



**REVISIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
EN MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA EN COLOMBIA**

**REVIEW OF RESEARCH IN INTERNAL
COMBUSTION ENGINES IN
COLOMBIA**

**REVISÃO DE PESQUISA EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA
NA COLÔMBIA**

Edison Henao Castañeda

Magíster en sistemas automáticos de producción,
Ingeniería Mecánica, Manufactura y Diseño de
Máquinas, Universidad Tecnológica de Pereira
edisonhenao@utp.edu.co ,
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9722-1448>

Carlos Romero Piedrahita

PhD. Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte,
Universidad Tecnológica de Pereira
cromero@utp.edu.co

Jorge Arango Gómez

Ingenierías, Ingeniería Mecánica y Mecatrónica,
Universidad Nacional de Colombia
jearangogo@unal.edu.co

Fechas de recepción: 23 de julio 2018

Fecha aprobación: 04 de octubre 2018

Resumen

En esta revisión se presentan resultados de la exploración de las actividades y temas de investigación relevantes desarrollados en motores de combustión interna por universidades colombianas. El objetivo ha sido determinar qué se ha venido investigando, qué fundamentaciones teóricas, constructivas, tecnológicas, de operación y de manufactura se han asumido por parte de los grupos de investigación e investigadores y, a partir de allí, proponer líneas de investigación que complementen y aporten. Se encuentra que Colombia tiene capacidad científica competitiva en: caracterización de combustibles alternativos, diagnóstico y predicción de la combustión en motores de encendido provocado, modelado y predicción de desempeño de motores alimentados con mezclas de etanol-gasolina, caracterización de emisiones, modelado y experimentación en modos de encendido por compresión de carga homogénea, diseño y construcción de equipos para monitoreo y diagnóstico con técnicas no intrusivas. En general, las investigaciones han sido impulsadas tanto por demandas ambientales del sistema de transporte como por la búsqueda de fuentes combustibles alternativas.

Palabras clave— Estado del arte, fundamentaciones, líneas de investigación, motores de combustión.

Summary

In this review we present the results of the exploration of the relevant research activities and topics developed in internal combustion engines by Colombian universities. The objective has been to determine what has been investigated, what theoretical, constructive, technological, operational and manufacturing foundations have been assumed by the research groups and researchers and, from there, to propose lines of research that complement and contribute. It was found that Colombia has competitive scientific capacity in: characterization of alternative fuels, diagnosis and prediction of combustion in ignition engines, modeling and prediction of performance of engines powered by ethanol-gasoline blends, characterization of emissions, modeling and experimentation in modes of ignition by compression of homogeneous load, design and construction of equipment for monitoring and diagnosis with non-intrusive techniques. In general, research has been driven both by environmental demands of the transport system and by the search for alternative fuel sources.

Key Words: State Of the Art, Foundations, Lines of Research, Combustion Engines.

Resumo

Nesta revisão, apresentamos os resultados da exploração das atividades de pesquisa relevantes e tópicos desenvolvidos em motores de combustão interna pelas universidades colombianas. O objetivo foi determinar o que foi investigado, quais fundamentos teóricos, construtivos, tecnológicos, operacionais e de produção foram assumidos pelos grupos de pesquisa e pesquisadores e, a partir daí, propor linhas de pesquisa que complementem e possam contribuir. É que a



Colômbia tem capacidade científica competitiva na caracterização de combustíveis alternativos, diagnóstico e previsão de ignição do motor de ignição, modelagem e previsão de desempenho motores alimentados com misturas de etanol-gasolina, caracterização das emissões, de modelagem e experimentação em modos de ignição por compressão de carga homogênea, desenho e construção de equipamentos para monitoramento e diagnóstico com técnicas não intrusivas. Em geral, a pesquisa tem sido impulsionada tanto pelas demandas ambientais do sistema de transporte quanto pela busca por fontes alternativas de combustível.

Palavras-chave: Estado da arte, fundações, linhas de pesquisa, motores de combustão.

I. INTRODUCCIÓN

Los programas de Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, proyectando sus actividades de docencia e investigación en Diseño, Manufactura y Térmicas y vista la importancia para el país del sector automotor, ha propuesto un programa de Ingeniería de Manufactura y una línea de investigación en energías alternativas. Del mismo modo, viendo como en el país es recomendada la operación de motores con combustibles alternativos (etanol, gas natural, biodiésel, etc.), pero no son promovidas acciones constructivas y tecnológicas tendientes a la optimización del desempeño (rendimiento y potencia de los motores) con estos combustibles, la UTP ha incursionado en la exploración de la actualidad y relevancia para el país de temas relacionados con la investigación en diseño y manufactura de partes para motores y en diseño y manufactura de sistemas de variación de la relación de compresión en motores de combustión interna (MCI).

Una revisión de los trabajos realizados en MCI en el país es necesaria para la definición y estructuración de líneas de investigación. El trabajo en líneas permite conocer, referenciar y guardar la trayectoria, tradición investigativa

y el saber en los fenómenos, las actividades experimentales, los equipos, lo mismo que el inventario de técnicas asimiladas y desarrolladas en la práctica investigativa. Aunque pueden proponerse autónomamente temas y líneas de investigación en MCI, es razonable averiguar cuál es el estado del arte de las investigaciones relacionadas en Colombia, para justificar el abordaje de temas de investigación complementarios a los existentes o nuevos para el país, de manera que se considere la generación de construcciones originales teóricas, numéricas y experimentales en nuestro medio.

Explorando la página de Colciencias, hasta el mes de diciembre de 2017, son muchos los grupos de investigación relacionados con la energía o los combustibles, que formulan entre sus objetivos la investigación en MCI. La mayoría de estos grupos parten del MCI como una máquina ya diseñada y disponible, objeto de caracterización en su desempeño, sin abordar el diseño directo y la manufactura de los motores, más allá de los trabajos relacionados con modelado CAE estructural, fluido-dinámico o cinético-químico.

De los grupos encontrados, los que más se destacan por los trabajos relacionados en las

hojas GrupLac y CvLac de los investigadores, son los de las universidades de Antioquia (UniAntioquia), Nacional (Unal), Universidad Industrial de Santander (UIS), Andes (UniAndes), del Norte (UniNorte), Bolivariana (UPB) y Tecnológica de Pereira (UTP).

En los siguientes apartes de este trabajo es presentada la metodología seguida para realizar la exploración del estado del arte de las investigaciones en MCI en Colombia. Seguidamente es presentado el contexto de la investigación relacionada con estas máquinas, partiendo de una condensada visión de los autores sobre el estado de desarrollo de los motores y los tipos de investigaciones realizadas en el campo en general en el mundo. Finalmente, son presentadas las conclusiones y consideraciones que responden a los objetivos perseguidos con esta revisión.

II. METODOLOGÍA

Metodológicamente, la exploración realizada es de tipo documental, complementada con visiones de campo de los laboratorios de algunas de las universidades, y conversaciones personales. Se ha levantado un estado del arte, a partir del conocimiento en el tema de los autores, siguiendo las páginas de Colciencias, leyendo las páginas de los grupos de investigación relacionados (GrupLaC) y las hojas de vida (CvLaC) de los investigadores o coordinadores de las líneas de investigación, siguiendo los trabajos de grado dirigidos, los títulos de las publicaciones en revistas, los proyectos realizados y la mirada a algunas de las publicaciones representativas encontradas en la red.

Las preguntas que dirigen la investigación relacionada son: ¿Por qué es importante investigar

en MCI?, ¿Se tienen líneas de investigación o proyectos en las universidades del país dirigidas al estudio de la manufactura de los MCI?, ¿Existen trabajos de investigación en motores que se relacionen con la variación de la relación de compresión en motores?, ¿Cuál ha sido el aporte de las universidades del país a la investigación en MCI?, ¿En qué temas, fenómenos o actividades relacionadas con los MCI han centrado las universidades sus trabajos de investigación?, ¿Qué hace que esos temas sean los investigados? y por último, ¿Hacia dónde se dirige en las universidades la investigación en MCI?. De esta manera, la intención que guía la presente exploración del estado del arte consiste en determinar si tiene efecto diferenciador y complementario para la investigación en motores en el país, la investigación en fabricación de partes y sobre alternativas constructivas de variación de la relación de compresión en los MCI recíprocos.

El objetivo general de la investigación está relacionado con las preguntas antes mencionadas: fundamentar la pertinencia de una investigación en diseño, modelado y fabricación de partes para MCI alternativos, empleando los fundamentos teóricos de mecanismos y procesos de manufactura y con consideración de las necesidades de variación de la relación de compresión para mejorar en los motores la operación con combustibles múltiples.

La investigación bibliográfica es centrada en los MCI, pero tiene en cuenta lo investigado en los marcos teórico, constructivo, tecnológico, numérico, operacional y de manufactura. Por teórico es entendido lo relacionado con la fenomenología y los modelos de los procesos; por constructivo lo relacionado con el diseño y el control de los mecanismos y los sistemas; por tecnológicos, en el contexto de

este trabajo, los procesos de manufactura y los materiales empleados para la manufactura de las partes de los mecanismos y los sistemas; por numérico, la realización en código de los modelos físicos que describen los fenómenos, el comportamiento o la operación de los mecanismos y los sistemas para su creación y evaluación virtual; por operacional, los conceptos relacionados con la utilización, el servicio, el ajuste, las adaptaciones, modificaciones y reparación de los mecanismos y los sistemas; por manufactura, la fabricación de partes, mecanismos y sistemas.

III. LA INVESTIGACIÓN EN MCI EN COLOMBIA

En esta sección son presentadas globalmente las investigaciones relacionadas con los MCI en el país, son relacionados los grupos de investigación e investigadores de la UniNorte de Barranquilla, de la Unal de Colombia, de la Uniandes, de la UIS, la UniAntioquia y la UTP, por el volumen de sus trabajos publicados, sin desconocer que existen trabajos experimentales y exploratorios en otras instituciones, pero que no presentan una continuidad de investigación en los temas de MCI.

La finalidad de esta exploración sobre MCI es caracterizar los proyectos, las líneas de investigación, las tendencias temáticas, los problemas técnicos, científicos, tecnológicos, numéricos, energéticos y ambientales que son abordados por parte de los investigadores en Colombia. Para ello se accedió a la plataforma Scienti de Colciencias (Gruplac) y se hizo un recorrido por los trabajos realizados en las áreas relacionadas con los MCI y los combustibles.

UniNorte (Grupo UREMA)

Encabezado por el profesor Lesme Corredor, tiene entre sus líneas de investigación el estudio de combustibles alternativos: obtención y caracterización de biomasa y biocombustibles; caracterización y utilización energética de gases obtenidos por gasificación de cascarilla de arroz y otros subproductos vegetales, así como del biogás obtenido en granjas de ganado; caracterización y utilización energética de aceites (derivados de jatrofa, palma, higuera); de alcoholes (derivados de yuca y caña de azúcar) y de gas natural (Corredor et al., 2000; Corredor, 2002, Corredor et al., 2003; Retamoro y Rojas, 2004). Además, el grupo ha realizado adaptaciones y diseños particulares de sistemas de alimentación, encendido y control en motores vehiculares y grupos electrógenos para realizar en ellos evaluaciones experimentales energéticas, de emisiones, de recuperación de calor, de cogeneración y exergéticas, con la variedad de combustibles alternativos explorados; han evaluado los efectos de fumigación de n-butanol y alcohol anhidro en los motores Diesel, como también el desempeño de motores con mezclas de combustibles alternativos ACPM-biodiesel, Diesel-gas, gasolina-etanol (López, 2010; Duarte y Corredor, 2011; Ramírez, 2012; Corredor, 2015).

Con respecto a estudios de explotación del motor, han efectuado análisis comparativos de motores convencionales y convertidos a gas en vehículos funcionando a grandes alturas, han adquirido capacidad en estudios exergo-económicos en vehículos de transporte y han hecho estudios de viabilidad técnica y económica para la remanufactura local de motores encendidos por chispa alimentados con combustible gaseoso (Corredor, 2006). En

técnicas de diagnóstico y monitoreo, han diseñado y construido sistemas de adquisición, procesamiento y visualización de las señales en motores; han investigado sobre sistemas electrónicos para administración energética en flotas vehiculares. En propuestas de diseño, han manufacturado rediseños de mezcladores aire-gas para motores de encendido por chispa (Corredor, 2004, 2005; Corredor et al, 2002; Pino, 2005; Centeno 2003; Lafaurie, 2000; De los Ríos, 2001). En el campo teórico, realizan simulaciones mediante CFD del proceso de mezclado aire-gas natural en un motor Diesel turboalimentado (Corredor y Bermejo, 2010) y han logrado desarrollar un software para la predicción de golpeteo en motores de encendido provocado (Knocking Predictor).

Universidad nacional de Colombia (Grupo de Investigación en biocombustibles, energía y protección del medio ambiente y Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética).

La Universidad Nacional de Colombia (Unal), es líder a nivel nacional en la realización de estudios para el sector automotor, pruebas de automotores y MCI. Entre las líneas de investigación se cuentan: simulación y pruebas de MCI, producción de biogás con digestores anaeróbicos, aclimatación de motores, gestión energética con motores Diesel, desarrollo y adecuación de equipos para pruebas de inyección electrónica de gasolina, estudio exploratorio de metales pesados en material particulado de emisiones de exosto de motores Diesel.

El grupo de trabajo del profesor Mantilla ha hecho una extensa revisión en la literatura, de las propiedades físico-químicas de mezclas

gasolina-etanol (número de octano, calor de vaporización, presión de vapor Reid (RVP), temperatura de autoencendido, densidad, poder calorífico inferior (LHV), solubilidad en agua), las emisiones (CO), hidrocarburos totales sin quemar (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), aldehídos (formaldehído y acetaldehído), etanol sin quemar, y los parámetros de operación del motor (consumo de combustible, potencia), en función de la variación del contenido porcentual de etanol (Mantilla, 2011, 2015a, 2015b). En el campo teórico estudia los procesos de combustión de mezclas gasolina-etanol en MCI, conduce estudios teórico-experimentales de la velocidad de llama laminar y longitud de Markstein para diferentes mezclas de H₂/CO/CH₄/CO₂ en diferentes mecanismos de cinética química, para el gas de síntesis (Syngas) producido a partir de gasificación de biomasa (Díaz, 2014), ha modelado la generación de material particulado en función de la composición de azufre en el combustible (Rodríguez, 2007), ha modelado el efecto de la viscosidad en la combustión de la mezcla B20 de biodiesel de palma en motores encendidos por compresión (Ortiz, 2007), ha modelado la presión, temperatura y tasa de reacción en la combustión de motores MCI-EC basado en el método de clausura $k-\epsilon$ para la turbulencia (Mora y Díaz, 2013), ha utilizado el programa computacional KIVA (código internacional de modelado de dinámica computacional CFD) como una herramienta para predicción del comportamiento de la combustión en MCI simulando los chorros de combustible en la cámara en ambiente reactivo (Forigua, 2011).

Sobresalen los trabajos de modelado y simulación realizados con herramientas de alto nivel como es el caso del "Desarrollo software de un módulo de cinética química en fase

gaseosa para simulación 3D de MCI”, resultado del trabajo de Maestría de Carlos Felipe Forigua (Forigua, 2013).

El grupo de investigación del profesor Mantilla accede al código fuente de los programas KIVA-4 y Cantera y en sus objetivos contemplan modificar KIVA-4 para que admita mecanismos cinéticos en fase gaseosa de un número de especies arbitrario. En esta dirección, dentro del grupo de investigación de la Unal, se realizan trabajos de modelado y simulación de modos de combustión homogénea por compresión y premezclada, HCCI y PCCI, en MCI, que son investigaciones de vigencia y actualidad en el contexto internacional. Adicionalmente, en el grupo actualmente se desarrolla un módulo de software de cinética química en fase gaseosa para simulación 3D de MCI utilizando mecanismos cinéticos semidetallados (Olave, 2013).

El grupo ha estudiado la viabilidad ambiental en Colombia del uso de biocombustibles en motores de encendido provocado y por compresión (Montenegro et al, 2015; Mantilla et al, 2008), ha trabajado en la producción de biogás a partir de pollinaza en biodigestores (Henriquez y Niño, 2005); ha estudiado el desempeño de motores a carburador y con inyección alimentados con combustible E10 en la ciudad de Bogotá, así como el funcionamiento de MCI de encendido provocado utilizando biogás (Forero et al, 2012; Forero y Sierra, 2014; Sierra et al, 2015). En otros trabajos, ha valorado el consumo de combustible y el índice de opacidad en motores con sistema de alimentación dual Diesel-gas natural (León, 2007) y los efectos de adicionar etanol y jatrofa en motores Diesel (Mantilla y Acevedo, 2008).

En el plano experimental, en la Unal han abordado proyectos de diseño, construcción y pruebas de partes de motores y sus sistemas: sistema de inyección de combustible controlado electrónicamente (Chávez, 2012), catalizador enzimático para un motor Diesel, optimización y diseño de sistema de entrada de aire en motores de dos tiempos. Se destaca como proyecto de ingeniería, el prediseño y simulación de un sistema de inyección directa para un MCI de dos tiempos, basado en un código desarrollado en Matlab (Mantilla et al, 2007). En manufactura, el grupo ha participado en la construcción de una máquina centrifugadora para fabricar cilindros de fundición gris ASTM 40 (Mantilla 2009).

Es importante el trabajo de Oscar Edwin Piamba sobre pruebas de desempeño y emisiones de mezclas de alcohol anhidro en MCI carburados con presión ambiental simulada (Piamba y Arias, 2007); sobre la identificación y cuantificación de los mecanismos corrosivos del biodiesel de palma y diésel fósil en sustratos de fundición de hierro gris, por su relación de aplicación en motores Diesel, en los cuales la camisa del cilindro, el mono bloque y el pistón son fabricados en general de fundiciones de hierro gris (Castro, 2013; Piamba, 2014; Amaya, 2013). En diagnóstico, son importantes los trabajos de medición de emisiones e indicadores de desempeño de mezclas Diesel-biodiesel y Diesel-triglicérido y los de aplicación de técnicas ópticas para la estimación de contaminantes en gases de escape de MCI (Melo, 2013; Piamba, 2013).

El profesor Helmer Acevedo, aparte de sus trabajos en biomasa como alternativas energéticas industriales y rurales, ha realizado estudios experimentales y de diagnóstico de operación: estudio de diferentes biomasa

como alternativas de biocombustibles para MCI; impacto funcional y de durabilidad de las mezclas E10 en la operación de los motores de encendido provocado en la ciudad de Bogotá (Mantilla y Acevedo, 2008; Acevedo et al, 2012); estudios de desempeño ambiental y mecánico de mezclas hechas de aceite de palma, etanol y Diesel (Mantilla y Acevedo, 2006); combustión de biodiesel de palma en altas altitudes; comparación de emisiones de motores operados con petrodiesel y biodiesel; evaluación funcional en banco de un motor y sus sistemas asociados durante mil horas operando con una mezcla de gasolina alcohol carburante al 10 % (E10); evaluación de dispositivo de alimentación dual en MCI encendidos por compresión, prueba en laboratorio y en ruta comercial; evaluación de sistema de alimentación dual diésel-gas natural en un MCI encendido por compresión de 2200 hp (León, 2007); evaluación del dispositivo para alimentación dual en MCI encendidos por compresión (Mantilla et al, 2008); investigación tecnológica del uso de aceite de jatrofa curcas como combustible alternativo para uso en motores encendidos por compresión en Carbones del Cerrejón.

En el mismo grupo de investigación de la Universidad Nacional, el profesor Jorge Arango ha liderado la línea de investigación de aclimatación de motores, desarrollo y adecuación de equipos para pruebas de inyección electrónica de gasolina en laboratorio. En esta línea se desarrolló un banco de pruebas de inyectores Diesel con control electrónico para las Fuerzas Militares de Colombia; se realizó el diseño y construcción de un medidor de gasto másico de aire. El grupo ha diseñado un banco de medición y control de pruebas de motores; ha actualizado la instrumentación de un freno

Froude de 150 hp, para el registro automatizado de pruebas en MCI.

El grupo del profesor Arango ha trabajado en el desarrollo y adecuación de equipos para pruebas de inyección electrónica y emisiones en motores, particularmente utilizando bio-combustibles. Diseñó un software para una unidad de control electrónico para inyección de gas natural en MCI; ha conducido estudios exploratorios de metales pesados en material particulado de emisiones de escape de motores a Diesel (Mantilla et al, 2009).

En el grupo MDLyGE ha desarrollado un programa para el diseño de radiadores líquido-gas; y ha realizado estudios de evaluación de comportamiento energético de moto-generadores operando con gas licuado de petróleo (GLP) de alto butano (Sierra et al, 2014). Actualmente, desarrollan herramientas para simulación y análisis de ciclos termodinámicos y de equipos que operan con vapor. Además, de acreditar la producción de software para simulación de ciclos termodinámicos en MCI, el profesor Arango desarrolló como prototipo industrial, un medidor de gasto másico de aire basado en termistores.

En la misma Universidad Nacional el profesor Fabio Sierra ha trabajado simulación computacional del proceso de gasificación de biomasa en reactores de lecho fijo, en evaluación del efecto de la temperatura en la producción de biodiesel con aceite de higuera, evaluación de los residuos del cacao y madera para su uso como materia prima de procesos de gasificación, y producción de biodiesel a partir de aceites usados de fritura. Relacionado con motores, ha investigado sobre el comportamiento de las emisiones de motores operando con biodiesel de grasa de pollo y de higuera

en motores de encendido por compresión y con biogás en motores de encendido provocado (Silva, 2014; Pérez, 2014).

Un proyecto muy pertinente que está llevando a cabo actualmente el grupo MDLyGE, es “Validar y realizar la precomercialización de plantas de cogeneración de energía eléctrica y térmica con tecnología de combustión y generador eléctrico conectado a un motor de vapor” (Sierra, 2014). El profesor Sierra participa activamente en la Red PRIDERAS, un sistema de cooperación interinstitucional para la promoción de mercados energéticos, programas de investigación y formulación de estrategias, programas y proyectos que permitan el desarrollo de la industria energética en zonas rurales (Sierra et al, 2015).

LabFabEx es un laboratorio de manufactura moderno diseñado y construido por el profesor Córdoba director del Grupo en Nuevas Tecnologías de Diseño y Manufactura-Automatización de la Unal de Bogotá y que actualmente trabaja en el desarrollo de una mini-fábrica celular robotizada experimental con el paradigma de la nueva industria 4.0 (Córdoba, 2015). Es un laboratorio que podría integrarse en sus aplicaciones con los laboratorios de MCI en las proyecciones de fabricación de partes para motores de combustión.

Además, en el Grupo de Investigación *Electrical Machines & Drives* (EM&D) (Díaz et al, 2016) han incursionado en estudios relacionados con vigilancia tecnológica aplicada a vehículos eléctricos y destacan la importancia de las redes inteligentes y la electrónica de potencia presente en los sistemas de recarga para la masificación de vehículos eléctricos.

Universidad de Los Andes

En la Universidad de los Andes diferentes investigadores a lo largo de estos últimos años han trabajado en metodologías para la evaluación mecánica, energética y ambiental de modificaciones hechas a vehículos automotores; han desarrollado metodologías para determinación de ciclos de conducción (Bermúdez, 2011; Gómez, 2010) y para evaluación de desempeño de motores en alturas (García, 2012). A nivel experimental, han participado en la instalación y modernización de un dinamómetro de chasis para la evaluación del desempeño de automotores y en la optimización de un sistema de medición para el consumo de combustible de automóviles por medio de electroválvulas (Heidermann, 2010). En su momento, el profesor Huertas participó en el desarrollo de equipos de laboratorio y lideró estudios de generación de energía eléctrica a partir de biogás, diseño y construcción de filtros de partículas de las emisiones de los vehículos Diesel (Trujillo, 2001). Las capacidades del laboratorio de Materiales de la UniAndes han sido utilizadas para la caracterización de materiales (Ramírez, 2011).

Universidad Industrial de Santander. Grupo GIEMA

El grupo GIEMA (Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente), en el cual participa el profesor Jorge Chacón, ha abordado el estudio de los MCI en las aplicaciones de generación de energía y para automotores, explorando la utilización de los combustibles alternativos de origen vegetal (Chácon et al, 2007), los alcoholes, el biogás de diferentes fuentes y el etanol, y formando a los estudiantes, en el modelado de los ciclos y el diseño de los motores. Ha desarrollado programas

de computación como herramientas didácticas: Software para la simulación de los ciclos termodinámicos de los MCI de cuatro tiempos SICICLOTER 1.0 (Chacón et al, 2002); diseño de piezas móviles de MCI para la asignatura Máquinas Térmicas Alternativas (DIMOT); Herramienta educativa en la web basada en la simulación de los procesos termo fluido-dinámicos de MCI, SIMTA 1.0.; Software para la simulación del comportamiento de motores Diesel trabajando con mezcla Diesel-gas natural, SIMDUAL 1.0; Desarrollo e implementación de interfaz gráfica de usuario y su integración en el paquete motor de inferencia difuso del prototipo SEXPD.

El grupo GIEMA es reconocido en la adecuación de salas de pruebas con dinamómetro hidráulico de Froude y bancos basados en plantas de generación (motor-generator). Era reconocido el montaje motor Renault-dinamómetro hidráulico en sala aislada y térmicamente controlada e instrumentada para la adquisición y el registro de las medidas del motor, incluyendo la construcción de las características de velocidad, carga, regulación y emisiones. Ha tenido como elemento diferenciador el estudio de metodologías para el diagnóstico de motores basadas en técnicas no intrusivas como el análisis de las fluctuaciones de la velocidad angular del cigüeñal y el análisis de oscilaciones del bloque del motor (Chacón, 2002); Chacón, 2003).

En la de mantenimiento, se han desarrollado proyectos como: el diseño, desarrollo e implementación de un software para determinar el índice de mantenibilidad en motores Diesel; sistema de información para el control de mantenimiento de los sistemas con MCI de la planta física de la UIS; diagnóstico de fallos mediante la utilización de información

incompleta e incierta; diseño y montaje de un sistema para la medición de la relación aire/combustible en el banco de pruebas del LMTA. Actualmente, está construyéndose el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el área de MCI y para él se han realizado todos los estudios de adecuación de las salas de ensayos.

En el campo teórico han trabajado en: modelado y simulación del flujo en el sistema de escape en MCI Diesel 4 tiempos; estudio teórico experimental sobre el incremento en la eficiencia del ciclo de combustión por efecto de la disminución de transferencia de calor neta por ciclo en la combustión de baja temperatura utilizando un modelo cero dimensional. En el campo del diseño y manufactura, se ha realizado el proyecto de reingeniería y construcción del cilindro de un motor de dos tiempos monocilíndrico de pequeña cilindrada; el diseño y construcción de un módulo sensor-transmisor para medir las emisiones en motores Diesel sin carga. El grupo desarrolló un destilador móvil para la extracción de aceites esenciales por los métodos de hidro-destilación y agua-vapor.

Grupos de investigación de la Universidad de Antioquia relacionados con los motores de combustión

En la Universidad de Antioquia, los grupos GASURE, QUIREMA y GIMEL lideran investigaciones en el estudio de los combustibles, el uso eficiente de la energía y el estudio de los MCI, entre otros campos relacionados.

En el país, los grupos GASURE, y GIMEL son grupos líderes en investigaciones en combustibles y en operación, predicción y diagnóstico de MCI. En estos grupos, investigadores como Andrés Amell, John Ramiro Agudelo,

Iván Darío Bedoya, entre los principales, han hecho importantes contribuciones investigativas no solo en la caracterización integral multivariable de todos los combustibles de la canasta energética colombiana y la valoración del desempeño de los motores alternativos encendidos por compresión y por chispa para grupos electrógenos y para automoción, sino que han aportado con el desarrollo de software nacional para la predicción y el diagnóstico de la combustión y de los procesos fluidodinámicos en los sistemas de admisión, escape e inyección y han ahondado en el estudio fenomenológico de los procesos de los motores con profundidad académica aplicada e insertándose de manera ejemplar en la dinámica de la cooperación científica e investigativa internacional.

Desde el año 2000 el grupo GIMEL ha tenido un gran crecimiento, no solo en la producción, sino también en la incorporación significativa de investigadores y en la formación de estudiantes a nivel de maestría y doctorado, convirtiéndose en el grupo más importante en MCI en el país. El grupo ha ampliado su capacidad investigativa en la medida en que se ha comprometido con la ejecución de proyectos demandados por el sector energético y del transporte y ha logrado adecuar salas suficientemente instrumentadas y actualizadas para ensayos de motores. Dispone aparte del ICP, del único motor CFR de compresión variable normalizado en el país y de dos dinamómetros completamente instrumentados.

El profesor Amell, fundador del grupo GASURE, ha seguido de cerca los programas de investigación e innovación en combustión y sistemas energéticos en los sectores del transporte, industrial y residencial. Según él, en Colombia “No se ha desarrollado una

industria nacional fuerte de fabricación de equipos de combustión y calentamiento que incorporen las tendencias tecnológicas en nuevos tipos de combustión. Además, tampoco se ha desarrollado una infraestructura experimental para la certificación y normalización de equipos y procesos” (Amell, 2014).

También, dentro de las líneas sugeridas de investigación en combustión y combustibles para Colombia, el profesor Amell sugiere:

Evaluación y adaptación al piso térmico colombiano de nuevas tecnologías de MCI para aplicar en el sector transporte, generación distribuida y energización rural. El sector transporte es el mayor consumidor de energía térmica en Colombia con el 36,5 % de la demanda y en consecuencia estratégico, para lograr impactos significativos en eficiencia energética, por lo que en cinco años deberán estar funcionando cinco proyectos pilotos con tecnología de MCI de nueva generación adaptadas a las condiciones atmosféricas del piso térmico colombiano, esto es: motores duales con EGR para aplicación en grandes altitudes, motores fuel flex, motores HCCI, motores a gas operando con mezclas 85 % gas natural y 15 % hidrógeno, motores con biodiesel al 100 % y con corrección del efecto de altitud, motores a gas funcionando con gas natural licuado.

Son conocidos a nivel nacional e internacional los trabajos de John Ramiro Agudelo en fundamentos termo-fluido-dinámicos de los MCI, en diagnóstico y predicción de la combustión, en estudios de caracterización de combustibles y su influencia en el desempeño, el consumo y las emisiones de los motores operando con combustibles convencionales y alternativos, y en caracterización del material particulado producido por los motores Diesel, entre otros estudios. El profesor Agudelo diseñó el primer

software para el diagnóstico de la combustión en Colombia y con él se tienen los principales proyectos en cooperación académica en MCI con grupos de investigación internacionales, dentro de los cuales el de la Universidad de Castilla La Mancha Ciudad Real ha sido el principal aliado y co-investigador.

El grupo de investigación GIMEL ha realizado proyectos de combustibles: estudio de las propiedades de mezclas de biodiesel en condiciones normales y a bajas temperaturas (Agudelo et al, 2007); estudio teórico-experimentales de procesos de gasificación de biomasa (Agudelo et al, 2010); evaluación experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel (Agudelo et al, 2003); análisis de calidad de los biogasóleos de aceite de palma e higuera (Agudelo et al, 2011); fraccionamiento por cristalización del biodiesel de aceite de palma como alternativa para mejorar sus propiedades de flujo a baja temperatura (Agudelo et al, 2008); estudio de las variaciones en la composición química del combustible y la morfología del hollín inducidas por el grado de saturación del biodiesel y las mezclas de biodiesel (Agudelo et al, 2012); valoración de propiedades clave y estrategias de mezclado de aceites vegetales hidro-tratados para ser usados como combustibles en motores Diesel; escenarios de mezclado de los biocombustibles de aceite de soya con combustible Diesel convencional (Agudelo et al, 2003); impacto de los aceites vegetales crudos en la reactividad oxidativa y la nanoestructura del material particulado en los Diesel (Agudelo et al, 2014); lubricidad de las mezclas de etanol-biodiesel-Diesel (Agudelo et al, 2010); módulo de compresibilidad de mezclas Diesel-biodiesel (Agudelo et al, 2012); efecto del grado de insaturación de los combustibles

biodiesel en el desempeño de los motores, las características de combustión y las emisiones (Agudelo y Benjumea, 2007); efecto del combustible en la nanoestructura del hollín y las consecuencias sobre la carga y regeneración de los filtros particulados Diesel (Agudelo et al, 2012).

El espectro de investigaciones de desempeño de motores en función de los combustibles es amplio e incluye: estudios de desempeño dinámico, energético y ambiental de vehículos operando con diferentes combustibles en motores de encendido provocado y de encendido por compresión, con consideración de la altura (Agudelo et al, 2006; Agudelo et al, 2006); análisis predictivos y de diagnóstico bajo primera y segunda ley en motores operando con diferentes tipos de biodiesel y sus mezclas (Agudelo et al, 2006), con gas natural (Agudelo et al, 2010), con emulsiones agua/Diesel (Agudelo et al, 2015), en modo bi-combustible gasolina-gas natural (Agudelo et al, 2000), modo bicombustible Diesel-gas natural; impacto de la fumigación de combustibles (n-butanol y etanol hidratado, entre otros) en el desempeño y las emisiones contaminantes de los motores (Agudelo et al, 2015); impacto de la presión en el rail y la alimentación de biodiesel en la morfología del material particulado y en la nanoestructura en motores Diesel turbo cargados de inyección directa (Agudelo et al, 2012; Agudelo et al, 2017).

En la línea de análisis teórico-experimental, el grupo ha realizado trabajos de investigación en: motores de encendido por compresión turboalimentados en régimen transitorio (Agudelo, 1998); modelado de la renovación de la carga (Agudelo et al, 2003); análisis mecánico y termodinámico en motores de encendido provocado adaptados a funcionamiento

bi-combustible gas natural-gasolina (Agudelo et al, 2000); estudios experimentales de combustión de combustibles alternativos renovables en un motor CFR-ASTM (Velásquez, 2006; Agudelo, 2014); desarrollo de un modelo para el dimensionamiento de mezcladores aire-gas natural para motores (Agudelo y Mejía, 2002); efecto de la ecuación de estado en el diagnóstico termodinámico de la combustión Diesel (Agudelo et al, 2006).

En la línea de estudios numéricos, el grupo ha realizado trabajos de investigación en: aplicación de un modelo de acción de ondas al estudio de la renovación de la carga en motores de cuatro tiempos; modelado de flujo compresible unidimensional y homo-entrópico por el método de volúmenes finitos (Agudelo et al, 2008); desarrollo de una ecuación para la estimación de los coeficientes de difusión alcohol-aire requerida para el modelado de las pérdidas evaporativas en sistemas de alimentación de combustible (Agudelo et al, 2014; Agudelo et al, 2016); aplicaciones de la mecánica de fluidos computacional (modelado con OpenFoam) al estudio de: regeneradores térmicos, de chorros Diesel (Agudelo y Gutiérrez, 2008; Agudelo et al, 2009).

En la línea de técnicas experimentales, el grupo ha realizado trabajos de investigación en: optimización de los parámetros de espectroscopia Raman para la caracterización del hollín de diferentes combustibles (Agudelo et al, 2011); instrumentación de un vehículo para realizar pruebas en ruta (Giraldo, 2008); diseño e implementación de una unidad de control electrónica para un motor de encendido provocado (López, 2007; Agudelo et al, 2014); automatización y control de un banco de ensayos de MCI alternativos (López, 2009; Agudelo et al, 2006); desarrollo de herramientas

informáticas para el diagnóstico de la combustión en motores; desarrollo de un sistema de inyección electrónica para el sistema de inyección dual de un motor Diesel; desarrollo de un kit electrónico para fumigación multipunto de bioetanol hidratado y biobutanol en motores Diesel.

En la línea de valoración del aprovechamiento energético de los combustibles y de la recuperación de energía en los MCI, en la UdeA ha habido una preocupación permanente por parte de los grupos GASURE, QUIREMA y GIMEL, lo que los ha convertido en consultores importantes a nivel nacional. Muestra de esto son las investigaciones sobre análisis energéticos (Agudelo et al, 2002) y exergéticos (Agudelo et al, 2009) y de recuperación de energía (Agudelo et al, 2016), realizadas con rigor teórico y experimental.

En la UdeA se ha elaborado software original para el estudio de los MCI: INDICOM, DIAGCOM, TRANSIENT, ARAMÉ, CARIBE, DIATERM, DICOMOTOR on line, DICOMOTOR off line.

Debe anotarse que el volumen de trabajos en MCI realizado por los investigadores del grupo GIMEL supera en mucho lo resumido en este aparte, que quedan por fuera trabajos importantes que se han realizado en combustibles alternativos, en lo teórico y lo experimental (Agudelo et al, 2007; Agudelo et al, 2008; Agudelo et al, 2009; Agudelo et al, 2010; Agudelo et al, 2015), pero que permiten formarse una idea de las líneas y temas de investigación. También se han realizado trabajos en los temas de control y de evaluación estructural de componentes (Agudelo et al, 2011; Agudelo et al, 2004), aunque no es este aún un perfil de investigación definido. Sin embargo,

consideradas las instalaciones de la UdeA y su capacidad de integración con las otras instituciones de la ciudad de Medellín, seguramente alberga el potencial para abordar temas de diseño y manufactura, instrumentación y control de sistemas y partes para MCI, como una iniciativa de apertura hacia la generación de conocimientos y productos constructivos y tecnológicos.

En el grupo GASURE, el profesor Iván Darío Bedoya realizó investigaciones relacionadas con la evaluación de desempeño energético, exergético y ambiental de motores de encendido por compresión alimentados con biodiesel (Saldarriaga y González, 2004; Agudelo et al, 2005; Bedoya et al, 2007), en modo dual Diesel-gas natural (Suárez et al, 2009) y Diesel-GLP (Ruiz, 2009). A un nivel más fundamental, el profesor Bedoya ha venido liderando desde el año 2012 estudios numéricos y experimentales sobre encendido por compresión de cargas homogéneas (HCCI), con el objetivo de utilizar combustibles gaseosos de bajo poder calorífico en plantas generadoras, buscando obtener altas eficiencias y bajas emisiones de NOx (Bedoya, 2012; Bedoya et al, 2012). En sus investigaciones de operación de motores con bajas temperaturas de combustión (LTC), ha tratado de determinar los límites de carga alta y ha ensayado estrategias para ampliar estos límites (Bedoya y Saxena, 2013). Para sus estudios fundamentales y experimentales (Bedoya et al, 2014) ha abordado trabajos de adaptación de mecanismos y sistemas de alimentación de encendido, ha afinado las técnicas de adquisición de datos experimentales en un banco de ensayos (Heredia y Castaño, 2014) y ha innovado en el monitoreo de combustión con sistemas de corriente de ionización (Molina y Restrepo, 2014).

Universidad Pontificia Bolivariana - UPB

En la UPB Seccional Bucaramanga, el profesor Javier Mauricio Castellanos ha coordinado la realización de proyectos de construcción de bancos de pruebas para motores con dinamómetro hidráulico de 65 hp (Ariza y Vanegas, 2012), utilizado en la obtención de curvas de desempeño de un motor (Núñez y Zambrano, 2013). Bajo su dirección se ha desarrollado un modelo para la construcción del diagrama indicado de un MCI (Olarte y Ríos, 2011).

Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)

En la UTP los MCI son objeto de investigación formativa, de diagnóstico y de diseño en los grupos de investigación de Tecnología Mecánica, Diseño y Manufactura y Generética. Este último, ha liderado proyectos nacionales en el estudio del desempeño y la explotación de vehículos alimentados con mezclas de gasolina y etanol hasta E20 (Ríos et al, 2013); proyecta en sus actividades la evaluación del desempeño energético de automóviles en carretera y bajo ciclos de operación en banco de rotillos (Gaviria et al, 2010).

En el campo teórico, el grupo de Diseño y Manufactura de la UTP ha abordado proyectos en: modelado y síntesis de mecanismos de potencia para motores alternativos (Romero, 2007); modelado de las cargas dinámicas de los motores de combustión (Romero, 2003); modelado termodinámico de los MCI alternativos (Romero et al, 2002); modelado de la transferencia de calor en MCI (Romero et al, 2008); balance energético en MCI estacionarios y en vehículos durante el ciclo de conducción (Romero et al, 2014); desarrollo de técnicas de diagnóstico de la combustión basada en el análisis de vibraciones (Quintero

et al, 2016); modelado de la gestión térmica de motores de vehículos.

En el campo de la simulación numérica, el grupo ha trabajado en: herramientas para prediseño de mecanismos y sistemas de los MCI (González, 2014); herramientas numéricas para la predicción de dinámica vehicular (Romero et al, 2005); modelado y simulación de MCI con herramientas computacionales comerciales Amesim, Flowmaster, Ansys, GT-Power (Romero y Quintero, 2001).

El grupo de Tecnología Mecánica ha abordado el desarrollo de escenarios didácticos para la enseñanza de los MCI, todos sus sistemas y sus mecanismos (Vélez y Vanegas, 2014); diseño e implementación de sistemas de alimentación de aire y combustible para motores de laboratorio; diseño y construcción de bancos experimentales para ensayos de MCI alternativos y sus sistemas (Quiceno, 2013). En el campo experimental, el grupo de Tecnología Mecánica ha trabajado en: diseño e implementación de protocolos para pruebas de grupos electrógenos en zonas no interconectadas (Romero et al, 2014); diseño, construcción y montaje de sistemas de pruebas de frenado para motocicletas (Romero, 1997); diseño, construcción y montaje de equipos para diagnóstico de sistemas de frenado, alineación y balanceo de automóviles para centro de diagnóstico; desarrollo de alternativas constructivas y tecnológicas para aislamiento de ruido de grupos electrógenos; conversión de motores alimentados por carburador a inyección electrónica multipunto; análisis de información de motores vehiculares durante ciclos de conducción en ciudad (Romero, 2003; Romero et al, 2002; Trujillo, 2013; Flórez, 2014; Osorio, 2012; Muñoz y Torres, 2012).

En el área de Diseño y Manufactura, en la UTP se ha formulado el diseño y la construcción de partes para vehículos y MCI; se han probado componentes individuales como culatas rediseñadas para motores monocilíndrico; se han diseñado, ensamblado y construido bancos de pruebas para motores dotados con diversos dinamómetros de fricción, hidráulicos y eléctricos. El diseño y la fabricación de componentes se proponen en la UTP como una de las líneas importantes de trabajo.

Aporte de entidades no universitarias

El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) ha realizado investigaciones de caracterización y operación de combustibles en MCI importantes. Son presentados trabajos por Amado et. al (Amado et al, 2008) relacionados con la evaluación del biodiesel de palma en una flota de servicio; Sarmiento (Sarmiento, 2007), relacionado con la utilización de señales acústicas para la caracterización de motores, y Torres (Torres et al, 2002), quien evaluó la influencia en los vehículos con motor de encendido provocado de la adición de 10 % al combustible. La fundación CIPAV ha evaluado el uso de biogás obtenido a partir de estiércol de animales porcinos y bovinos en motores de encendido por compresión convertidos a funcionamiento dual para generación de electricidad.

La manufactura endógena de partes para motores en Colombia es escasa, aunque algunas empresas como Reconstructoras o Reparadoras de Motores lograron realizar transformaciones con tecnología adaptada, incluyendo la utilización de tratamientos térmicos. Pero no puede decirse que en Colombia se posea actualmente capacidad para fabricar partes estructurales para motores (bloques,

culatas, cigüeñales, árboles de levas). Mahle llegó a tener en Medellín una planta para la fabricación de pistones. Hoy estas empresas han desaparecido. La empresa colombiana Industrias Lavco Ltda, con una participación en el mercado nacional del 25 % en la fabricación de repuestos para automóviles, fabrica pistones en hierro gris y aluminio. Además, produce camisas y pistones para bombas Ingersoll Rand®, Worthington®, Gardner Denver®.

El Grupo de Investigación Colinnovación y la empresa GM Colmotores (Ortiz, 2016), han estudiado procesos relativos al ensamble en la industria automotriz y han considerado en ellos variables a evaluar y controlar, que permiten planear proyectos de automatización basados en procesos robotizados de soldadura que implementaron en GM Colmotores donde obtuvieron resultados e impactos positivos en los procesos de ergonomía, manufactura y calidad.

IV. COMENTARIOS SOBRE LA REVISIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADA

Hasta el momento la información sobre la investigación en MCI en Colombia es fragmentaria, a pesar de que son reconocidas las personalidades adquiridas por los grupos y los proyectos de investigación, evidenciable en la producción científica y didáctica en las universidades del país. Desde la creación de los programas de Ingeniería Mecánica, a pesar de las limitaciones dadas por las condiciones académicas, de infraestructura y presupuestales, también por las propias del tipo de economía nacional y la nomenclatura de áreas de investigación muy limitada por cada programa de educación nacional y por Colciencias, las investigaciones en motores

han ido creciendo, inicialmente en formación didáctico-pedagógica, luego en formación en mecánica de motores y vehículos, luego en estudios de operación de motores comerciales con combustibles coyunturales alternativos y biocombustibles y, en los últimos 15 años en estudios teóricos, científicos y numéricos asociados a la formación de magísteres y doctores en el campo de los procesos de combustión en MCI, con participación importante en eventos y publicaciones especializadas y con integración a la comunidad académica internacional.

V. CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

El principal propósito de la exploración de los trabajos en MCI ha sido justificar la pertinencia de la investigación en diseño, modelado y fabricación de partes para MCI alternativos. En este sentido, los resultados de la revisión indican que es actual en Colombia la realización de estudios constructivos y tecnológicos en motores de combustión, en sus mecanismos y sistemas y que conduzcan a la fabricación de motores y partes, dado que la manufactura de partes para motor no ha sido sistemáticamente abordada aun por grupo de investigación alguno en Colombia. Así mismo, constituye un espacio de investigación la exploración de medios constructivos y tecnológicos para variar la relación de compresión en los motores, de manera que se puedan potenciar mejor las bondades de los combustibles alternativos y los biocombustibles en las aplicaciones donde las modificaciones de motor estén autorizadas.

Es recomendable que Colombia incurriera en el modelado multidimensional de los sistemas de los automóviles. Universidades como la de los Andes, que cuentan con equipos

computacionales de buenas capacidades y prestaciones, podrían intensificar sus aplicaciones de modelado numérico estructural y termo-fluidodinámico en partes, mecanismos y sistemas de MCI. Existen oportunidades para la realización conjunta por grupos de investigación entre universidades, de trabajos de investigación e innovación que apunten a la transferencia tecnológica real y a la innovación en tecnología de motores.

Es la opinión de los autores de esta revisión, que en el país (donde indolentemente se promueve la “chatarización” de automóviles a pesar de carecer de la tradición de diseño y fabricación) deben darse pasos hacia la investigación constructiva, tecnológica y productiva de partes para mecanismos y sistemas de MCI, ante todo porque se evidencian buenas capacidades en varios grupos de investigación en manufactura, materiales y mecatrónica.

A continuación, presentamos sólo algunas referencias bibliográficas debido a limitaciones de espacio. A quien pueda interesar, los autores se comprometen a enviarles el trabajo en extenso donde se incluyen todas las referencias.

VI. REFERENCIAS

Acevedo, H., Rodríguez, J. F., Tamara, J. D. (2012). Effect of anhydrous and hydrous ethanol on performance and non-regulated emissions of an HCCE engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*. v.1 fasc.1.

Agudelo, A. F., Agudelo, J. R., Benjumea, P. (2009). Study of diesel sprays using computational fluid dynamics. *Revista Facultad de Ingeniería*. V.49 fasc.N/A p.61 – 69.

Álvarez, A. G., Hernández, J. P., López, A. F., Agudelo, J. R. (2017). Average molecular characterization of the soluble organic fraction of mature diesel particulate matter. *Combustion and Flame*. V.183 fasc.N/A p.299 – 308.

Amado, M., García, J., Carranza, R., Cuéllar, M., Torres, J., Acero, J., Sarmiento, J. A., Sarmiento, J. L., Cabuya, D. Rincón, O. (2008). *Pruebas de larga duración con biodiesel de palma en una flota de servicio público en Bogotá*. Palmas. Vol. 29, N° 4.

Amell, A. (2014). *Elementos para un programa de investigación e innovación en combustión de combustibles fósiles y de origen renovable en Colombia*. Ingeniería y Sociedad No. 8.

Arango, J. E., Sierra, F. E., Silva, V. (2014). *Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás*. Tecnura. V.18 fasc.30 p.152 – 164.

Benavidez, A., Agudelo, J. R., Benjumea, P. (2008). *El fraccionamiento por cristalización del biodiesel de aceite de palma como alternativa para mejorar sus propiedades de flujo a baja temperatura*. *Revista Facultad de Ingeniería*. V.43 fasc. p.7 – 17.

Cadrazco, M. Agudelo, J. R. y otros. (2017). Genotoxicity of Diesel Particulate Matter Emitted by Port-Injection of Hydrous Ethanol and n-Butanol. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of The ASME*. v.139 fasc.n/a p.1 – 5.

Castaño-Mesa, E. S., Quintana, S. H., Bedoya, I. D., Arrieta, A. A. (2016). *Criterios para el procesamiento y evaluación de datos experimentales para un motor de encendido*

- provocado de alta relación de compresión. Ingeniería y Ciencia 12 (23), 107-125.
- Chacón, J. L., Montero, A. I., Rodríguez, E. A. (2002). *Software para la simulación de los ciclos termodinámicos de los motores de combustión interna de cuatro tiempos-SICLOTTER 1.0*, Nombre comercial: SICLOTTER 1.0.
- Córdoba E. (2015). *Acondicionamiento de un laboratorio fábrica experimental (LabFabEx), basado en la tecnología de e-manufacturing, para el desarrollo integrado de producto y proceso (DIPP)*.
- Corredor, L. A., Benjumea, P., Agudelo, J. R. (2003). *Biodiesel de aceite de palma: una alternativa para el desarrollo del país y para la autosuficiencia energética nacional*. Revista Facultad de Ingeniería. V.28 fasc. p.50 - 61.
- Cuadrado, I. G. Agudelo, J. R. y otros (2008). *Modelado de flujo compresible unidimensional y homoentrópico por el método de volúmenes finitos*. Dyna. V.155 fasc. p.199 – 210.
- Díaz, C. A., Gélvez, O., Chacón, J. L., Néstor, A. (2007). *Diseño y construcción de una planta piloto para la producción de biodiesel de manera continua*. UIS Ingenierías. V.7 fasc.1 p.105 – 113.
- Díaz, M. V., Rosero García, J. A. y Prias Caicedo, Ó. (2016). *Vigilancia tecnológica de vehículos eléctricos y tecnologías periféricas en Colombia*. Ingenio Magno, 7(2), 56-68.
- Forero, C. A., Jochum, J., Sierra, F. E. (2012). *Characterization and feasibility of solid biofuels made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards*. Environmental Biotechnology. v.8 fasc.2 p.67 – 76.
- Gaviria, L., Ospina, S., Quirama, L. (2010). *Estudio del comportamiento de vehículos de carburador e inyección con mezclas etanol gasolina E12-E15*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Grajales, J. A., Romero, C. A., Henao, E. J., Lopez, J. F., Torres, D. (2016). *Combustion pressure estimation method of a spark ignited combustion engine based on vibration signal processing*. Journal of Vibroengineering. V.18 fasc.7.
- Guzmán, M. A., Aedila, L. K. Agudelo, J. R. (2015). *Combustion Characteristics, Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Water/Diesel Emulsions*. Chemical Engineering Transactions. V.45.
- Hernández, J.P., Agudelo, J.R., Lapuerta, M., García-Contreras, R. (2016). *Modelling of evaporative losses in n-alcohol/diesel fuel blends*. Applied Thermal Engineering. v.102 fasc.n/a p.302 – 310.
- Jaramillo, J., Zapata, J. Bedoya, I. D. (2017). *Interactive control of combustion stability and operating limits in a biogas-fueled spark ignition engine with high compression ratio*. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 1-14.
- Lapuerta M., Oliva, F., Agudelo, J. R., Boehman, A. (2012). *Effect of fuel on the soot nanostructure and consequences on loading and regeneration of diesel particulate filters*. Combustion and Flame. V.159 fasc.n/a p.844 – 853.
- López, J. D., Espinosa, J. J. Agudelo, J. R. (2011). *Decoupled control for internal*



combustion engines research test beds. Revista Facultad De Ingeniería. v.59.

Mantilla, J. M. (2010). *Análisis comparativo del desempeño y emisiones de un motor diesel de gran capacidad operando bajo dos escenarios: trabajo en ruta activa y trabajo en banco*. Ingeniería e Investigación. V.30 fasc.1 p.118 – 124.

Montenegro, M., Sierra, F. E., Narvaez, F. (2015). Incidence of using chicken fat-based biodiesel on the performance of a 10,5 Kw compression ignition piston engine for power generation. Tecciencia. V.10 fasc.19 p.61 – 72.

Ortiz, M., Sánchez, C. y Fuquen, H. (2016). Automatización de los procesos

de soldadura final para vehículos de pasajeros en GM Colmotores. Ingenio Magno, 7(1), 10-21.

Pérez, J. F. Borge, D. Agudelo, J. R. (2010). *Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales*. Revista Facultad De Ingeniería. N/A fasc.52 p.95 – 107.

Piamba, O. E. (2013). *Proyecto Red Suramericana para el desarrollo, aplicación y formación en técnicas espectroscópicas para monitoreo ambiental*. Universidad Nacional de Colombia.

Quintana, S. H., Castaño-Mesa, E. S. Bedoya, I. D. (2017). Experimental study of polytropic coefficient for an air-cooled high compression ratio-spark ignition engine fueled with natural gas, biogas, and propane-syngas blend. Energy and Fuels.

Riaza, H. F., Salvador, Romero, C. A. (2005). *Respuesta transitoria del tren de potencia de un vehículo*. Scientia et Technica. V.28 fasc.N/A p.95 – 99.

Ríos, L. C., Quirama, L. F., Gaviria, L. G. (2013). *Informe ejecutivo: Determinación del impacto producido por el uso del E20 en el parque automotor colombiano*. Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica,

Romero, C. A., Olmeda, P., Torregrosa, A. J. (2014). Energy balance during the warm-up of a diesel engine. SAE paper 2014-04-010. SAE 2014 World Congress & Exhibition.

Ruiz, F. A., Cadrazco, M., López, A. F., Sánchez, J., Agudelo, J. R. (2015). Impact of dual-fuel combustion with n-butanol or hydrous ethanol on the oxidation reactivity and nanostructure of diesel particulate matter. Fuel. V.161 fasc. p.18 – 25.

Salamanca, M., Agudelo, J. R., Mondragón, F., Santamaría A. (2012). Chemical characteristics of the soot produced in a high-speed direct injection engine operated with diesel/biodiesel blends. Combustion Science and Technology. V.184.

Salamanca, M., Mondragón, F., Agudelo, J. R., Benjumea, P. (2012). Variations in the chemical composition and morphology of soot induced by the unsaturation degree of biodiesel and a biodiesel blend. Combustion and Flame. V. 159.

Sarmiento, L. O. (2007). *Caracterización del sonido de un motor de combustión interna de automóvil mediante la huella espectral del sonido en el plano tiempo frecuencia*. Iteckne. v.4 fasc.1 p.13 – 17,

Sierra, F. E., Castellanos, J. U., Forero, C. A. (2015). Ingeniería Básica y de Detalle para la instrumentación de una planta prototipo degasificación de lecho fijo. Iteckne. V.12.

Torres, J., Molina, D., Pinto, C., Rueda, F. (2002). *Estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhidro. Evaluación de*

propiedades fisicoquímicas. Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 2, no. 3.

Villa, L. C. Mejía, R. Agudelo, J. R. (2006). *Diseño de un banco de pruebas para regeneradores térmicos.* Dyna. V.150.