

Modelado de la combustión en motores Diésel: revisión del estado del arte

Modelling of combustion in Diesel engines: a review of the state of the art

Gabriel Fernando García Sánchez; Jorge Luis Chacón Velasco*; Arlex Chaves Guerrero

Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente – GIEMA, CICT-Energías,
Universidad Industrial de Santander (UIS),
Cra. 27 Calle 9, Bucaramanga, Colombia
* jchacon@uis.edu.co

Fecha Recepción: 02 de noviembre de 2012
Fecha Aceptación: 07 de junio de 2013

Resumen

El estudio del proceso de combustión en motores Diésel ha sido, durante años, un tema de gran interés debido principalmente a la creciente necesidad de mejorar el rendimiento de los motores, reducir el consumo de combustible y reducir la emisión de contaminantes. Los estudios experimentales presentan la desventaja de requerir grandes recursos económicos y tiempo en su realización, razón por la cual se utilizan modelos computacionales que permiten estudiar el proceso de combustión de una forma más económica y práctica. En este artículo se presenta una revisión de varios de los modelos de combustión en motores Diésel más relevantes, desarrollados a nivel nacional e internacional, con el fin de dar al lector una visión de la evolución y el estado actual de este tipo de modelos.

Palabras clave: *modelado de la combustión, motores diesel, modelos termodinámicos, modelos multidimensionales.*

Abstract

The study of the combustion process in Diesel engines has been for years a subject of great interest mainly due to the increasing need to improve engine performance, reduce fuel consumption and reduce the pollutant emissions. Experimental studies have the disadvantage of require enormous efforts, money and time, that is the reason why computer models are used to study the combustion process in a more economical and practical way. This article presents a review of the most relevant Diesel engine combustion models developed nationally and internationally, to give the reader an insight of the evolution and current status of such models.

Keywords: *combustion modeling, diesel engines, thermodynamics models, multidimensional models.*

Introducción

Los Motores de Combustión Interna (MCI), particularmente los motores Diésel, son ampliamente utilizados como fuerza motriz en aplicaciones industriales como: transporte, agricultura y generación de energía [1], lo que los hace indispensables para la sociedad actual. Sin embargo, pese a que se han visto grandes

avances en lo que respecta a la reducción de emisiones desde los años 80 [2], ellos siguen siendo los responsables de la mayor parte de la contaminación en los principales centros urbanos, incrementando así los problemas de salud de la población y el efecto invernadero [3]; por esta razón actualmente hay grandes exigencias con respecto al desarrollo de motores Diésel cada vez más eficientes y limpios, lo cual se ve

reflejado en las legislaciones mundiales sobre el tema [1,4]. Con base en lo anterior, los estudios computacionales sobre desempeño de los motores Diésel cobran gran importancia en nuestros días, ya que permiten realizar, mejoras significativas en el desempeño de los nuevos motores; tanto es así que se puede afirmar que sin modelos de simulación que cuantificaran los efectos de los procesos fundamentales en los sistemas del motor, los avances logrados en los motores actuales habrían sido imposibles [4,5].

El proceso de combustión es el aspecto más importante de un motor de combustión interna [6], por lo que su modelado es de gran relevancia al simular el comportamiento global de un motor Diésel. Los modelos de la combustión se suelen clasificar de acuerdo a la representación espacial del proceso, en este punto hay pequeñas diferencias en las categorías de clasificación utilizadas dependiendo del autor citado. De acuerdo a Heywood [4] hay dos grandes grupos en los cuales se pueden clasificar los modelos de combustión en motores Diésel: los modelos flui-dinámicos y los modelos termodinámicos, a su vez estos últimos se pueden clasificar como cero-dimensionales, fenomenológicos o cuasi-dimensionales. Fenollosa [2] propone una clasificación de los métodos de cálculo para la descripción de la combustión en dos grupos principales: métodos de descripción detallada y métodos de descripción global. Bracco [7], clasifica los métodos en tres grupos: cero-dimensionales, cuasi-dimensionales o fenomenológicos y multidimensionales. Esta última forma de clasificación será la seguida por este artículo, cabe destacar que las fronteras entre los diferentes tipos de modelos en ocasiones son un poco artificiales y algunos de ellos podrían caber dentro de varias categorías.

En los últimos años, debido al gran interés que ha despertado el uso de biocombustibles, han surgido varios modelos de combustión que buscan evaluar el desempeño de motores Diésel alimentados con nuevos combustibles. Este es un tema de especial interés para la región nororiental colombiana, la cual cuenta con una capacidad importante de producción de residuos de biomasa, como ha sido descrito por Escalante *et al.* [8]. Razón por la cual en este artículo, además de presentar la evolución de los modelos de combustión Diésel en el mundo, se hará énfasis en los modelos de combustión recientes que buscan estudiar la factibilidad del uso de biocombustibles.

Este artículo iniciará con la revisión de los modelos

multidimensionales, cero-dimensionales y cuasi-dimensionales de la combustión, comenzando en cada caso con la presentación de los trabajos desarrollados en el ámbito internacional y finalizando con los trabajos desarrollados en el ámbito nacional; y finalizará presentando una comparación de los modelos desarrollados recientemente con el fin de estudiar el desempeño de biocombustibles en motores Diésel.

Modelos multidimensionales

Los modelos multidimensionales o CFD (Computational fluid dynamics) son modelos que tienen el potencial de describir individualmente cada uno de los fenómenos físicos y químicos que tienen lugar dentro del proceso inyección-combustión. Estos se basan en la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos que ocurren dentro de la cámara de combustión [2].

El desarrollo de este tipo de modelos se remonta a finales de los años 70 [9-11], ellos suelen utilizar dos marcos de referencia principales: la descripción euleriana continua [12,13] y la descripción lagrangiana discreta [14-16]; este último suele ser el más usado debido a que tiene ciertas ventajas desde el punto de vista de solución numérica [2]. A partir de la metodología de cálculo multidimensional han nacido varios códigos CFD comerciales ampliamente utilizados, como SPEED® [17,18], FLUENT® [19] y KIVA® [20,21], siendo este último el más usado a nivel mundial [22]; y recientemente, se ha desarrollado el software de código abierto OpenFOAM [23,24], el cual ha despertado gran interés en la comunidad científica [22]. Recientemente los modelos multidimensionales han sido utilizados principalmente para estudiar los efectos de la inyección y del flujo de combustible en el desempeño y generación de emisiones del motor, como ejemplo de esto se pueden citar los trabajos de Zheng *et al.* [25] en 2005, quienes utilizaron un código CFD para estudiar los efectos del ángulo de inyección, la temperatura inicial y la composición del combustible en el ángulo de ignición, la presión en cámara y las emisiones de NOx; Jayashankara y Ganesan [26], quienes en 2010 presentaron un modelo para el estudio de los efectos de la presión de entrada y el ángulo de inyección sobre el desempeño del motor y sus emisiones de NOx y material particulado; y Shi y Reitz [27] que en el mismo año utilizaron un modelo para estudiar las estrategias de inyección óptimas en un motor de

encendido por compresión, alimentado con Diésel, gasolina y mezcla E10, y operando a condiciones de mediana y alta carga.

En Colombia se han presentado varios estudios con modelos de este tipo en la Universidad de Antioquia. En 2008, Gutiérrez [28] estudió la incidencia de la naturaleza del combustible y las condiciones locales de presión y temperatura en el proceso de inyección Diésel, así como las variables que más afectan dicho proceso, por medio de un modelo numérico CFD de la atomización y evaporación del chorro Diésel. En 2009, Agudelo y Agudelo [29] desarrollaron un modelo para simular los principales subprocesos que ocurren en un chorro Diésel usando un código CFD de libre acceso, dicho modelo se usó para evaluar el efecto del tipo de combustible, la presión de inyección y la presión del gas ambiente en la penetración de la punta del chorro, el diámetro medio de Sauter (SMD) y la masa de combustible evaporada. En 2010, Delgado [30] presentó un estudio comparativo del proceso de combustión en términos de los parámetros característicos que lo describen, utilizando para ello el código CFD OpenFOAM.

Este tipo de modelos presenta como ventaja su capacidad de describir cada uno de los fenómenos que tienen lugar en el proceso inyección-combustión Diésel, teniendo en cuenta tanto la geometría instantánea del cilindro como la variación espacial del campo de flujo. No obstante, tienen la desventaja de un mayor consumo de tiempo computacional en comparación con los modelos termodinámicos [22,31-33] y su sensibilidad a los submodelos utilizados en los cálculos, algunos de los cuales aún no están bien definidos [2,31].

Modelos cero-dimensionales

Estos son modelos basados principalmente en la ley de conservación de la energía, en los que se asume homogeneidad espacial de las variables implicadas en el proceso [34].

Muchos modelos cero-dimensionales se basan en la descripción matemática de la forma de la ley de liberación de calor sin relación directa con la física que controla el proceso de inyección-combustión [2]. El más conocido de estos métodos es la función de Wiebe [35] que se ha utilizado desde los años 70 y se ha vuelto tan común que investigadores en varias partes del mundo han dejado de citar la fuente de la cual se originó [36]. Dicha función ha sido adaptada a lo largo de los años para su uso en motores de diferentes características. En motores

Diésel de inyección directa, en donde se presenta una fuerte liberación de calor en la combustión premezclada, se descubrió que una sola ecuación de Wiebe no era adecuada para modelar la liberación de calor característica del proceso, por lo que se empezó a utilizar una combinación de dos funciones de Wiebe (o funciones similares a ella), esto se puede apreciar en los trabajos de Dyechenko *et al.* [37,38], Ghoel [39,40], Watson *et al.* [41], Miyamoto *et al.* [42] y Witt *et al.* [43]. En motores Diésel modernos, en los que se han incorporado nuevas tecnologías y avanzados sistemas de combustión para disminuir las emisiones y el consumo de combustible, una o dos ecuaciones de Wiebe ya no resultan apropiadas para simular el calor liberado en la combustión, por lo que se han aplicado tres, cuatro o inclusive más como se puede observar en diferentes trabajos [44-46]. Una descripción detallada del proceso de desarrollo y las aplicaciones de las diferentes formas de la ecuación de Wiebe se presenta en el trabajo de Ghojel [36].

Otros modelos del tipo cero-dimensional describen el problema teniendo en cuenta la físico-química de los fenómenos ocurridos durante la combustión de forma simplificada, ellos en ocasiones también son clasificados dentro del grupo de los fenomenológicos [2]; entre los modelos de este último tipo se encuentran los trabajos realizados por: Way [47], en el que se presentan dos métodos para el cálculo de la composición y propiedades termodinámicas del gas dentro de la cámara durante la combustión; Hardenberg y Hase [48], en el cual se obtuvo una ecuación empírica para calcular el tiempo de retardo en la ignición, permitiendo evaluar los efectos del combustible, los parámetros del motor y las condiciones del motor sobre dicho tiempo de retardo; Gardner y Henein [49], en el que se desarrolló un modelo matemático con el que se analizaron los efectos de la relación de compresión en los parámetros de desempeño del motor; Harris y Pearce [50], donde se realizó un modelo que expresa el par, la potencia y el consumo de combustible como función de la velocidad del motor a cero par y la disminución de la velocidad del motor por debajo de la velocidad a cero par; y más recientemente el trabajo de Arrègle *et al.* [31], el cual identifica y cuantifica la influencia de los parámetros de inyección y las condiciones de operación en la combustión Diésel, para esto se define un nuevo parámetro denominado Tiempo Aparente de Combustión (ACT, de sus

siglas en inglés), que permite relacionar la ley de liberación de calor con la ley de inyección en el proceso de inyección-combustión Diésel; y el trabajo de Chmela *et al.* [33], el cual presenta una estrategia genérica para el desarrollo de modelos de combustión cero-dimensionales usando las ecuaciones básicas para la tasa de reacción de Arrhenius y Magnussen.

Recientemente, se han realizado varios modelos cero-dimensionales que buscan predecir el desempeño de motores Diésel alimentados con diferentes tipos de biocombustibles. En 2006, Ramadhas *et al.* [1] desarrollaron un modelo que analiza las características de rendimiento de los motores Diésel alimentados por biodiésel de semilla de caucho y sus mezclas. En 2010, Gogoi y Baruah [51] desarrollaron un modelo que predice el desempeño de un motor Diésel mono cilíndrico de 4 tiempos alimentado con mezclas de biodiésel de aceite de Karanja; Bueno *et al.* [52] obtuvieron un modelo por medio de un análisis exergético con el fin de analizar el impacto que ocasiona el uso de éster etílico de aceite de soya en un motor Diésel turbo-cargado, Colaço *et al.* [53] simularon el perfil de temperatura en un pistón de un motor Diésel bajo varias condiciones de carga, Colaço *et al.* [3] también presentaron un modelo que simula la presión en cámara de un motor Diésel operando bajo varias condiciones y usando diferentes mezclas de biodiésel. En 2011, Payri *et al.* [54] presentaron un modelo para el estudio del desempeño del motor que cubre varias de las falencias que otros modelos presentan debido a las aproximaciones asumidas durante su desarrollo, como la consideración de la cámara de combustión como un sistema cerrado, la no consideración de los cambios en la composición del gas al calcular los calores específicos de éste y la consideración de una ley de liberación de calor poco realista. Y en 2012, Patil y Akarte [55] estudiaron el desempeño de un motor Diésel alimentado con metil ester de aceite de palma. En la Tabla 1 se presenta una descripción más detallada de estos últimos modelos.

Estos modelos son relativamente sencillos teniendo como ventaja un bajo tiempo computacional frente a los modelos más complicados, como los CFD [22,31,33,56], sin embargo presentan la desventaja de no poder describir en detalle los subprocesos que ocurren durante el proceso global de combustión Diésel [33].

En Colombia se han desarrollado modelos cero-dimensionales en la Universidad de Antioquia

y la Universidad Industrial de Santander. En la Universidad de Antioquia, en el año 2000, Agudelo *et al.* [57] presentaron una metodología para la simulación del proceso de combustión en un motor de encendido por compresión de aspiración natural o turboalimentado; más adelante en el 2008 Agudelo *et al.* [58] desarrollaron un modelo de diagnóstico exergético de una zona y dos especies que se utiliza para caracterizar la operación de un motor Diésel. Por su parte en la Universidad Industrial de Santander se desarrollaron trabajos teóricos por parte de Barbosa y Salcedo [59] y Rodríguez [60], quienes desarrollaron herramientas de simulación de ciclo de un motor de cuatro tiempos con fines académicos, y Chacón [61], quien utilizó el método de Levenberg-Marquardt (LM) para ajustar los parámetros de la ecuación de Wiebe.

Modelos cuasi-dimensionales o fenomenológicos

Los modelos cuasi-dimensionales son modelos que presentan un planteamiento cero-dimensional básico, pero incluyen algún aspecto geométrico característico del proceso (como la geometría del chorro) o detalles espaciales adicionales para alguno de los fenómenos involucrados en la combustión (atomización, evaporación, mezcla de combustibles, etc.) [34]. Ellos suelen dividir la cámara de combustión en varias zonas, haciendo necesaria la resolución de las ecuaciones de conservación de masa y energía para cada una de éstas.

Los modelos cuasi-dimensionales permiten calcular la formación/destrucción de emisiones y tienen un bajo tiempo de cálculo computacional frente a los modelos multidimensionales. Como inconveniente presentan la necesidad de ajustar algunos de sus coeficientes con resultados experimentales, debido al gran número de simplificaciones que requieren [34].

Uno de los primeros trabajos bajo esta metodología fue el realizado por Probert [62], quien examinó la evaporación del chorro de combustible usando una función de distribución de gotas; este trabajo fue posteriormente ampliado por Tanaswa [63], quien relacionó explícitamente los procesos de evaporación y combustión por medio de un coeficiente de combustión. Otros de los trabajos pioneros de modelos fenomenológicos son los de Austen y Lyn [64] y Lyn [65] quienes plantearon un modelo que relaciona cuantitativamente la

tasa de inyección de combustible con la tasa de calor liberado; Cook [66,67] Nagao *et al.* [68] y Shipinsky *et al.* [69,70] que describieron el proceso de combustión de manera similar a Austen y Lyn pero dividiendo la tasa de inyección en zonas que se pueden evaporar, autoencender y quemar de forma independiente.

Estos primeros trabajos están basados en la hipótesis de que la evaporación es el fenómeno que controla la combustión, posteriormente aparecieron los trabajos de Whitehouse y Way [71,72], en los cuales se desarrolló un método para el cálculo de la tasa de liberación de calor que utiliza ecuaciones simples basadas en un modelo de una zona y que tiene en cuenta los efectos de la tasa de mezcla entre el aire y el combustible; Whitehouse y Sareen [73] en el que se presentó un modelo de dos zonas basado en el trabajo de Whitehouse y Way; Grigg y Syed [74] en donde se consideraron los efectos, sobre la liberación de calor, de la tasa de incorporación del aire en el chorro de combustible, la tasa de mezclado turbulento de aire y combustible dentro del chorro, y la cinética química de la combustión; y Khan *et al.* [75] en el que se incluyeron los efectos de choque de la pared y swirl. Otros investigadores trabajaron en estrategias basadas en la teoría de chorro estacionario de Abramovich [76], como Adler y Lyn [77] quienes la adaptaron al estudio de chorros transitorios pero sin validarla para condiciones de motor. Posteriormente, Rife y Heywood [78] lograron adaptar el trabajo de Alder y Lyn a las condiciones de motor.

Chiu *et al.* [79] usaron ecuaciones empíricas para describir la penetración del chorro, su ángulo de apertura y su trayectoria, con el fin de describir la naturaleza transitoria de los chorros Diésel. Hiroyasu *et al.* [80] utilizan un enfoque similar al de Chiu y otros para describir el chorro Diésel. Dent *et al.* [81,82] utilizan un tratamiento del chorro similar al de Hiroyasu y otros, que posteriormente es ampliado por el trabajo de Kyriakides *et al.* [83]. Simultáneamente a este último, Tinaut [84] trabajó en un modelo multi-zona en el que la masa inyectada se divide en paquetes en los que se considera la atomización, evaporación y englobamiento del aire. Más adelante Lapuerta [85] y Desantes *et al.* [86] incluyen efectos de interacción del chorro con el vórtice y cálculos de la trayectoria de éste al trabajo de Tinaut.

A partir de los 90 la mayoría de los modelos del

tipo cuasi-dimensional han sido modelos multi-zona basados en el tratamiento mixto del chorro inyectado [2]. Ejemplos de esta aproximación se pueden observar en los trabajos de Rakopoulos y Hountalas [56], Bazari [87], Cui *et al.* [88], Kouremenos *et al.* [89], Ottikkutti *et al.* [90], Shenghua *et al.* [91], Torkzadeh *et al.* [92] y Bi *et al.* [93]. Algunos de los modelos multi-zona desarrollados en los últimos años son los de Rakopoulos *et al.* [32] en 2007, cuyo fin es el de estudiar el desempeño de un motor Diésel de inyección directa (ID) que usa aceite de semilla de algodón y su Diésel derivado como combustible; Rakopoulos *et al.* [94] en 2008, el cual es utilizado para examinar los mecanismos de formación de las emisiones en la combustión al usar mezcla etanol-Diésel; Komninos *et al.* [95] en 2010, el cual se desarrolló con el fin de investigar la emisión de hidrocarburos quemados y la formación de CO en motores HCCI alimentados con etanol puro e iso-octano puro; y Komninos y Kosmadakis [96] en 2011, cuyo objetivo es estimar el flujo de calor por las paredes del cilindro de un motor HCCI.

En los últimos años también se han desarrollado varios modelos de dos zonas, la mayoría de ellos con el fin de predecir el desempeño de motores Diésel alimentados con biocombustibles. Uno de estos es el realizado por Ganapathy *et al.* [97] en el 2009, que permite estudiar el desempeño de un motor Diésel mono-cilíndrico de cuatro tiempos, de inyección directa y enfriado por aire, alimentado con biodiésel de *Jatropha*. El mismo año Ganapathy *et al.* [98] utilizaron el enfoque de optimización de Taguchi en combinación con un modelo de dos zonas para identificar la configuración óptima de parámetros de entrada que maximizan el rendimiento térmico de un motor Diésel que usa biodiésel *Jatropha*. En 2010, Rajendra *et al.* [99] desarrollaron un modelo de dos zonas con el objetivo de medir la efectividad de la combinación de dos métodos para mejorar el desempeño del motor y disminuir las emisiones: el uso de biodiésel de *Jatropha* y el uso de materiales cerámicos para aislar la cámara de combustión (motor LHR). Gao *et al.* [22] simularon la generación de NOx y material particulado en la combustión Diésel convencional, la combustión de alta dilución (HDC) y la combustión limpia de alta eficiencia (HECC) en un motor Mercedes Benz 1.7 L, usando un modelo de dos zonas. Por último, en 2011, Jagadish *et al.* [100], desarrollaron un

modelo que permite estudiar el desempeño de un motor mono-cilíndrico al ser alimentado con varios tipos de biocombustibles. Una descripción más detallada de estos modelos es presentada en la Tabla 1.

En Colombia, en los últimos años, se han desarrollado modelos de acuerdo a la metodología cuasi-dimensional en la Universidad Nacional y la Universidad de Antioquia. En 2010, Ortiz [101] elaboró un modelo cuasi-dimensional con el fin de analizar los efectos que tiene la modificación de la viscosidad del combustible sobre la liberación de energía, y Rodríguez [102] desarrolló un modelo de formación de contaminantes de combustión para la mezcla B5 que permite determinar la incidencia de la estructura y composición del combustible en la generación de material particulado (MP), este último se presentó como una herramienta que permite obtener resultados preliminares sobre el desempeño de la mezcla antes de la implementación en motores de combustión interna. Mientras que en 2011 Villegas [103] utilizó un modelo de diagnóstico cuasi-dimensional para realizar un estudio teórico-experimental acerca de la incidencia de las mezclas Diésel-biodiésel de aceite de palma en la formación de los óxidos de nitrógeno y material particulado.

Modelos recientes para el estudio de la factibilidad del uso de biocombustibles

En la Tabla 1 se presenta una descripción de varios de los principales modelos que han sido desarrollados en los últimos años con el propósito de estudiar la factibilidad del uso de biocombustibles en motores Diésel. En dicha tabla se presentan los objetivos y resultados de cada trabajo, permitiendo así la comparación de sus respectivos alcances.

Como se puede apreciar, los modelos cero-dimensionales se han venido utilizando recientemente para comparar los parámetros de desempeño de motores Diésel alimentados con biocombustibles, con los mismos parámetros cuando dichos motores son alimentados con Diésel convencional, esto sin tener en cuenta las emisiones contaminantes. Por otra parte los modelos cuasi-dimensionales se han utilizado para el mismo fin, pero incluyendo en los análisis las emisiones de contaminantes, esto debido a su mayor poder predictivo a causa del uso de múltiples zonas para los análisis de la cámara de combustión. Finalmente, los modelos multidimensionales se han utilizado en casos en los cuales se necesita comparar características espaciales específicas de la inyección y del flujo de combustible, lo cual no podría realizarse con modelos de otro tipo.

Tabla 1. Comparación de los modelos recientes para el estudio de biocombustibles.

Autores / País / Año	Tipo de Modelo	Estudio Realizado	Resultados
Zheng <i>et al.</i> [25] / China / 2005	Multidimensional	Formación de la mezcla de gases, distribución del NO en la cámara, flujo de combustible en el cilindro e incidencia del ángulo de inyección, temperatura inicial y composición del gas natural en el ángulo de ignición, presión en cámara y emisiones contaminantes.	Retardar en el ángulo de inyección reduce la emisión de NO. Incrementar la cantidad de etano en el gas natural puede adelantar la ignición y por lo tanto aumentar las emisiones de NO. Temperaturas iniciales muy altas o muy bajas no son beneficiosas para la salida de potencia y la emisión de contaminantes.
Ramadhas <i>et al.</i> [1] / India / 2006	Cero-dimensional	Efecto de la variación de la relación aire combustible y la relación de compresión en la eficiencia térmica al freno, la presión pico y la temperatura pico en el cilindro de un motor alimentado con biodiésel de semilla de caucho, Diésel convencional y mezcla de Diésel con 20%vol de biodiésel.	Se presenta un incremento en la temperatura pico, la presión pico y la eficiencia térmica al freno al aumentar la relación de compresión, y un decremento en los mismos parámetros al aumentar la relación aire-combustible, tendencia que fue seguida por todos los combustibles analizados. Se observa la mayor presión pico y eficiencia térmica al freno al utilizarse Diésel convencional, y la mayor temperatura pico al utilizarse biodiésel puro.

Autores / País / Año	Tipo de Modelo	Estudio Realizado	Resultados
Rakopoulos <i>et al.</i> [32], [94] / Grecia / 2007	Cuasi-dimensional	Distribución del dosado relativo, temperatura, concentración de oxido nítrico y hollín en el chorro de combustible de un motor Diésel alimentado con aceite de semilla de algodón, su biodiésel derivado, mezclas etanol-Diésel y Diésel convencional.	Las zonas con dosados altos son más pequeñas en los chorros de mezclas etanol-Diésel, aceite de semilla de algodón y su biodiésel derivado que en los de Diésel convencional, lo cual mejora la combustión y mejora las emisiones.
Agudelo <i>et al.</i> [29] / Colombia / 2009	Multidimensional	Efecto del tipo de combustible, la presión de inyección y la presión del gas ambiente en la penetración de la punta del chorro de combustible, el diámetro medio de Sauter (SMD) y la masa de combustible evaporada.	Las propiedades del fluido afectan significativamente los procesos de atomización y vaporización y en menor medida la penetración del chorro. Independientemente de las presiones de inyección y del gas ambiente, el SMD se incrementa con la viscosidad y la tensión superficial mientras la tasa de evaporación se incrementa con la volatilidad del combustible. Bajas presiones del gas ambiente favorecen el proceso de vaporización y la penetración del chorro. A medida que la presión de inyección se incrementa el SMD disminuye y la tasa de evaporación aumenta.
Ganapathy <i>et al.</i> [97] / India / 2009	Cuasi-dimensional	Incidencia del ángulo de inyección, la relación de compresión y la relación relativa aire/combustible en la eficiencia térmica al freno, la eficiencia mecánica, la eficiencia volumétrica, la temperatura pico y la presión media efectiva al freno, de un motor Diésel alimentado con Diésel convencional y biodiésel de Jatropha.	Para los dos combustibles se observa que: cualquier cambio en el ángulo de inyección, por encima o por debajo del nominal, representa una disminución en la eficiencia térmica al freno y la eficiencia mecánica; retardos en el momento de la inyección implican disminuciones en la temperatura pico; incrementos en la relación de compresión representan incrementos en todos los parámetros estudiados; e incrementos en la relación relativa aire combustible hacen que se disminuya la presión media efectiva al freno y la temperatura pico en el cilindro.
Gogoi y Baruah [51] / India / 2010	Cero-dimensional	Efecto de la velocidad y la relación de compresión en la potencia al freno y la eficiencia al freno de un motor Diésel mono cilíndrico de 4 tiempos alimentado con mezclas Diésel/Biodiésel de aceite de Karanja.	Se observa un desempeño similar al utilizar mezclas de Diésel con el 20%vol y 40%vol de Biodiésel y un desempeño superior al utilizar la mezcla Diésel con 60%vol de Biodiésel.

Autores / País / Año	Tipo de Modelo	Estudio Realizado	Resultados
Rajendra <i>et al.</i> [99] / India / 2010	Cuasi-dimensional	Efectividad del la combinación uso de biodiésel de <i>Jatropha</i> y el uso de materiales cerámicos para aislar la cámara de combustión de un motor Diésel (motor LHR). Para esto se comparó el desempeño de las cuatro combinaciones posibles: motor LHR con Diésel, motor LHR con biodiesel, motor convencional con Diésel y motor convencional con biodiésel,	Se presenta una temperatura en cámara mucho mayor cuando se utiliza biodiésel en un motor LHR, que cuando se utilizan las demás combinaciones. El calor liberado en la combustión y el trabajo desarrollado son mayores al utilizarse combustible Diésel en el motor LHR. Las pérdidas de calor son mucho menores en en un motor LHR que en un motor convencional; mientras que las emisiones de NO son mayores en un motor LHR que en un motor convencional, lo cual se cumple para los dos combustibles analizados.
Shi y Reitz [27] / USA / 2010	Multidimensional	Parámetros de inyección óptimos de un motor de encendido por compresión alimentado con Diésel, gasolina y combustible E10, a condiciones de mediana y alta carga.	Combustibles tipo gasolina presentan mayor potencial para la combustión limpia que el combustible Diésel convencional. En condiciones de carga media, la efectividad del motor con gasolina se ve afectada por el ángulo de la segunda inyección y en el motor alimentado con Diésel se ve afectada por la cantidad inyectada en la primera inyección.
Bueno <i>et al.</i> [52] / Brasil / 2010	Cero-dimensional	Impacto ocasionado por el uso de biodiésel de éster etílico de soya en un motor Diésel turbocargado por medio de un análisis energético y exergético. Para lo cual se comparó el desempeño del motor alimentado con Diésel y mezclas de Diésel con 5, 10, 15 y 20 y 30%vol de biodiésel.	Se observa un mayor incremento en la eficiencia térmica al freno al utilizar mezcla de Diésel con 20%vol de Biodiésel y un menor consumo específico de combustible al utilizar mezcla con 10%vol de Biodiésel.
Ortiz [101] / Colombia / 2010	Cuasi-dimensional	Efecto de la modificación de la viscosidad del combustible en la liberación de energía e influencia de las propiedades físico-químicas en la atomización y evaporación del combustible.	El fenómeno de rompimiento, donde se manifiesta el efecto de la viscosidad de líquido, del combustible incrementa el área superficial y disminuye el diámetro medio de Sauter (SMD) de las gotas en el chorro. No fue evidente la relación entre mayor área, menor SMD y mayor velocidad de evaporación de las gotas.
Colaço <i>et al.</i> [53] / Brasil / 2010	Cero-dimensional	Perfil de temperatura del pistón de un motor Diésel alimentado con Diésel, biodiésel y sus mezclas.	El uso de diferentes mezclas Diésel-biodiésel no cambia el perfil de temperaturas del pistón; sin embargo, debido al menor poder calorífico de biodiésel, este último hace que la operación del motor sea más inestable.

Autores / País / Año	Tipo de Modelo	Estudio Realizado	Resultados
Jagadish <i>et al.</i> [100] / India / 2011	Cuasi-dimensional	Efectos del uso de mezclas Diésel-biodiésel y Diésel-etanol en el desempeño y emisiones de un motor monocilíndrico a varias condiciones de carga y porcentajes de recirculación de gases de escape (EGR).	El desempeño del motor es mejorado al utilizar Diésel mezclado con biocombustibles en bajas cantidades. Las emisiones de NOx se reducen significativamente, para todos los combustibles, al utilizar el sistema EGR. Las emisiones de hollín se ven reducidas al utilizar los biocombustibles considerados.
Patil y Akarte [55] / India / 2012	Cero-dimensional	Desempeño de un motor Diésel alimentado con mezclas Diésel-metil ester de aceite de palma (B0, B20, B60 y B100), por medio de un análisis del efecto de la variación de la relación de compresión en la presión pico, la tasa de calor liberado y la eficiencia térmica al freno, al usar cada uno de los combustibles	Al incrementar la relación de compresión se presenta un incremento en la presión pico y la eficiencia térmica al freno para todas las mezclas analizadas. Para todos los valores de relación de compresión, un incremento en la porción de Biodiésel mezclado se traduce en un decremento de la presión pico y un incremento de la eficiencia térmica al freno.

Conclusión

En conclusión, los modelos de combustión Diésel se pueden clasificar en tres grandes grupos: modelos multidimensionales, modelos cuasi-dimensionales y modelos cero-dimensionales. Los primeros son los más adecuados cuando se busca tener una descripción detallada del proceso de combustión Diésel, mientras los segundos y los terceros son idóneos cuando se desea obtener una descripción global de éste.

Los modelos multidimensionales han venido evolucionando desde los años 70 hasta llegar a los actuales códigos CFD comerciales, ellos tienen el potencial para describir en detalle los fenómenos ocurridos durante la combustión y tienen en cuenta la distribución espacial del proceso, pero presentan la desventaja de ser sensibles a los sub-modelos utilizados, algunos de los cuales no están completamente definidos, además de consumir mayor tiempo en la simulación del proceso, lo cual los hace los menos eficientes desde el punto de vista computacional.

Los modelos cero-dimensionales son los más sencillos, y por ende los más eficientes a la hora de calcular los parámetros de desempeño del motor, sin embargo no describen en detalle los subprocesos que ocurren durante el proceso global de combustión Diésel y son incapaces de calcular las emisiones de contaminantes en el motor. Algunos de ellos se basan en la descripción

matemática de la forma de la ley de liberación de calor sin relación directa con la física que controla el proceso, mientras que otros describen y discretizan el problema teniendo en cuenta la físico-química de los fenómenos ocurridos durante la combustión de forma simplificada. En los últimos años se han desarrollado varios modelos bajo este último enfoque con el fin de evaluar el desempeño de motores Diésel alimentados por biocombustibles de una forma relativamente sencilla.

Por su parte los modelos cuasi-dimensionales, que se presentan como un punto intermedio entre los dos tipos anteriores, permiten calcular los parámetros de desempeño del motor de un modo mucho más sencillo que con un modelo multidimensional y, a diferencia de los modelos cero-dimensionales, tiene el potencial para calcular las emisiones del motor. Sin embargo, presentan como inconveniente la necesidad de ajustar algunos de sus coeficientes con resultados experimentales en cada situación, debido al gran número de simplificaciones que requieren. Últimamente la mayoría de modelos del tipo cuasi-dimensional han sido modelos multizona, aunque también se han presentado modelos de dos zonas con el objetivo de predecir el desempeño y emisiones de motores Diésel alimentados con biocombustibles.

En Colombia la mayor parte de los modelos de la combustión han sido modelos cero-dimensionales, muchos de ellos desarrollados en la universidad

de Antioquia, aunque también se han elaborados trabajos desde el enfoque cuasi-dimensional y multidimensional.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a las Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander por la financiación del proyecto "Producción de energía a partir de residuos provenientes de la transformación de la biomasa" (Proyecto No. 5451), del cual hace parte este trabajo.

Referencias

- [1] Ramadhas AS, Jayaraj S, Muraleedharan C. Theoretical modeling and experimental studies on biodiesel-fueled engine. *Renew Energ.* 2006;31(11):1813–26.
- [2] Fenollosa C. Descripción del proceso de combustión Diésel. En: *Modelado fenomenológico del proceso de combustión por difusión Diésel.* España: Reverte; 2005. p. 7-29.
- [3] Colaço MJ, Teixeira CV, Dutra LM. Thermodynamic simulation and optimization of Diesel engines operating with Diésel and biodiesel blends using experimental data. *inverse Probl Sci Eng.* 2010;18(6):787–812.
- [4] Heywood J. *Modeling Real Engine Flow and Combustion Processes.* En: *Internal Combustion Engine Fundamentals.* EE.UU: McGraw-Hill; 1988. p. 748-816.
- [5] Ganesan V. Introduction. En: *Computer Simulation Of Compression-Ignition Engine Processes.* India: Universities Press; 2000. p. 1-2.
- [6] Watson N. *Turbocharging the Internal Combustion Engine.* John Wiley & Sons Inc; 1982.
- [7] Bracco FV. *Introducing a New Generation of More Detailed and Informative Combustion Models.* Warrendale, PA: SAE International; 1975 Feb. Report No. 751187.
- [8] Escalante H, Orduz J, Zapata H, Cardona M, Duarte M. *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia.* Colombia: Ministerio de Minas y Energía; 2011.
- [9] Butler TD, Cloutman LD, Dukowicz J k., Ramshaw JD. *CONCHAS: An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computer Code for Multi-component Chemically Reactive Fluid Flow at All Speeds.* Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory; 1979. Report No. LA-8929-MS.
- [10] Gosman AD, Johns RJR. *Computer Analysis of Fuel-Air Mixing in Direct-Injection Engines.* Warrendale, PA: SAE International; 1980 Feb. Report No. 800091.
- [11] Syed SA, Bracco FV. *Further Comparisons of Computed and Measured Divided-Chamber Engine Combustion.* Warrendale, PA: SAE International; 1979 Feb. Report No. 790247.
- [12] Bracco FV. *Applications of Steady-State Spray Equations to Combustion Modeling.* *AIAA J.* 1974;12(11):1534–40.
- [13] Harlow FH, Amsden AA. Numerical calculation of multiphase fluid flow. *J Comput Phys.* 1975;17(1):19–52.
- [14] Crowe CT. A computational model for the gas-droplet flow field in the vicinity of an atomizer. En: *11th JANAF Symposium;* 1974 Oct 21-22; Northridge, Estados Unidos de América. Northridge: Combustion Institute; 1974. p. 18.
- [15] Crowe C, Stock D, Sharma M. The particle-source-in cell/PSI-CELL/model for gas-droplet flows. *ASME J Fluids Eng.* 1977;99:325–32.
- [16] Dukowicz JK. A particle-fluid numerical model for liquid sprays. *J Comput Phys.* 1980;35(2): 229–53.
- [17] Gosman AD, Kralj C, Marooney CJ, Theodossopouls P. The development of the SPEED code for Diesel combustion simulation. *Florenzia Italia: ATA-DMTI;* 1992.
- [18] Gosman AD, Kralj C, Marooney CJ, Theodossopouls P. Development strategies for Diesel combustion simulation using the SPEED code. *Institution of Mechanical Engineers;* 1992. Report No. Paper C448/035.
- [19] *Fluent. FLUENT AND RAMPANT: User's Guide.* Fluent Incorporated; 1995.
- [20] Amsden AA. *KIVA-II: a computer program for chemically reactive flows with sprays.* Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; 1985.
- [21] Amsden AA. *KIVA-III: A KIVA Program with Block-structured Mesh for Complex Geometries.* Los Alamos National Laboratory; 1993.
- [22] Gao Z, Wagner RM, Sluder CS, Daw CS, Green Jr. JB. *Using a phenomenological*

- computer model to investigate advanced combustion trajectories in a CIDI engine. *Fuel*. 2011;90(5):1907–18.
- [23] Peng Kärholm F, Tao F, Nordin N. Three-Dimensional Simulation of Diesel Spray Ignition and Flame Lift-Off Using OpenFOAM and KIVA-3V CFD Codes. Warrendale, PA: SAE International; 2008 Apr. Report No. 2008-01-0961.
- [24] Gong Y, Kaario O, Tilli A, Larimi M, Tanner FX. A Computational Investigation of Hydrotreated Vegetable Oil Sprays Using RANS and a Modified Version of the RNG $k - \epsilon$ Model in OpenFOAM. Warrendale, PA: SAE International; 2010 Apr. Report No. 2010-01-0739.
- [25] Zheng QP, Zhang HM, Zhang DF. A computational study of combustion in compression ignition natural gas engine with separated chamber. *Fuel*. 2005;84(12–13):1515–23.
- [26] Jayashankara B, Ganesan V. Effect of fuel injection timing and intake pressure on the performance of a DI Diesel engine – A parametric study using CFD. *Energ Convers Manage*. 2010;51(10):1835–48.
- [27] Shi Y, Reitz RD. Optimization of a heavy-duty compression-ignition engine fueled with Diesel and gasoline-like fuels. *Fuel*. 2010;89(11):3416–30.
- [28] Gutiérrez E. Modelado numérico de la atomización y evaporación de un chorro Diesel mediante análisis CFD (Tesis de Maestría) Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia; 2008.
- [29] Agudelo J, Agudelo A, Benjumea P. Estudio de chorros Diésel usando mecánica de fluidos computacional. *Rev fac ing univ Antioquia*. 2009;(49):61–9.
- [30] Delgado A. Simulación numérica de los procesos al interior del cilindro en un motor Diésel mediante análisis CFD (Tesis de Maestría) Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia; 2010.
- [31] Arrègle J, López JJ, García JM, Fenollosa C. Development of a zero-dimensional Diesel combustion model. Part 1: Analysis of the quasi-steady diffusion combustion phase. *Appl Therm Eng*. 2003;23(11):1301–17.
- [32] Rakopoulos CD, Antonopoulos KA, Rakopoulos DC. Development and application of multi-zone model for combustion and pollutants formation in direct injection Diesel engine running with vegetable oil or its bio-Diesel. *Energ Convers Manage*. 2007;48(7):1881–901.
- [33] Chmela FG, Pirker GH, Wimmer A. Zero-dimensional ROHR simulation for DI Diesel engines – A generic approach. *Energ Convers Manage*. 2007;48(11):2942–50.
- [34] Galindo J, Hernandez J. Modelado de Motores. En: Motores de combustión interna alternativos. Payri F, Desantes JM. España: Reverte; 2011. p. 746-796.
- [35] Vibe II. Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. VEB Verlag Technik; 1970.
- [36] Ghojel JI. Review of the development and applications of the Wiebe function: A tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research. *Int J Engine Res*. 2010;11(4):297–312.
- [37] Dyechenko NK, Magidovich LY, Pugachiov BP. Approximation of heat release characteristics in the cylinders of Diesel engines. *Energomashinostroyeniye*. 1969;310:73.
- [38] Dyechenko NK, Magidovich LY, Pugachiov BP. Determination of main parameters of heat release characteristics during combustion in Diesel engines. *Energomashinostroyeniye*. 1970;316:54.
- [39] Ghojel JI. Investigation of cycle processes of direct injection Diésel engines with cylindrical piston bowl (Tesis Doctoral). Moscú, Rusia: Moscow Automobile and Road Institute (MADI); 1974.
- [40] Ghojel JI. A Study of Combustion Chamber Arrangements and Heat Release in D.I. Diesel Engines. Warrendale, PA: SAE International; 1982 Feb. Report No. 821034.
- [41] Watson N, Pilley AD, Marzouk M. A Combustion Correlation for Diésel Engine Simulation. Warrendale, PA: SAE International; 1980 Feb. Report No. 800029.
- [42] Miyamoto N, Chikahisa T, Murayama T, Sawyer R. Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wiebe's Functions. Warrendale, PA: SAE International; 1985 Feb. Report No. 850107.
- [43] Witt H, Hassenforder M, Gissinger GL. Modelling and Identification of a Diesel Combustion Process with the Downhill Gradient Search Method. Warrendale, PA: SAE International; 1995 Feb. Report No.

- 950854.
- [44] Bilcan A, Tazerout M, Le Corre O, Ramesh A. Ignition Delay in Dual Fuel Engines: An Extended Correlation for Gaseous Fuels. *ASME Conf Proc.* 2001;2001(16699a):49–55.
- [45] Canova M, Garcin R, Midlam-Mohler S, Guezennec Y, Rizzoni G. A control-oriented model of combustion process in a HCCI Diesel engine. En: *Proceedings of the American Control Conference*; 2005 jun 8-10. Portland, Estados Unidos; Portland: IEEE; 2005. p. 4446-51.
- [46] Galindo J, Luján JM, Serrano JR, Hernández L. Combustion simulation of turbocharger HSDI Diesel engines during transient operation using neural networks. *Appl Therm Eng.* 2005;25(5–6):877–98.
- [47] Way RJB. Methods for Determination of Composition and Thermodynamic Properties of Combustion Products for Internal Combustion Engine Calculations. *P I Mech Eng.* 1976;190(1):687–97.
- [48] Hardenberg HO, Hase FW. An Empirical Formula for Computing the Pressure Rise Delay of a Fuel from Its Cetane Number and from the Relevant Parameters of Direct-Injection Diesel Engines. Warrendale, PA: SAE International; 1979 Feb. Report No. 790493.
- [49] Gardner TP, Henein NA. Diesel Starting: A Mathematical Model. Warrendale, PA: SAE International; 1988 Feb. Report No. 880426.
- [50] Harris HD, Pearce F. A universal mathematical model of Diesel engine performance. *J Agr Eng Res.* 1990;47:165–76.
- [51] Gogoi TK, Baruah DC. A cycle simulation model for predicting the performance of a Diésel engine fuelled by Diesel and bioDiésel blends. *Energy.* 2010;35(3):1317–23.
- [52] Bueno AV, Velásquez JA, Milanez LF. Heat release and engine performance effects of soybean oil ethyl ester blending into Diesel fuel. *Energy.* 2011;36(6):3907–16.
- [53] Colaço MJ, Teixeira CV, Dutra LM. Thermal analysis of a Diesel engine operating with Diésel–biodiesel blends. *Fuel.* 2010;89(12):3742–52.
- [54] Payri F, Olmeda P, Martín J, García A. A complete 0D thermodynamic predictive model for direct injection Diesel engines. *Appl Energ.* 2011;88(12):4632–41.
- [55] Patil S, Akarte. Investigation on Effect of Variation in Compression Ratio on Performance and Combustion Characteristics of C.I Engine Fuelled With Palm Oil Methyl Ester (POME) and its Blends by Simulation. *GJRE.* 2012;12(2):34–41.
- [56] Rakopoulos CD, Hountalas DT. Development and Validation of a 3-D Multi-Zone Combustion Model for the Prediction of DI Diesel Engines Performance and Pollutants Emissions. Warrendale, PA: SAE International; 1998 Feb. Report No. 981021.
- [57] Agudelo J, Corredor L, Hernandez J. Simulación del Proceso de Combustión en Motores de Encendido por Compresión. *Energética.* 2000;23:103–11.
- [58] Agudelo A, Agudelo J, Benjumea P. Exergy diagnosis of the combustion process in a Diesel engine. *Rev fac ing univ Antioquia.* 2008;(45):41–53.
- [59] Barbosa J, Salcedo J. Herramienta educativa en la web basada en la simulación de los procesos termofluidodinámicos de motores de combustión interna, SIMTA 1.0. (Tesis de Pregrado) Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2007.
- [60] Rodríguez E. Software para la simulación de los ciclos termodinámicos de los motores de combustión interna de cuatro tiempos «SICICLOTTER 1.0» (Tesis de Pregrado) Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2003.
- [61] Chacón JL. Identificación de un motor Diésel. En: IX Congreso Latinoamericano de Control Automático; 2000 nov 1-3. Cali, Colombia; Cali: Universidad Autónoma de Occidente; 2000. p. 1-5
- [62] Probert RP. The influence of spray particle size and distribution in the combustion of oil droplets. *Philos Mag.* 1946;37(265):94–105.
- [63] Tanasawa PH. On the combustion rate of a group of particles. *Tech Report Tohoku Univ.* 1953;18:61–74.
- [64] Austen AEW, Lyn W-T. Relation between Fuel Injection and Heat Release in a Direct-Injection Engine and the Nature of the Combustion Processes. *P I Mech Eng.* 1960;14(1):47–62.
- [65] Lyn WT. Study of burning rate and nature of combustion in Diesel engines. *Symp (Int) Combust.* 1963;9(1):1069–82.
- [66] Cook HA. Appraisal of Effects of Operating Conditions and Engine Design on Combustion in Reciprocating Engines by Engine Cycle Calculations. Warrendale, PA:

- SAE International; 1963 Jan. Report No. 630083.
- [67] Cook HA. Diesel Engine Cycle Analysis of Relationships of Fuel Injection to Fuel Compression Ignition Characteristics and Best Fuel Utilization. Society of Automotive Engineers; 1965.
- [68] Nagao F, Ikegami M, Oshima K. An Analysis of Combustion Knock in a Diesel Engine. Bull JSME. 1967;10(39):532-42.
- [69] Shipinski J, Myers PS, Uyehara OA. A Spray-Droplet Model for Diesel Combustion. P I Mech Eng. 1969;184(10):28-35.
- [70] Shipinski J, Uyehara OA, Myers PS. Experimental correlation between rate of injection and rate of heat release in a Diesel engine. 1968. Report No. 68-DGP-11.
- [71] Whitehouse ND, Way R. Rate of Heat Release in Diesel Engines and Its Correlation with Fuel Injection Data. P I Mech Eng. 1969;184(10):17-27.
- [72] Whitehouse ND, Way RJB. A Simple Method for the Calculation of Heat Release Rates in Diesel Engines Based on the Fuel Injection Rate. Warrendale, PA: SAE International; 1971 Feb. Report No. 710134.
- [73] Whitehouse ND, Sareen BK. Prediction of Heat Release in a Quiescent Chamber Diesel Engine Allowing for Fuel/air Mixing. Society of Automotive Engineers; 1974.
- [74] Grigg HC, Syed MH. The Problem of Predicting Rate of Heat Release in Diesel Engines. P I Mech Eng. 1969;184(10):192-202.
- [75] Khan IM, Greeves G, Probert DM. Prediction of soot and nitric oxide concentrations in Diesel engine exhaust. Institution of Mechanical Engineers; 1971 p. 205 - 217.
- [76] Abramovich GN. The Theory of Turbulent Jets. Schindel L, editor. The MIT Press; 2003.
- [77] Adler D, Lyn W-T. The Evaporation and Mixing of a Liquid Fuel Spray in a Diesel Air Swirl. P I Mech Eng. 1969;184(10):171-80.
- [78] Rife J, Heywood JB. Photographic and performance studies of Diesel combustion with a rapid compression machine. 1974.
- [79] Chiu WS, Shahed SM, Lyn WT. A Transient Spray Mixing Model for Diesel Combustion. Warrendale, PA: SAE International; 1976 Feb. Report No. 760128.
- [80] Hiroyasu H, Kadota T, Arai M. Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions: Part 1 Combustion Modeling. Bull JSME. 1983;26(214):569-75.
- [81] Dent JC, Mehta PS. Phenomenological combustion model for a quiescent chamber Diesel engine. 1981.
- [82] Dent JC, Mehta PS, Swan J. A predictive model for automotive DI Diesel engine performance and smoke emissions. Institution of Mechanical Engineers; 1982 p. 237 -245. Report No. Paper C126/82.
- [83] Kyriakides SC, Dent JC, Mehta PS. Phenomenological Diesel combustion model including smoke and NO emission. Estados Unidos de América: Society of Automotive Engineers; 1986.
- [84] Tinaut FV. Contribución al estudio del proceso de combustión en motores de encendido por compresión de inyección directa (Tesis Doctoral) Valencia, España: E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia; 1986.
- [85] Lapuerta M. Estudio fenomenológico de la combustión en motores Diésel rápidos de inyección directa (Tesis Doctoral) Valencia, España: E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia; 1988.
- [86] Desantes JM, Lapuerta M, Tinaut FV. Combustion dans les moteurs Diesel rapides à injection directe. Modèle basé sur l'interaction entre le jet et le mouvement de l'air dans le cylindre. Entropie. 1989;148:51-61.
- [87] Bazari Z. A DI Diesel Combustion and Emission Predictive Capability for Use in Cycle Simulation. Warrendale, PA: SAE International; 1992 Feb. Report No.: 920462.
- [88] Cui Y, Deng K, Wu J. A direct injection Diesel combustion model for use in transient condition analysis. P I Mech Eng D-J Aut. 2001;215(9):995-1004.
- [89] Kouremenos DA, Rakopoulos CD, Hountalas DT. Multi-Zone Combustion Modelling for the Prediction of Pollutants Emissions and Performance of DI Diesel Engines. Warrendale, PA: SAE International; 1997 Feb. Report No. 970635.
- [90] Ottikkutti P, Van Gerpen J, Cui KR. Multizone Modeling of a Fumigated Diesel Engine. Warrendale, PA: SAE International; 1991 Feb. Report No. 910076.
- [91] Shenghua L, Hwang JW, Park JK, Kim MH, Chae JO. Multizone Model for DI Diesel Engine Combustion and Emissions.

- Warrendale, PA: SAE International; 1999 Aug. Report No. 1999-01-2926.
- [92] Torkzadeh DD, Långst W, Kiencke U. Combustion and Exhaust Gas Modeling of a Common Rail Diesel Engine - an Approach. Warrendale, PA: SAE International; 2001 Mar. Report No. 2001-01-1243.
- [93] Bi X, Yang M, Han S, Ma Z. A Multi-Zone Model for Diesel Spray Combustion . Warrendale, PA: SAE International; 1999 Mar. Report No. 1999-01-0916.
- [94] Rakopoulos CD, Antonopoulos KA, Rakopoulos DC, Hountalas DT. Multi-zone modeling of combustion and emissions formation in DI Diesel engine operating on ethanol–Diesel fuel blends. *Energ Convers Manage*. 2008;49(4):625–43.
- [95] Komninos NP, Rakopoulos CD. Numerical Investigation into the Formation of CO and Oxygenated and Nonoxygenated Hydrocarbon Emissions from Isooctane- and Ethanol-Fueled HCCI Engines. *Energ Fuel*. 2010;24(3):1655–67.
- [96] Komninos NP, Kosmadakis GM. Heat transfer in HCCI multi-zone modeling: Validation of a new wall heat flux correlation under motoring conditions. *Appl Energ*. 2011;88(5):1635–48.
- [97] Ganapathy T, Gakkhar P, Murugesan K. An analytical and experimental study of performance on jatropha biodiesel engine. *Therm Sci*. 2009;13(3):69–82.
- [98] Ganapathy T, Murugesan K, Gakkhar RP. Performance optimization of Jatropha biodiesel engine model using Taguchi approach. *Appl Energ*. 2009;86(11):2476–86.
- [99] Rajendra Prasath B, Tamilporai P, Shabir MF. Analysis of combustion, performance and emission characteristics of low heat rejection engine using biodiesel. *Int J Therm Sci*. 2010;49(12):2483–90.
- [100] Jagadish D, Kurmar R, K. M. Zero dimensional simulation of Combustion Process of a DI Diesel engine fuelled with Biofuels. *WASET*. 2011;80:819–25.
- [101] Ortiz Valenzuela F. Modelado del efecto de la viscosidad en la combustión de la mezcla B20 de biodiésel de palma africana tenera en motores de combustión interna encendidos por compresión / Modeling the effect of viscosity on the combustion of biodiesel B20 blend of African palm in ICE-CI (Tesis de Maestría) Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2010.
- [102] Rodríguez Rodríguez AM. Modelación de la generación de material particulado en función de la composición del combustible/ Modeling of particular matter generation in function to the fuel composition (Tesis de Maestría) Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2010.
- [103] Villegas A. Estudio teórico-experimental de las emisiones de NOx y material particulado en motores Diésel operando con biodiesel (Tesis de Maestría) Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia; 2011.