



Estudio computacional del tiempo de autoencendido de combustible líquido en Ignition Quality Tester (IQT)

Computational study of autoignition time of liquid fuel in Ignition Quality Tester (IQT)

Nestor Isaac Maldonado Mora¹; Juan Miguel Mantilla González²

¹ Master of Science, Universidad Nacional de Colombia. nimaldonadom@unal.edu.co

² Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia. jmmantillag@unal.edu.co

Resumen

Se simula el tiempo de autoencendido de un combustible líquido, influenciado por el cambio de presión inicial en cámara y masa inyectada en una cámara de combustión cerrada. Este proceso se encuentra asociado a la prueba en un *Ignition Quality Tester (IQT)* [ASTM D6890-13b]. En este trabajo esta prueba es estudiada numéricamente usando el software Converge CFD. Se seleccionaron los modelos más apropiados de inyección de combustible líquido, rompimiento y evaporación de gotas, cinética de reacción y turbulencia. El modelo se valida contra resultados experimentales publicados. Se encuentran cambios significativos en el tiempo de autoencendido y en la forma en que la combustión se realiza dentro del IQT como función del combustible inyectado y la presión inicial.

Palabras clave ignition quality tester (IQT), inyección de combustible líquido, tiempo de autoencendido.

Abstract

The self-ignition time of a liquid fuel is simulated, influenced by the change in initial pressure in the chamber and mass injected in a closed combustion chamber. This process is associated to the test in an Ignition Quality Tester (IQT) [ASTM D6890-13b]. In this paper, this test is studied numerically using the Converge CFD software. The most appropriate models of liquid fuel injection, drop breakup and evaporation, reaction kinetics and turbulence were selected. The model is validated against published experimental results. Significant changes are found in the self-ignition time and in the way combustion takes place within the IQT as a function of the injected fuel and the initial pressure.

Keywords: Ignition delay, Ignition Quality Tester (IQT), liquid fuel injection.

1.-Introducción

El banco de pruebas de calidad de la ignición, o Ignition Quality Tester (IQT), es un sistema de combustión por inyección de combustible líquido, que tiene volumen constante y está diseñado para medir la demora en el encendido (ID por sus siglas en inglés) de

combustibles de baja volatibilidad ("ASTM D7170-14: Standard test method for determination of derived cetane number (DCN) of diesel fuel oils-fixed range injection period, constant volume combustion chamber method," n.d.), (Allard et al., 1997, 1999, 2001) Utilizando el IQT junto con el

procedimiento descrito en la norma ASTM D6890-13b ("ASTM d613-13: Standard test method for cetane number of diesel fuel oils," n.d.), es posible medir el ID y con este, determinar el número derivado de cetano (DNC por sus siglas en inglés) de diferentes combustibles

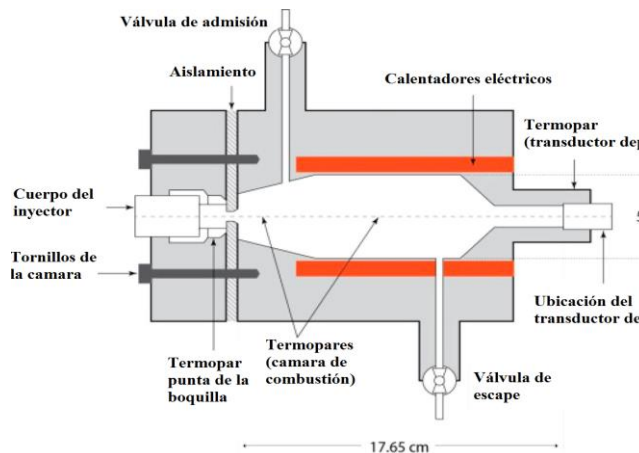


Figura. 1. Esquema de la cámara de combustión del IQT (Bogin, Osecky, Chen, Ratcli, et al., 2014)-

La norma ASTM D6890-13b establece que se debe tener aire en el interior de la cámara aislada (ver figura 1), este aire aumenta su temperatura gracias a un conjunto de calentadores eléctricos hasta alcanzar una temperatura de 545°C y una presión de 2.137 MPa. En estas condiciones se inyectan 82mg del combustible a ser estudiado y mediante el uso de un conjunto de sensores, se detecta el momento en el cual inicia la inyección (levantamiento de la aguja del inyector) y se mide el momento en el cual inicia la combustión, representada por un aumento de 138 kPa (pressure recovery point o PRP) de la presión de la cámara con respecto a la presión inicial de la prueba (Allard et al., 1997). La diferencia entre el tiempo de estos dos sucesos medido en milisegundos da como resultado el ID (Bogin

et al., 2011), tal y como se puede ver en la figura 2.

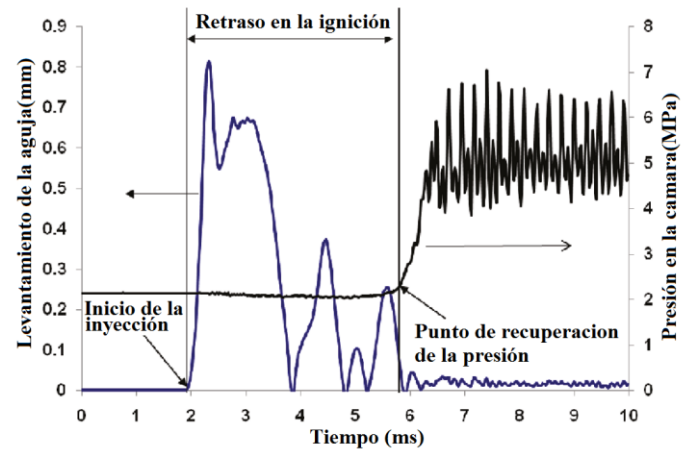


Figura. 2. Retraso en la ignición medido usando un IQT (Bogin et al., 2011).

El número derivado de cetano se calcula usando la ecuación 1.1.

$$DCN = 4.460 + 186.6/ID \quad \text{Eq. 1.1}$$

Donde el ID se debe introducir en milisegundos ("ASTM D7170-14: Standard test method for determination of derived cetane number (DCN) of diesel fuel oils-fixed range injection period, constant volumen combustion chamber method," n.d.).

Además de permitir la medición del ID y la determinación del DCN, el IQT permite la validación de mecanismos de combustión y modelos de inyección como los reportados por (Bogin, Osecky, Chen, Ratcliff, et al., 2014), en el cual se estudia el coeficiente de temperatura negativa de varios alquenos. También en (Bogin et al., 2011) se estudia la influencia del tamaño y velocidad de las gotas de combustible en la medición de la demora en el encendido. Así mismo, en (Bogin et al., 2013), se verifica el coeficiente de

temperatura negativa en alquenos a bajas presiones, la evaporación y la relación aire-combustible de la mezcla. Además en (Alfazazi, Abiola, Naser, Ho, & Sarathy, 2016) se modeló la ignición de iso-octano usando un modelo lagrangiano en dos etapas. En este trabajo se busca determinar la influencia que tienen la presión inicial de la cámara y la masa inyectada sobre el ID mediante un modelo computacional establecido en Converge CFD V 2.1.1. ("Converge 2.1.0 Theory Manual," n.d.)

MODELOS DEL PROCESO DE INYECCIÓN

El proceso de inyección es de gran importancia en muchas aplicaciones industriales, entre las cuales se incluye la combustión. Sobre todo en aquellos casos en los cuales el combustible es inyectado de forma directa en la cámara de combustión (Stiesch, 2003). En estos tipos de procesos el combustible se encuentra en primer lugar en estado líquido y es necesario que este se atomice y evapore para que se pueda mezclar con oxígeno (o aire) y de esta forma se pueda llevar a cabo la combustión. Existen dos formas principales de modelar fenómenos de chorro. El modelo de gota continuo (CDM por sus siglas en ingles), el cual plantea una ecuación para el chorro con 11 variables independientes lo cual implica un muy alto costo computacional (Stiesch, 2003) La segunda forma es usando los llamados modelos de gotas discretos (DDM por sus siglas en ingles). Estos modelos obtienen soluciones de la ecuación del chorro basado en modelos de Monte-Carlo, en los cuales tratan las gotas pulverizadas como partículas estocásticas llamadas parcelas (o parcels), las cuales se pueden ver como conjuntos de gotas idénticas que no

149

interactúan entre sí, pero a su vez interactúan con otras parcelas. Generalmente se trabajan dos tipos de ruptura de la columna de líquido, la primera de ellas, llamada ruptura primaria, ocurre directamente en la vecindad del orificio del inyector y describe la ruptura de la fase líquida intacta en las primeras gotas. El proceso por el cual estas gotas aun grandes se dividen en gotas más pequeñas es conocido como ruptura secundaria (Stiesch, 2003). Se han desarrollado un conjunto importante de modelos que pretenden simplificar el análisis de la inyección, a continuación, se describen los principales según el fenómeno físico que modela.

1.1. Ruptura del chorro:

Para la ruptura del chorro los principales modelos son el Kelvin-Helmholtz (KH), el Rayleigh-Taylor (RT) y modificaciones de estos. El modelo de *Kelvin-Helmholtz* se basa es el análisis de las inestabilidades que se producen sobre una columna de líquido como consecuencia de entrar en una atmosfera gaseosa con diferente densidad y velocidad (Stiesch, 2003).

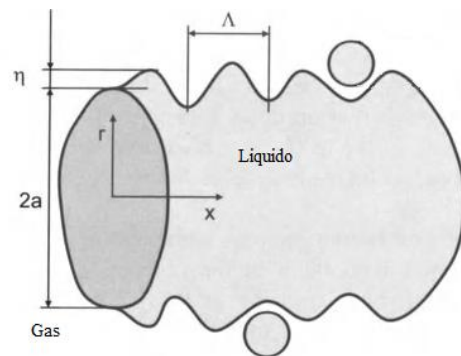


Figura. 3. Esquema del crecimiento de las perturbaciones superficiales en el modelo Kelvin-Helmholtz (Stiesch, 2003).

Se considera la columna de líquido inyectada de diámetro igual al diámetro de la boquilla, en este caso $2a$ (ver figura 3), de forma discreta como una sucesión de gotas, las cuales mantienen la trayectoria del eje del inyector hasta el momento cuando ocurre el primer rompimiento, a partir del cual las gotas hijas se desvían. La amplitud de las perturbaciones η se irá incrementando exponencialmente por la interacción entre la fase líquida y la gaseosa con una tasa de crecimiento complejo $\omega = \omega_r + i\omega_i$ de tal modo que las perturbaciones se ajustan a una onda de Fourier:

$$\eta(t) = \eta_0 e^{ikx + \omega t} \quad \text{Eq.2.1}$$

Donde η_0 es la amplitud inicial de la onda, mientras que el número de onda $k = 2\pi/\Lambda$ donde Λ es la longitud de onda.

Una versión modificada de este modelo es el llamado Kelvin-Helmholtz-ACT el cual incluye los fenómenos aerodinámicos, de cavitación y turbulencia en la ruptura primaria (Som & Aggarwal, 2010).

Los modelos KH son ampliamente utilizados tanto en ruptura primaria como secundaria.

Para el modelo Rayleigh-Taylor, las inestabilidades producidas en la interface gas-líquido son causadas por el arrastre aerodinámico de las gotas, por lo cual es un modelo usado principalmente en el rompimiento secundario, donde ya hay gotas. Para este modelo, la aceleración o desaceleración de una gota es producida por la fuerza de arrastre entendida como:

$$|\vec{F}| = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_g v_{rel}^2}{\rho_l r} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Donde v_{rel} es la velocidad relativa entre la gota y el gas y r es el radio de la gota

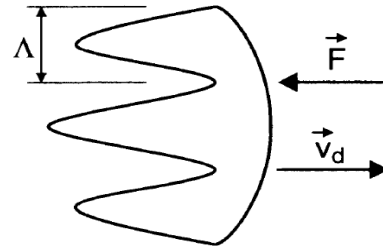


Figura. 4. Esquema de las inestabilidades en una gota de líquido según el modelo de Rayleigh-Taylor (Stiesch, 2003).

1.2. Arrastre de gota:

Para este caso se suele trabajar con dos modelos, el primero de arrastre en donde se determina el coeficiente de arrastre de las gotas teniendo en cuenta la variación de la forma de estas a medida que esta es afectada por las perturbaciones de los modelos de ruptura. Para el segundo modelo se asume que las gotas son esferas y se usa el coeficiente de arrastre de esta geometría. ("Converge 2.1.0 Theory Manual," n.d.).

Modelo de colisión:

Para modelar las colisiones entre las parcelas existe el método sin contador de tiempo o (NTC por sus siglas en inglés), el cual implica un submuestreo estocástico de las parcelas dentro de cada celda. Con este modelo se tiene en cuenta los efectos de las colisiones en la velocidad y tamaño de las gotas, así como la variación del número de estas. (Schmidt & Rutland, 2000).

1.3. Interacción gota/pared:

Modelo de película en la pared: es un modelo híbrido el cual realiza algunos cálculos asumiendo cantidades individuales basadas en partículas y otros cálculos basados en

películas. En este modelo se incluyen los fenómenos de iniciación de la película, conservación del momento de las gotas, rebote de aquellas gotas con un bajo número de Weber (We) y salpicadura para aquellos con alto número de We ("Converge 2.1.0 Theory Manual," n.d.).

1.4. Modelo de evaporación:

El modelo de Frossling calcula la tasa de cambio del radio de las gotas debido a la evaporación de estas, a partir de la correlación de Frossling (ecuación 2.3.)

$$\frac{dr_0}{dt} = -\frac{\rho_g D}{2\rho_l r_0} B_d Sh_d \quad \text{Eq.2.3}$$

Donde ρ_g y ρ_l son las densidades de la fase gaseosa y líquida de la gota respectivamente, r_0 es el diámetro de esta, D es la difusividad del vapor de líquido en el aire, B_d relación de fracciones máscas de la gota y Sh_d es el número de Sherwood de la gota (Amsden, O'Rourke, & Butler, 1989).

2. MODELO COMPUTACIONAL

El modelo computacional es implementado en Converge CFD ("Converge 2.1.0 Theory Manual," n.d.), y busca simular una inyección en estado transitoria de n-Heptano en una cámara de combustión similar a la presente en el IQT. El mecanismo de reacción utilizado fue el "Converge n-heptane" el cual cuenta con 42 especies. Los modelos usados en la simulación y los parámetros de esta se definen en las tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1. Modelos usados en la simulación

Proceso de la inyección	Modelo
Ruptura del chorro	KH-ACT y RT
Arrastre de gota	Arrastre dinámico
Colisión	NTC
Interacción gota/pared	Película en la pared
Evaporación	Correlación de Frossling

Tabla 2. Parámetros de la simulación

Parámetro	Valor
Número de parcels	69000
Número de celdas	206973
Tiempo de simulación [ms]	10
Combustible	n-Heptano (C7H16)
Duración de la inyección [ms]	7
Temperatura de inyección [K]	329,15
Temperatura de la cámara[K]	861
Angulo de inyección [°]	35
Modelo de turbulencia	κ - ϵ RANS
Número de Weber de rebote	5
Tipo de inyector	De cono solido
Forma de la tasa de inyección	Variable

En la figura 5 se puede ver la malla con la cual se realizaron las simulaciones.

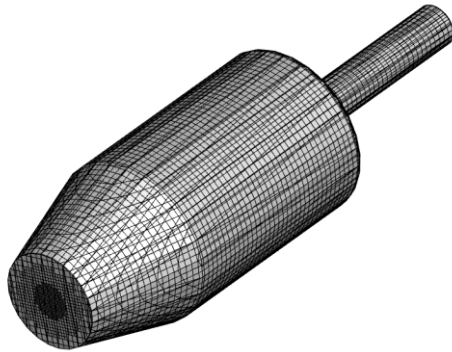


Figura. 5. Vista isométrica de la malla del IQT de ~200000 celdas

El modelo propuesto fue validado al comparar sus resultados con pruebas experimentales realizadas por (Bogin et al., 2011), tal y como se puede ver en la figura 6, de esta comparación se obtuvo un error de 2.14% en la medición del ID.

3. RESULTADOS

Se realizó un total de 4 simulaciones variando la presión de la cámara al iniciar la inyección y la masa inyectada. En la tabla 3 se especifican los parámetros de cada caso.

Tabla 3. Presión en la cámara y masa inyectada en cada caso simulado.

Caso	Presión de la cámara [MPa]	Masa inyectada [mg]
1	2.1	83
2	4.2	71
3	4.2	39
4	2.1	53

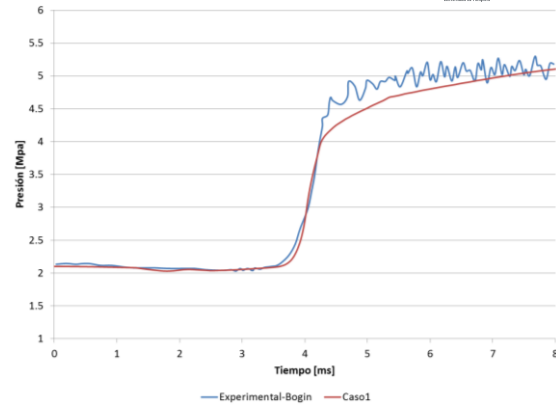


Figura. 6. Validación del modelo comparando las presiones en la cámara del IQT documentada por Bogin (Bogin et al., 2011) y las presiones obtenidas en las simulaciones realizadas.

Los valores de presión y temperatura obtenidos en las 4 simulaciones junto con los resultados experimentales se reportan en las figuras 7 y 8 respectivamente.

Se calculo el ID de dos maneras, la primera de ellas usando el PRP y la segunda a través del cálculo de la derivada de la presión con respecto del tiempo (dP/dt), para ambos casos los resultados se presentan en la figura 9.

Se midió la penetración del combustible, definida como la distancia en la cual se encuentra el 95% de la masa inyectada, este valor se presenta en la figura 10.

Se determino adicionalmente la relación de equivalencia de combustible-aire a partir de las especies producto de la combustión (ver figura 11).

En la figura 12 se comparan los valores de masa líquida de combustible inyectado con la masa en estado gaseoso de dicho combustible como función del tiempo.

En las figuras 13 y 14 se reportan los valores de las emisiones en fracciones máscas de OH

y CO₂ respectivamente y su relación con la masa de combustible en estado gaseoso, se decidió usar estas emisiones por estar directamente relacionadas con el ID.

Finalmente, en las figuras 15, 16 y 17 se reportan las distribuciones de temperatura de los 4 casos en 2 ms, 4 ms y 5 ms.

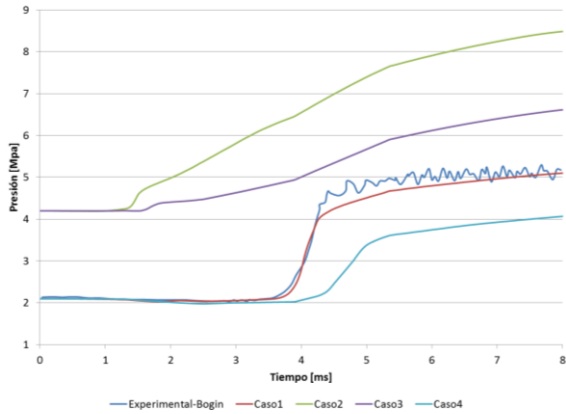


Figura. 7. Presiones en la cámara para cada uno de los casos.

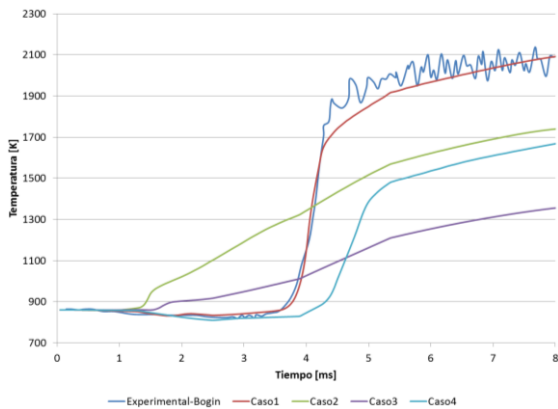


Figura. 8. Temperaturas en la cámara para cada uno de los casos.

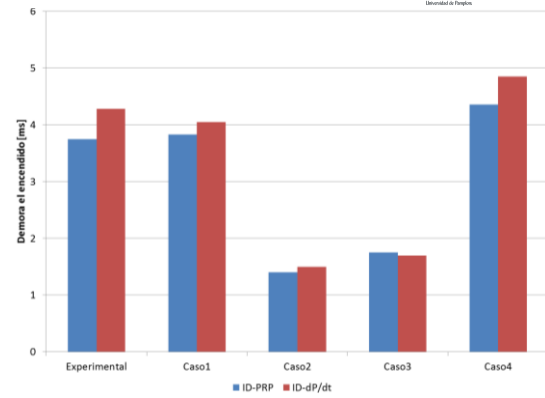


Figura. 9. Demora en el encendido de cada caso calculado por PRP y dP/dt.

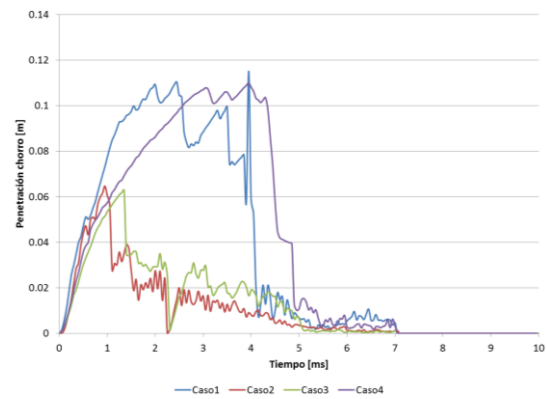


Figura. 10. Penetración del chorro para cada uno de los casos.

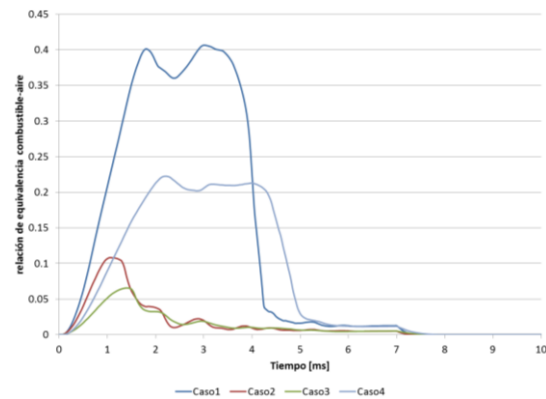


Figura. 11. Relación de equivalencia combustible- para cada uno de los casos.

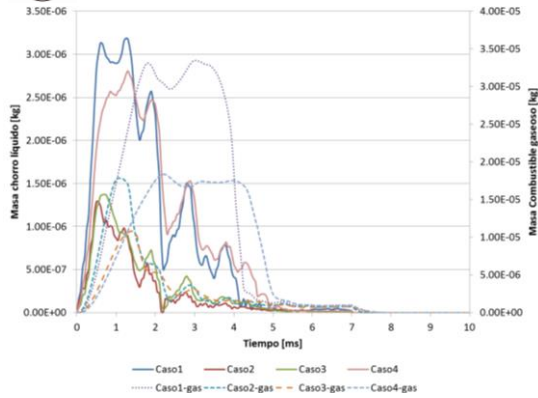


Figura. 12. Masa líquida de combustible inyectado y masa gaseosa de combustible en la cámara en cada caso.

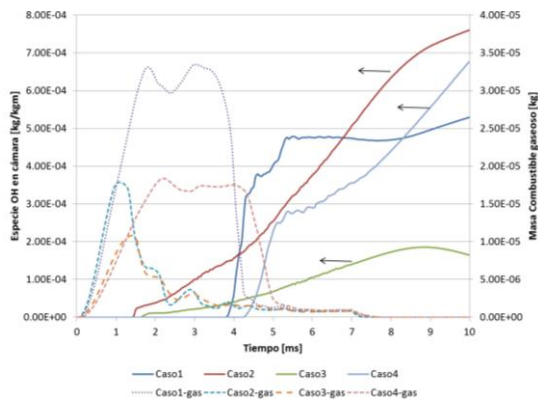


Figura. 13. Fracción másica de OH y masa gaseosa de combustible en la cámara en cada caso.

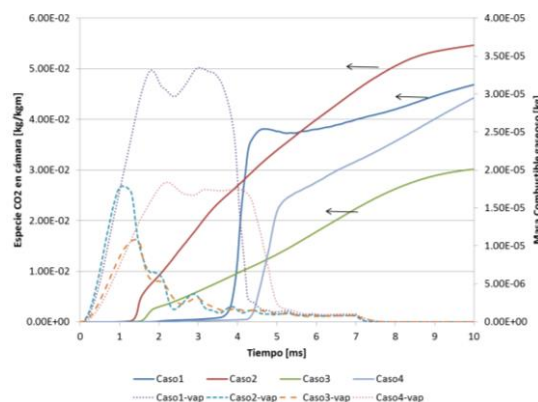


Figura. 14. Fracción másica de CO2 y masa gaseosa de combustible en la cámara en cada caso.

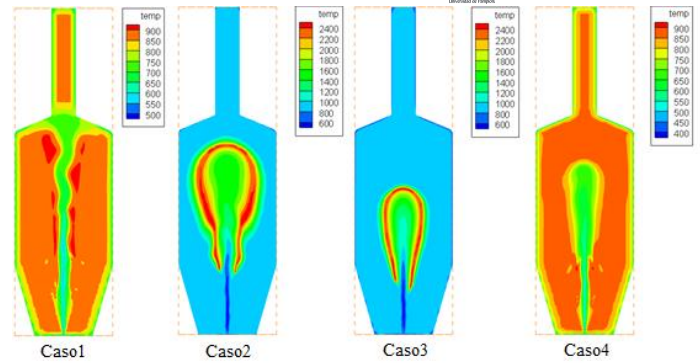


Figura. 15. Distribución de temperaturas en 2 ms para cada uno de los casos.

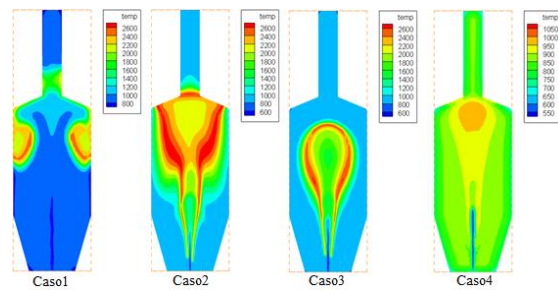


Figura. 16. Distribución de temperaturas en 4 ms para cada uno de los casos.

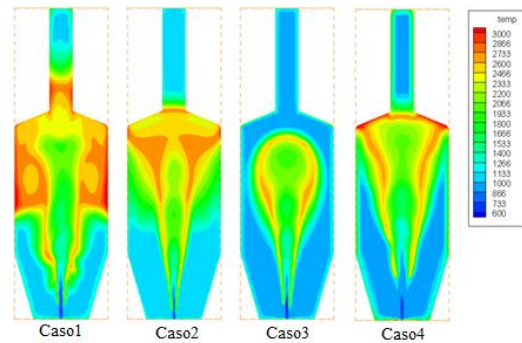


Figura. 17. Distribución de temperaturas en 5 ms para cada uno de los casos.

4. ANALISIS

De los resultados de presiones en la cámara para los cuatro casos (ver figura 7), se puede notar la influencia de la presión inicial de la cámara y de la masa inyectada en el ID. Al

comparar el ID de los casos 2 y 3 (presión inicial de 4.2MPa) con los casos 1 y 4 (presión inicial de 2.1MPa), se puede ver claramente como al tener una presión mayor al momento de realizar la inyección de combustible se reduce significativamente el tiempo de encendido, debido principalmente al favorecimiento en las rupturas primarias y secundarias de las gotas a causa de la alta presión, causando a su vez una evaporación y mezcla más aceleradas. Por otro lado, al reducir la masa inyectada de combustible se evidencia un aumento en el tiempo de autoencendido, lo cual se debe a que, al contar con una menor masa, se obtienen mezclas pobres las cuales presentan mayor resistencia al encendido.

Al comparar las temperaturas obtenidas (ver figura 8), se puede notar como con mayores presiones en la cámara, se alcanzan temperaturas más bajas, lo cual está directamente relacionado con el aumento en la masa de aire que debe ser calentado. Así mismo se puede ver como al inyectar una menor cantidad de combustible se obtienen temperaturas menores, debido a que se dispone de menos energía, la cual proviene directamente de la masa de combustible.

Al comparar las longitudes de penetración (ver figura 10), se nota una clara influencia de la presión de la cámara, al aumentar esta presión, el chorro de combustible encuentra una mayor restricción al movimiento por lo cual se presentan distancias de penetración mucho menores. Por otro lado, al reducir la cantidad de masa de combustible inyectado, es posible notar como se logran distancias de penetración similares, sin embargo, alcanzar estas distancias toma más tiempo que al inyectar más masa, lo cual se debe a la

influencia de la fuerza de arrastre sobre las gotas.

Al analizar el comportamiento de la relación de equivalencia combustible-aire (ver figura 11), se evidencia que a menores presiones mayor relación de equivalencia. Lo anterior se debe a que se cuenta con mucho menos aire en el interior de la cámara. Por otro lado, al inyectar menos masa (para una misma presión) se logran relaciones de equivalencia menores. Es importante tener en cuenta que el comportamiento de estas relaciones de equivalencia se ve fuertemente influenciado por la forma en la cual se realiza la inyección de combustible, la cual depende de la presión de la cámara, por lo cual se tienen formas diferentes de la relación de equivalencia al variar esta presión.

En la figura 12, al comparar la masa de combustible líquido inyectado con la masa de combustible gaseoso en la cámara, se puede evidenciar un retardo en la formación del combustible gaseoso. Esto está directamente relacionado con los procesos de ruptura del chorro líquido y de las gotas formadas (atomización), así como del proceso de calentamiento y cambio de fase de estas gotas.

En este estudio el análisis de emisiones se limitó a las especies OH y CO₂, (ver figuras 13 y 14 respectivamente), en ambos casos se comparan sus fracciones máxicas con respecto a la masa gaseosa de combustible. Resulta interesante notar como al comenzar a consumirse el combustible gaseoso se inicia la formación de OH, así como de CO₂, lo cual indica claramente el inicio de la reacción. Es importante notar además que debido a que no todo el combustible se consume al iniciar

la reacción, esta se prolonga a medida el combustible se transforma. Esto se puede ver de forma más clara en aquellos casos con mayor presión inicial (caso 2 y 3), donde debido a la alta presión se tiene un inicio de la reacción más temprano. A pesar de esto en ese instante se consume poco más que la mitad del combustible gaseoso, y debido justamente a esta alta presión, se tiene una reacción que tarda mucho más tiempo en llegar al equilibrio químico por lo cual la formación de estas especies se prolonga a lo largo de toda la simulación.

Se presenta una comparación de las distribuciones de temperatura en los 4 casos para 3 tiempos. Para el caso en el cual van 2 milisegundos de la simulación se puede ver (figura 15), las diferencias considerables de distribución de temperatura para cada uno. En el caso 1 se evidencia una zona fría a lo largo del eje de la cámara debido a la entrada del chorro de combustible en esta, así mismo se puede ver como en este instante no ha iniciado la combustión. Algo similar a esto ocurre en el caso 4, donde la zona fría es más corta, debido a que la masa inyectada es menor y esto causa que su penetración presente un retardo. Por otro lado, en los casos 2 y 3 se tiene que para este tiempo ya se ha iniciado la combustión y se puede ver claramente el frente de llama, al igual que con los casos 1 y 4, se presenta un retardo en la llama del caso 3 con respecto a la del caso 2, debido a la reducción en la masa inyectada.

Pasados 4 milisegundos (ver figura 16), se puede ver como para el caso 1, la reacción ya ha ocurrido y el aire comienza a enfriarse salvo por dos zonas. También se observa como el combustible frío continúa siendo inyectado al interior de la cámara. En el caso

156

2 se tiene una llama que continúa avanzando alejándose de la punta del inyector, algo similar ocurre en el caso 3, donde la llama avanza lentamente debido al efecto de la presión en la cámara. Para el caso 4 aún no se presenta un claro frente de llama, debido a que el ID inicia pasado los 4 milisegundos, sin embargo, se puede notar una zona caliente, en la cual ya ha iniciado la reacción entre el aire de la cámara y el combustible inyectado.

Finalmente, al ver la distribución de temperaturas pasados 5 milisegundos (ver figura 17), se observa como en los 4 casos continúa ocurriendo la inyección de combustible líquido en menor proporción. Para este tiempo ya ha ocurrido el ID de los 4 casos y es posible notar el avance de la llama, lo cual denota que la reacción se sigue llevando a cabo, de manera más lenta para los casos 2 y 3, debido a la alta presión como ya se mencionó.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo en Converge CFD para la inyección de n-heptano en un IQT, el cual fue validado con resultados experimentales obteniendo un error de 2.14% en la medición del ID. El modelo se utilizó para medir el ID al variar la presión inicial dentro la cámara y la masa inyectada, presentando menores ID al aumentar tanto la masa como la presión. El modelo desarrollado permitió observar también como la distancia de penetración del combustible inyectado depende fuertemente de la presión de la cámara, donde para mayores presiones se obtienen menores penetraciones. Así mismo al inyectar menos masa se presenta



un retardo en la penetración más no una reducción de esta.

Fue posible evidenciar también como existe un retraso importante entre la masa inyectada del combustible en estado líquido y la masa de combustible en estado gaseoso, debido a la combinación de los fenómenos de atomización, calentamiento y evaporación.

Finalmente, el modelo permitió estudiar la influencia de la masa inyectada y la presión de la cámara en el comportamiento de la reacción (42 especies del mecanismo de n-heptano de Converge CFD), identificando los diferentes frentes y avances de llama.

Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias a la empresa Convergent Science que fue la proveedora del software y las licencias académicas que permitieron obtener los resultados aquí expuestos.

Referencias Bibliográficas

Alfazazi, A., Abiola, O., Naser, N., Ho, S., & Sarathy, S. M. (2016). Two-stage Lagrangian modeling of ignition processes in ignition quality tester and constant volume combustion chambers. *Fuel*, 185, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.017>

Allard, L. N., Hole, N. J., Webster, G. D., Ryan, T. W., Ott, D., Beregszazy, A., ... Rickeard, D. J. (1997). Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQT) -Part II. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/961182>

Allard, L. N., Webster, G. D., Iii, T. W. R., Baker, G., Beregszazy, A., & Fairbridge, C. W. (1999). Analysis of the Ignition Behaviour of

the ASTM D-613 Primary Reference Fuels and Full Boiling Range Diesel Fuels in the Ignition Quality Tester (IQT TM) - Part III, (724).

<https://doi.org/https://doi.org/10.4271/1999-01-3591>

Allard, L. N., Webster, G. D., Iii, T. W. R., Matheaus, A. C., Baker, G., Beregszazy, A., ... Jones, G. (2001). Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in the Ignition Quality Tester (IQTTM) - Part IV, (724). <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/2001-01-3527>

Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., & Butler, T. D. (1989). KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/6228444-kiva-ii-computer-program-chemically-reactive-flows-sprays>

ASTM d613-13: Standard test method for cetane number of diesel fuel oils. (n.d.). <https://doi.org/10.1520/D0613-13>

ASTM D7170-14: Standard test method for determination of derived cetane number (DCN) of diesel fuel oils-fixed range injection period, constant volumen combustion chamber method. (n.d.). <https://doi.org/10.1520/D7170-14>

Bogin, G. E., Defilippo, A., Chen, J. Y., Chin, G., Luecke, J., Ratcli, M. A., ... Dean, A. M. (2011). Numerical and Experimental Investigation of n -Heptane Autoignition in the Ignition Quality Tester (IQT), 5562–5572. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/ef201079g>

Bogin, G. E., Osecky, E., Chen, J. Y., Ratcli, M. A., Luecke, J., Zigler, B. T., & Dean, A. M. (2014). Experiments and Computational Fluid Dynamics Modeling Analysis of Large n - Alkane Ignition Kinetics in the Ignition



Quality Tester. 158
<https://doi.org/10.1021/ef500769j>

Bogin, G. E., Osecky, E., Chen, J. Y., Ratcliff, M. A., Luecke, J., Zigler, B. T., & Dean, A. M. (2014). Experiments and computational fluid dynamics modeling analysis of large n-alkane ignition kinetics in the ignition quality tester. In *Energy and Fuels*. <https://doi.org/10.1021/ef500769j>

Bogin, G. E., Osecky, E., Ratcliff, M. A., Luecke, J., He, X., Zigler, B. T., & Dean, A. M. (2013). Ignition quality tester (IQT) investigation of the negative temperature coefficient region of alkane autoignition. *Energy and Fuels*. <https://doi.org/10.1021/ef301738b>

Converge 2.1.0 Theory Manual. (n.d.).

Schmidt, D. P., & Rutland, C. J. (2000). A New Droplet Collision Algorithm, *80*, 62–80. <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6568>

Som, S., & Aggarwal, S. K. (2010). Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines. *Combustion and Flame*, *157*(6), 1179–1193. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.02.018>

Stiesch, G. (2003). *Modelling Engine Spray and Combustion Processes*. (Springer, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08790-9>

*Para citar este artículo: Maldonado Mora N.I.; Mantilla González J.M. Computational study of autoignition time of liquid fuel in Ignition Quality Tester (IQT). Revista Bistua. 2019.17(1):147-158

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Maldonado Mora N.I Universidad Nacional de Colombia. email:nimaldonadom@unal.edu.co

Rebido: Marzo 21 de 2018

Aceptado: Agosto 17 de 2018