gulf Publications Co., 1994.
2. Amelin, A.G., Theory of fog condensation, Israel Program for Scientific Translations, Ed. B.V. Deryagin, Jerusalem, 1967.
3. Dobbins, R., Theory of the Wilson line for steam at low pressures, J. Fluids Engineering, Transaction of the ASME, Vol. 105, N° 4, (1983) pp. 414-422.
4. Gyarmathy, G. y Meyer, H., Spontane Kondensation, Forschungsheft 508, VDI Verlag, Dusseldorf, 1965.
5. Lawes M., Lee Y. y Marquez N., Comparison of iso-octane burning rates between single-phase and two-phase combustion for small droplets, Combust. flame, Vol. 144, (2006) 513.
6. Atzler, F., Fundamental studies of aerosol combustion, PhD Thesis, University of Leeds, Leeds, 1999.
7. Hayashi, S. y Kumagai, S., Flame propagation in fuel droplet-vapor-air mixtures, 15th Symp. (Int.) Combust., pp. 445-452, 1974.
8. Hayashi, S., Kumagai, S. y Sakai, T., Propagation velocity and structure of flames in droplet-vapor-air mixtures, Combust. Sci. Tech., Vol. 15, (1976), pp. 169-177.
9. Nomura, H., Izawa, K., Ujiie, Y., Sato, J., Marutani, Y., Kono, M. y Kawasaki, H., An experimental study on flame propagation in lean fuel droplet-vapor-air mixtures using microgravity conditions, 27th Symp. (Int.) Combust., pp. 2667-2674, 1998.

Recibido el 20 de Septiembre de 2011

En forma revisada el 24 de Septiembre de 2012