

Estado del arte enfocado a los componentes térmicos que conforman un banco de pruebas para turbocargadores

State of the art focused on the thermal components that make up a test bench for turbochargers

José Ricardo Bermúdez-Santaella^{1*}, Oscar Javier Suarez –Sierra², Juan José Cabello-Eras³

¹Msc. en Automatización e Instrumentación, jose.bermudez@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-9265-0083>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

²Doctor en ciencias en la especialidad de ingeniería eléctrica (Sección Control Automático), oscar.suarez@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6754-5713>, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

³Doctor en ingeniería mecánica, juancabello@correo.unicordoba.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-0949-0862>, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.

Cómo citar: J. R. Bermúdez-Santaella, O. J. Suarez –Sierra & J. J. Cabello-Eras, “Estado del arte enfocado a los componentes térmicos que conforman un banco de pruebas para turbocargadores”, *Respuestas*, vol. 28, no. 2, pp. 63-88, 2023. <https://doi.org/10.22463/0122820X.3868>

Received on October 4, 2022 - Approved on April 18, 2023.

RESUMEN

Palabras clave:

Turbocargadores, Banco de pruebas, Modelo matemático, Simulación, Cámara de combustión

En este escrito se presenta un enfoque del estado del arte de los procesos térmicos que conforman un banco de pruebas para turbocargadores vehiculares, donde se clasifican según su fuente de energía, como la proveniente de un motor de combustión interna, o de un flujo frío, o de un sistema de calentamiento por resistencias o cámara de combustión por gas. La revisión sistemática de artículos científicos consultados a través del gestor de la base de datos Mendeley, sin restricción de fecha, en los idiomas español e inglés, del cual se incluyó literatura gris mediante búsqueda manual por medio Google Académico, también se revisaron sus resúmenes y en los casos necesarios los artículos completos, teniéndose en cuenta finalmente los artículos que incluyen recomendaciones sobre los modelos matemáticos de proceso referentes a los turbocargadores, cámara de combustión, filtros y plenum. Los documentos escogidos fueron un total de 90, clasificados 20 en el primer grupo como, bancos de pruebas para turbocargadores y el segundo grupo son 57 que corresponde a los componentes que conforman un banco de prueba. Estos documentos están ubicados en el tiempo por años, para el primer grupo desde 2002 hasta el 2019 y el segundo grupo desde el 2005 hasta 2021.

ABSTRACT

Keywords:

Turbochargers, Testing Bench, Mathematical model, Simulation, Combustion chamber.

In this writing we will focus on presenting an approach to the state of the art of the thermal processes that make up a test bench for vehicular turbochargers, these are classified according to their source of energy such as that coming from an internal combustion engine, or from a cold flow or a resistance heating system or gas combustion chamber. The systematic review of scientific articles consulted through the Mendeley database manager, without date restrictions, in the Spanish and English languages, of which gray literature was included by manual search through Google Scholar, their abstracts were also reviewed. and in the necessary cases the complete articles, finally taking into account the articles that included recommendations on the mathematical models of the process referring to the turbochargers, combustion chamber, filters and plenum. The chosen documents were a total of 90, classified 20 in the first group as are the test benches for turbochargers and the second group are 57 that correspond to the components that conform to the test benches. These documents are located in time by years, for the first group from 2002 to 2019 and the second group from 2005 to 2021.

*Corresponding author.

E-mail Address: jose.bermudez@unipamplona.edu.co (José Ricardo Bermúdez-Santaella)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0



Introducción

En el campo de la industria automotriz existe en el presente una máquina térmica fundamental para los motores de combustión interna “MCI” ya sea alimentados por combustibles derivados del petróleo, biocombustibles e hidrogeno. Esta máquina térmica es llamada turbocargador, es la responsable de reducir la temperatura de los gases de combustión que van al medio ambiente, también aumenta la eficiencia del motor de combustión interna, reduciendo considerablemente el consumo del combustible por la buena combustión que se presenta en la cámara del “MCI” [1]. Los turbocargadores son máquinas térmicas que trabajan a régimen extremos y sus componentes tienden a degradarse significativamente en el tiempo, proporcionado desgastes que acarrear fallos y destrucción del mismo. Para conocer los fallos y problemas significativos de estas máquinas térmicas se debe realizar los respectivos mantenimientos continuos a través de banco de pruebas de diagnósticos, donde se pueda predecir el fallo desde su localización, detección y diagnóstico del mismo. En la actualidad existen tres clases de banco de pruebas para el diagnóstico de los turbocargadores, los que depende de un “MCI”, los que utilizan flujo con aire a temperatura ambiente y los que tiene el flujo de aire caliente, estos últimos su energía es generada a partir de una cámara de combustión a gas o a través de un conjunto de resistencia eléctrica. Para diseñar y construir eficientemente estos bancos de pruebas se hace necesario generar un modelo matemático que proporcione las especificaciones de ingeniería, donde se involucre los procesos que conforman un banco de prueba para el diagnóstico de turbocargadores. Ahora, en este trabajo de revisión las referencias bibliográficas involucradas están demarcadas desde la generación de un modelo matemático fenomenológico hasta las que soportan la conformación de un banco de pruebas, orientado al control y al diagnóstico de fallos en los turbocargadores vehiculares. El modelo matemático fenomenológico a desarrollar está estructurado por diversos procesos térmicos, como: el turbocargador, la cámara de combustión, el filtro y el plenum.

Materiales y Métodos

Se realizó una revisión bibliográfica sistemática de documentos donde se aborda los procesos térmicos que intervienen en un banco de pruebas para el diagnóstico de turbocargadores vehiculares. Se llevó a cabo una búsqueda de documentos, libros y memorias de congresos, respecto a temas que involucran los turbocargadores, cámara de combustión, filtros y plenum. En la indagación de literatura gris se circunscribió todo tipo de documentos que la comunidad científica hace referencia como tema principal en el campo automotriz en especial en los “MCI”, donde interviene el turbocargador. En la revisión sistemática organizada y en los estudios de investigación, se aplica como referencia de inclusión los estudios que deben contener un componente matemático en las demostraciones de los procesos térmicos a través de las eficiencias totales y estáticas de los compresores, turbinas, cámara de combustión, plenum y filtros. Y el rechazo o no de la selección de la información encontrada se basó a través del criterio metodologías teóricas sin ninguna aplicación experimental. Un aspecto importante fue la escogencia de las variables que determinan este tema de investigación del cual se basó en limitar a los procesos en esencia de un banco de pruebas de diagnóstico para turbocargadores debido a que estos están conformados por cuatro de diferentes características, como son los basados en “MCI”, flujo frio, calentamiento del aire por resistencias y por cámara de combustión. Las palabras fundamentales que se utilizaron para realizar esta búsqueda de inclusión están demarcadas en el nombre general de tema como, *Banco de pruebas para turbocargadores*, *Turbocargadores radiales*, *Cámara de combustión para turbocargadores*, *Plenum y Filtros para turbocargadores*, *Fallos en los turbocargadores*, *Control para turbocargadores*. Desde la extracción de datos, se realizó una búsqueda inicial de 571 documentos y se seleccionaron 90 con un gran aporte del tema en estudio, equivalente al

15,76 % de los documentos científicos encontrados, aunque se rechazaron 481 o el equivalente al 84,24 %, que no adquirieron el nivel relevante indispensable para el propósito de esta revisión. Para seleccionar la documentación correcta en este tema de investigación, fue necesario revisar los resúmenes y se dio un recorrido cruzado en el contenido general del documento de análisis, con el fin de decidir si este reúne las expectativas del tema de estudio.

Resultados y Discusión

Modelo matemático

El desarrollar modelos matemáticos para abstraer la dinámica del mundo real, a través de la observación de un proceso determinado, es un aporte de interés en la metodología contemporánea. Podemos decir que el uso de la aplicación de los modelos teóricos, la estructura matemática, es transversal con otras disciplinas del saber. Ahora, para resolver los procesos físicos que se presentan en la vida real se tiene como opción uso de los modelos matemáticos a través del conocimiento de la ciencia y del campo tecnológico, como lo describe [2]. La idea demarcada aquí se fundamenta en el modelo mental, conceptual y modelización, como se estructura en [3]. O, desde otra óptica se conduce a un escenario que define la observación activa a través de la percepción de un entorno físico en un fenómeno a explicar. En esa dirección, podemos enmarcarnos en el plano complejo de la investigación respecto a los aspectos epistemológicos aconductados a la validación conceptual [4] y a la aplicación directa de los modelos obtenidos o refrendado como Modelos y Simulación “M&S”, como lo describe [5]. Siguiendo esta metodología, nos detenemos a ver la “M&S”, desde el punto de vista epistemológico, donde se adhiere al concepto de la ontología, que es una acepción tradicional, es el estudio de lo que existe [6]. Ya visto el modelo desde su naturaleza filosófica y constructivista, podemos enmarcarnos en los modelos que se conducta al desarrollo de esta área del saber, de los procesos térmicos y más directos el del campo de las turbomáquinas, donde se aferran a una metodología de modelado de gran relevancia al simular el comportamiento general bancos de pruebas para turbocargadores teniendo como procesos específicos, un turbocargador, una cámara de combustión, un filtro o un plenum. Ahora, estos modelos suelen clasificarse según a la representación espacial de los procesos, como lo describe [7], existen dos tendencias, una desde los modelos flui-dinámicos y la otra los modelos termodinámicos. Estos últimos se clasifican en cero-dimensionales, cuasi-dimensionales o fenomenológicos. Mientras que [8] presenta una distribución de métodos por descripción específica y otros métodos de descripción global. También [9] direcciona esta clasificación a métodos cero-dimensionales, cuasi-dimensionales o fenomenológicos y por último los multidimensionales. El modelo cuasi-dimensionales o fenomenológicos, es el que se basa en este proyecto de investigación.

Banco de pruebas para turbocargadores

Los bancos de pruebas son plantas instrumentadas que emulan condiciones de procesos industriales reales, con el fin de alcanzar un alto grado de similitud con los factores ambientales y de estrés a que estarían expuestos los instrumentos en un proceso industrial de grandes prestaciones.

Banco de pruebas de flujo de aire caliente en base a un motor de combustión interna

En el proyecto de investigación propuesto por [10], se utilizó un banco de pruebas en base a un motor de MCI, con el propósito de realizar una metodología que elabora mapas en los turbocargadores en condiciones

de flujo continuo y pulsante con costo energéticos mínimos y máxima versatilidad, también, en este estudio se obtuvo un código informático que representa el análisis y dinámica del gas de trabajo.

Para la investigación del comportamiento de los métodos experimentales sobre las características de admisión y escape de los motores de automóviles, con el fin de lograr una mejor compresión de su comportamiento tanto para un funcionamiento continuo que transitorio. Por tal razón se desarrolló un banco de pruebas en base a un MCI en especial el del ignición por centella. En esta investigación realizada por [11], tiene como resultados relevantes la metodología en lo referente a los diagramas de presión, en particular se analiza el efecto de la geometría del sistema de alimentación de la turbina y del dispositivo de regulación del turbocargador.

Según, [12], presenta un banco de pruebas en su tesis desarrollado con un MCI, en el cual se encontraron parámetros que hacen que su eficiencia sea alta en los motores de automóviles, disminuyendo sus tamaños. En este estudio se propuso un sistema de dos etapas, con dos turbocargadores de diferentes tamaños y así se redujo el flujo másico que era el limitador, por consiguiente, se redujo el tamaño del motor.

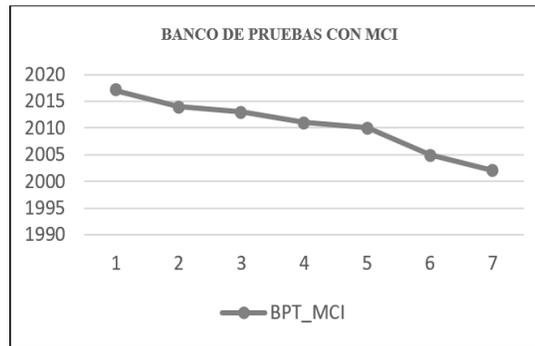
El tópico de la naturaleza del flujo pulsante de gases dentro del colector de escape de un motor de combustión interna, lo estudio [13], dando como resultado la información científica de este comportamiento en estado inestable y que aporta una herramienta de simulación en este tema. Los datos para su validación y comprobación fueron realizados en un banco de pruebas en base a un motor de combustión interna. Otro aspecto relevante es para modelo futuros se recomienda calibrar para la admisión parcial, donde este procedimiento daría lugar a tres coeficientes, uno de admisión total y dos de admisión parcial.

El trabajo de investigación realizado por [14], se centra en el estudio y en el análisis de la eficiencia de los turbocargadores para mejorar el funcionamiento del motor en el equilibrio de los gases contaminantes a la atmosfera, para este fin y al momento de validar, se utilizó un banco de pruebas en base en un motor de combustión interna. Este banco aporta para el desarrollo general de los turbocargadores a través de verificar los diseños de nuevos turbocargadores e innovadores paquetes de simulación.

El trabajo de investigación realizado por [15], se basa en estudiar el campo de las diferentes altitudes, demostrando que en estos escenarios existe una gran probabilidad de riesgo de fallo por la fatiga de las aspas de los ciclos altos de las turbinas. Para su comprobación se utilizó un banco de pruebas en base a un motor Cummins QSK19 y con soporte a otro Cummins QSK50 CI, este banco también es importante para evaluar el rendimiento de la correlación de transferencia de calor de Woschni y Hohenberg comparándolo con las predicciones del modelo del motor en estudio con los datos medidos de presión en el cilindro.

La investigación que estudio el flujo inestable, pulsaciones en los gases de salida en una configuración de dos etapas con turbocargadores y del cual, utilizo un banco de pruebas en base a un motor de combustión interna, fue la propuesta por [16], en este estudio se propone un sistema de turboalimentación secuencial de dos etapas, donde se establece el enfoque de mapeo equivalente con el propósito de mejorar la precisión en la caracterización del rendimiento, teniendo presente los flujos entre etapas y los efectos de calor.

En la Gráfica 1, se presenta la distribución de bancos de pruebas para turbocargadores basado en un MCI.



Gráfica 1. Distribución en el tiempo de las referencias relevantes de un banco de prueba para turbocargadores usando un MCI

Banco de pruebas de flujo de aire en frío

Para analizar en forma experimental los flujos compresibles continuos y transitorios de los gases de admisión y escape de vehículos de pasajeros pequeños, se utilizó un banco de pruebas de flujo frío diseñado y construido por los investigadores [17], en este banco de pruebas se demostró que el modelo empírico es capaz de representar los datos experimentales con una incertidumbre de la misma magnitud que la experimental y respecto a sus eficiencias calculadas con el modelo se observó unas breves variaciones que las encontradas en las experimentales.

El tema de interés abarcado por [18] consiste en estudiar e investigar el comportamiento del efecto de aceleración en la turbina como en el compresor de un automóvil. Los resultados aquí obtenidos se observan en la relación de la velocidad del rotor respecto a los efectos de la presión y la temperatura de entrada del lubricante que fluye en los rodamientos del eje del turbocargador, viendo así la respuesta dinámica de la rotación en el turbocargador. Para estas pruebas se utilizó un banco de pruebas de flujo de trabajo en frío.

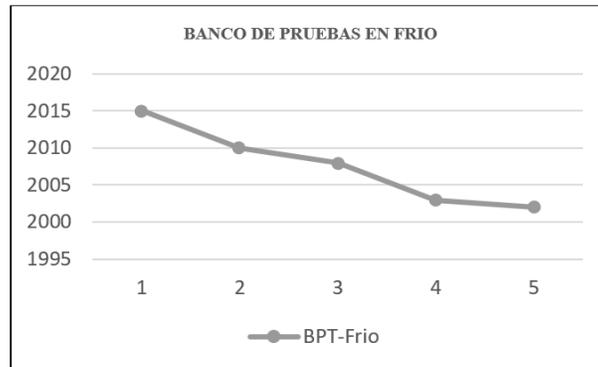
También existe un trabajo de tesis elaborado por [19] soportado por un banco de pruebas de flujo frío, en el cual aporta directamente a la obtención de las características de rendimiento tanto del compresor como la de la turbina. Este trabajo brinda el estudio básico del comportamiento energético y del fluido dinámico del compresor más detalladamente.

El diseño y construcción de un banco de pruebas en frío para medir las características de rendimiento en condiciones de funcionamiento en estado estacionario y las características de compresión de turbocargadores fue realizado por [20]. En este estudio se aporta con la implementación que predice la dinámica general del sistema durante la sobretensión con geometría simplificada, además de la comparación entre el modelo de parámetros agrupados y los resultados experimentales. Lo anterior se realiza en torno al estudio paramétrico de la constante de retardo de tiempo y se conduce a un efecto en las predicciones del comportamiento del sistema con un grado de exactitud, elevado.

En el estudio propuesto por [21], se centra específicamente en el campo de las incertidumbres de la potencia de salida de la turbina, medida en los bancos de pruebas. Se aplicó el método de Monte Carlo. Se utiliza un banco de pruebas en frío y se limita en turbocargadores de tamaño pequeño. En este trabajo se concluye que la mejor forma de mejorar la corriente de la medición de potencia en estos bancos de pruebas para

turbocargadores es tener sensores de caudal másico y la disposición de transmisores de temperatura con grandes exactitudes.

En la Gráfica 2, se presenta la distribución referencial de los bancos de pruebas para turbocargadores basado en flujo frío.



Gráfica 2. Distribución en el tiempo de las referencias relevantes de un banco de prueba para turbocargadores flujo frío.

Banco de pruebas por calentamiento del flujo de aire por medio de resistencias eléctricas

Según [22], evidencio que la transferencia de calor influye drásticamente en el rendimiento del turbocargador en cargas bajas y, por ende, afecta al medio ambiente. Se observó que la caracterización experimental a través de ensayos adiabáticos y asilados, obtener los valores de las potencias mecánicas y los rendimientos isoentrópicos del compresor y de la turbina, así como la correlación de la potencia perdida por el rozamiento en el aceite.

Para mejorar las condiciones ambientales a nivel permitido, se debe tener un turbocargador en condiciones óptimas que conlleven a una mayor relación de presión del compresor, esto para garantizar la combustión completa en la cámara del MCI, y así, tener controlada las condiciones de desplazamiento lo más baja posible y también, aumentado la potencia de salida. Todas estas condiciones de funcionamiento óptimas se lograron en la investigación propuesta por [23].

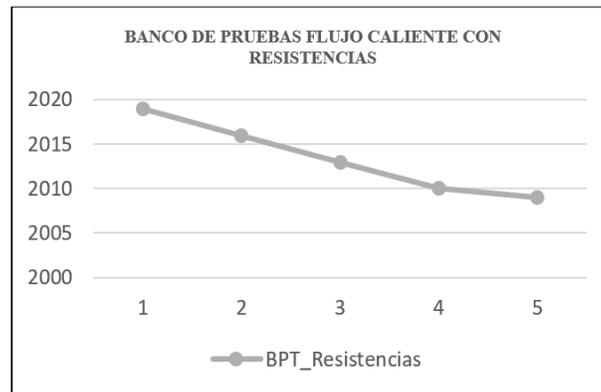
La investigación realizada por [24], tiene como objetivo mostrar una aproximación para cuantificar las pérdidas mecánicas en un sistema con turbocargador. Estas están vinculadas a la dinámica de los cojinetes del turbocargador, tanto axiales como radiales. Cabe mencionar que las pérdidas mecánicas en los turbocargadores pequeños son el producto de una eficiencia mercancía y del trabajo realizado por la turbina, donde esto es posible al tener las condiciones casi adiabáticas, su reacción es lineal con la velocidad del turbocargador, es decir, a altas velocidades es posible considerar un valor constante de esta eficiencia sin afectar los resultados y a bajas velocidades este enfoque falla y ahí es donde la necesidad de un modelo de pérdida mecánica es de gran relevancia.

El estudio que ha realizado [25], tiene como resultados en lo referente al mejoramiento del ahorro de combustible, se basaron en la reducción del tamaño del motor, y utilizando un turbocargador con grades prestaciones en su funcionamiento. También esta investigación se contribuirá con una metodología desde un modelo donde se relaciona la eficiencia mecánica del turbocargador y la eficiencia isoentropica de la

turbina, y seguidamente se realiza la extrapolación de cada uno de estos componentes por separados y luego se calcula su producto.

A través de una investigación rigurosa, desarrollada por [26], se consiguió el rendimiento del compresor del turbocargador, inyectando un sustituto de gas del aire. También se concluye con el análisis de incertidumbre del mapa de rendimiento del turbocargador, el estudio de desarrollo de sobretensiones del compresor y la investigación de las propiedades de variables de los fluidos.

En la Gráfica 3, se presenta la distribución de los bancos de prueba para turbocargadores basado en flujo caliente utilizando resistencias eléctricas.



Gráfica 3. Distribución en el tiempo de las referencias relevantes de un banco de prueba para turbocargadores utilizando resistencias eléctricas

Banco de pruebas de flujo caliente por medio de una cámara de combustión

En este trabajo se diseña y construye un banco de pruebas por sistema por calentamiento de flujo de aire por cámara de combustión, realizado por [27], con el propósito de aportar a la academia. También, se construyó una turbina de gas y su cámara de combustión robusta que satisface las características nominales del turbocargador en estudio. En el sistema de lubricación se obtuvo un buen diseño y los ensayos fueron satisfactorio, se alcanzaron presiones que demandan un turbocargador, con la energía que proporciona el motor-reductor que facilita la rotación de la bomba de aceite.

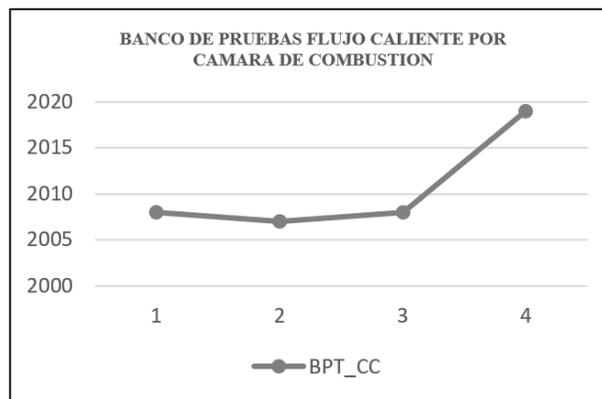
Se generaron las curvas características de los turbocargadores o bien conocidas como los mapas de flujo o de desempeño, se presentó una metodología a través de la investigación propuesta por [28], basada en un modelo empírico fundamentado en una ecuación cuadrática que involucra dos variables, el caudal másico y la velocidad de rotación, obteniéndose una desviación máxima para las relaciones de presión del compresor y la turbina del 8 % y 14 % respectivamente, en común a los datos experimentales.

En esta investigación desarrollada por [29], se proyecta a dar solución a través de una metodología donde se entregue una alta densidad que sea traducida en un rendimiento óptimo y una potencia alta, a través de máquinas sobrealimentadas. Otro resultado que arroja esta investigación es la representación de las pulsaciones de los gases de escape de los motores de combustión interna turboalimentados en este banco de pruebas. Esto da una alternativa para probar los turbocargadores con mayor precisión y reduce las fases de prueba finales, teniendo en cuenta la metodología propuesta para obtener los mapas del turbocargador a

través del comportamiento de las eficiencias de las turbinas con un el flujo pulsante derivado en el banco de pruebas por el mismo flujo estacionario.

La investigación realizada por [30], estudia el comportamiento del flujo pulsante en un turbocargador y aporta a través de un nuevo diseño de un generador de flujo que suministra pulsos calientes a la entrada de la turbina del turbocargador. Dando un resultado imperioso en el desarrollo de un modelo que abarca la dinámica del compresor, y así se logra una mejor optimización a nivel de componentes y de sistema con una alta eficiencia energética del cual mejora su sostenibilidad en la industria.

En la Gráfica 4, se presenta la distribución de bancos de prueba para turbocargadores basado en flujo caliente utilizando cámara de combustión.



Gráfica 4. Distribución en el tiempo de las referencias relevantes de un banco de prueba para turbocargadores utilizando cámara de combustión

Procesos que conforman un banco de pruebas para turbocargadores con cámara de combustión

Turbocargador

Para [31], entrega resultados experimentales respecto a la determinación de características del flujo del compresor de un turbocargador de automóvil, utilizando un rotor de plástico, fabricado por tecnología de impresión 3D. En este trabajo se logra verificar el modelo numérico sobre la base experimental y se confirma el correcto funcionamiento de la maquina en un rango de velocidad especifica entre (50,000 – 90,000 rpm), también las discrepancias menores entre los resultados obtenidos del análisis de flujo y lo experimental provienen del hecho de que la holgura no se ha tenido en cuenta en el análisis numérico. Con la adición del polímero se observó un aumento de la temperatura, indicando que la eficiencia se reduce. Otra observación es que se permite establecer que para mayores velocidades de 90,000 rpm no es adecuado esta adición del polímero.

En los turbocargadores existe una característica de gran interés y muy sensible, el comportamiento dinámico del desgaste por deslizamiento en seco de los cojinetes de válvula de descarga, al no tenerse observando este aspecto, tendrá efecto secundario muy perjudiciales, estos lo describen en sus estudios [32]. Otro aspecto de interés en este trabajo, es el aporte de los resultados que se obtuvieron en la simulación que muestran una excelente correlación con el experimento en el que se presenta el desgaste. Se observa un aumento de volumen en uno del contacto debido a la transferencia del material.

La investigación propuesta por [33], desarrolla una herramienta de simulación, donde plasma el motor y el turbocargador, empleando una metodología con flujo compresible estable. La herramienta de simulación también ofrece al diseñador la alternativa de visualizar el desempeño de los diversos cambios de estados que se presenta en el compresor y turbina del motor de combustión interna. La precisión de los resultados presenta que la simulación de dimensión cero con disposiciones cuasi-estacionaria podría implementarse adecuadamente para fines preliminares de coincidencia de los turbocargadores. Al filtrar una gran cantidad de combinaciones posibles en poco tiempo, el programa permite al diseñador concentrarse en las opciones restantes.

Para un turbocargador es de gran importancia su funcionamiento en el punto óptimo, por tal razón es esencial considerar las propiedades de la transferencia de calor existentes, que son las encargadas de limitar las situaciones específicas del mismo. En este estudio se realizó la investigación por parte de [34], donde se evaluó la distribución de la temperatura de las paredes del turbocargador. Otro aporte se observa que la temperatura más alta proviene de la superficie externa de la turbina, esta es muy sensible a la temperatura del gas de entrada y a las alteraciones del caudal másico a la entrada de la turbina, dando como evidencia que la transferencia de calor por convección forzada es 5 veces mayor que el calor medido por convección.

Otro aspecto de gran importancia en este estudio propuesto por [35], es el tema de la geometría de un turbocargador, que tiene como requisito fundamental la adaptación de los turbocargadores de alta fiabilidad y flexibles en los cambios de sus parámetros en condiciones de funcionamiento y requisitos transitorios, por tal razón se hace el uso de la geometría variable “VGT”, esta brinda la flexibilidad que se requiere para el funcionamiento del turbocargador. Los resultados muestran que es posible obtener un diseño de tobera con una mínima penalización de eficiencia en condiciones de apertura con la capacidad de lograr una reducción del flujo másico entre el 15 % y 19 %

El trabajo realizado por [36], corrige los errores al levantar los mapas de compresor y turbina del turbocargador, en el cual consiste en acondicionar los datos del mapa para su uso en la simulación del rendimiento del motor, se detectaron los datos errados y se reemplazaron por puntos que ajustan la curva de operación. En este trabajo se utilizó el manejo de ecuaciones diferenciales y principios físicos de las turbomáquinas, se aplicó el triángulo de velocidad y la estructura geométrica del compresor.

La transferencia de calor es producida por la diferencia de temperaturas entre los gases de escape y el aire de admisión y también se incluye el aceite refrigerante del turbocargador. Cuando se opera a bajas velocidades los perfiles de calor y sus alteraciones son muy inestable. Por tal razón el estudio propuesto por [37], propone un método para mitigar la distorsión de los datos en ese punto de operación y se calcula la temperatura representativa del compresor, también presenta un metodología para corregir los cálculos de la eficiencia del compresor durante velocidades bajas de rotación, que van desde 52,000 hasta 98,000 rpm, donde se encontraron en las pruebas de gas frío y caliente resultados con un error máximo del 5 % después de la corrección a 52,000 rpm.

Para dar solución a un problema de alta potencia en los motores, se propuso por medio de [38], un método para combinar un sistema de turbocargadores de dos etapas. Este método utiliza desarrollo de cálculos termodinámicos y matemáticos de los flujos que afectan el turbocargador. Ahora en este documento se requiere que se mantenga la relación de presión y la eficiencia operativa del compresor, para tal fin se diseña un control de relación sobre la intensidad del intercooler.

Los turbocargadores permiten aumentar la masa específica del aire en relación del combustible, haciendo que sea más eficiente este proceso y reduciendo los gases contaminantes al medio ambiente al quemarse eficientemente en la cámara de combustión, este análisis se propuso en [39].

La investigación propuesta por [40], permite a los fabricantes la reducción considerable del tamaño del motor. Se centra en la optimización de la energía del turbocargador y así, recuperar un importante porcentaje de energía perdida. Lo sensible es hacer que el turbocargador se acople o se adapte al motor, para este fin se realizó el análisis termodinámico de la transferencia de calor en el turbocargador, teniendo muy presente el desarrollo matemático, gráficas de entalpías y los flujos del turbocargador.

Los rodamientos deslizantes en el turbocargador, es un punto de interés en el que se considera que el aceite presenta comportamientos elásticos introducidos por los aditivos de cadena polimérica larga, del cual afectaría las características del mismo, respecto a las variaciones de temperatura y velocidad de cizallamiento, esto puede ocasionar inconveniente en la operación del mismo según lo citado por [41], cabe señalar que en este estudio se analizó el aumento excesivo del tiempo de relajación de los aceites del motor, en el que se reduce su rendimiento de los rodamientos al incluir sobreimpulso significativos en esfuerzos cortantes y en las pérdidas de potencia, en comparación con la duración de los eventos transitorios, este efectos conducen a la reducción del retraso del turbocargador.

Según [42], hace una investigación donde estudia la coincidencia del turbocargador en función de los requisitos de rendimiento del vehículo. Para cumplir con este fin se cuenta con una plataforma física de simulación para el turbocargador, en 1D y se muestra matemáticamente sus modelos. La técnica de modelos de simulación del ciclo del motor proporciona un gran apoyo para predecir el comportamiento del turbocargador y diagnosticar los puntos de operación del mismo.

En el estudio realizado por [43], se desarrolla un modelo de simulación de motores diésel marítimo. Este trabajo utiliza el modelo de línea media, basados físicamente en los compresores y turbinas. También se modela en el campo de la termodinámica por CFD y se demuestra matemáticamente por sus ecuaciones teóricas y fundamentales de sus principios. Como conclusión, las predicciones de la presión de barrido exhiben una desviación relativa a partir de valores experimentales inferiores al 4 % para todas las cargas examinadas excepto para el 25 % de la carga del motor, donde se observa una sobre estimación del 6,5 % y el 10 % respectivamente, aunque la diferencia en los valores absolutos es pequeña y aceptable.

Otro aspecto de interés en los turbocargadores es la transferencia de calor que está comprometiendo sus efectos en el cambio de la entalpía del gas a través de su turbina y en el intercambio de calor en la etapa del compresor y del eje de rotación, estos comportamientos los describe [44], donde presenta también una metodología concisa para modelar los respectivos flujos del turbocargador por medio de una estrategia de concentración simple, en el cual se realiza un análisis de medición de los principales coeficientes de transferencia de calor por convección.

Dado que los fabricantes no proporcionan los datos más relevantes y significativos del turbocargador, se presenta un problema a la hora de realizar la optimización y ajuste de calibración del motor con el turbocargador, para evitar y contribuir a este evento, se presentó un estudio por [45], que propone un nuevo modelo físico que contiene las características del flujo másico de una turbina radial simplificada con dos boquillas en serie. Se realizaron modelos empírico y semi-empíricos. El modelo propuesto es muy amigable

para los usuarios y suficientemente robusto para extrapolar las características del flujo másico de la turbina radial en condiciones de operación fuera del diseño.

Según [46], estudia el comportamiento de las pérdidas externas de estas máquinas y del cual propone un modelo simplificado que tiene como centro de atención la radiación, como los mecanismos convectivo que se generaran en la fricción del turbocargador. En este trabajo se presenta un modelo de transferencia de calor externa que toma en cuenta los fenómenos de radiación y convección de todas las posibles trayectorias de calor de las superficies externas del turbocargador. El modelo utiliza una geometría simplificada, basada en cilindros, donde se requiere datos geométricos sencillos que son fáciles de obtener.

El principio de funcionamiento del turbocargador se fundamenta en la transformación de energía cinética, proporcionada por los gases calientes que recibe la etapa turbina y transmitida por el eje rotacional a la etapa compresora, generando energía mecánica que es convertida a través de la absorción del aire atmosférico y comprimido para su aplicación, como lo establece en su investigación [47]. Esta investigación obtuvo resultados en relación a la comparación de los motores turboalimentados a vapor respecto a los motores de escape, estableciendo que la mejor opción es el último en mención.

La investigación desarrollada por [48], introduce y utiliza el concepto de medida de presión cuasi-dinámica, con el fin de obtener los mapas espectrales del compresor, que describen la evolución de la presencia de la sobrepresión en la salida del compresor centrífugo. En este trabajo se tiene como tema de interés el fenómeno estable de la compresión centrífuga, donde se da como resultado la utilización del método cuasidinámico, en el cual fue posible reconocer que espectros amortiguados de eventos no estables estaban presentes en condiciones de trabajo permanentes en el tiempo.

Para dar una revisión amplia y detallada de los compresores centrífugos que se utilizan en el campo industrial, en especial en dirección del sector automotriz y en específico, los turbocargadores, se realizó una investigación propuesta por [49], donde plantea y genera modelos empíricos de la eficiencia, tasa de flujos másicos, análisis de energía, simular los desempeños, diagnóstico y control. En este estudio se lleva a cabo una revisión exhaustiva de los modelos empíricos de eficiencia y de flujo másico de los compresores centrífugos, donde se encuentran once modelos de flujo y ocho modelos de eficacia. Estos modelos fueron desarrollados para compresores de motores y turbocargadores de vehículos.

La investigación realizada por [50], contribuye con un modelo de simulación de turbinas de entrada radial en base a la metodología de línea media para estimar las características de las turbinas en estudio. Estos datos se validan con una turbina de geometría variable. Este estudio presenta las bondades y fortalezas de un modelo con la capacidad de estimar el mapa de la turbina, cuando se relaciona con un número limitado de puntos que dan referencia a la eficiencia y al flujo másico.

Para comprender mejor las pérdidas por fricción en los turbocargadores, se realizó una investigación por interés de [51], en la cual se evaluó adecuadamente la eficiencia mecánica de los turbocargadores y así, se pudo conocer en qué elemento se debe enfocar los esfuerzos de mejora. Aquí se describió una descomposición matemática para este fin. Como conclusión se ha demostrado en este estudio que las cargas axiales sobre el cojinete de empuje tienen poca influencia, menos del 30 %, no obstante, la variación representa un 12 % de la presencia de la fricción y se hace más notoria cuando la temperatura es alta y la velocidad es baja. Los

experimentos permitieron cuantificar la influencia de la presión de entrada del aceite con las pérdidas por fricción de los cojinetes lisos.

El turbocargador actual según el texto [52], tiene novedosos atributos en lo que respecta las mejoras de los factores específicos de tiempo de respuesta, una mejor respuesta a los transiente del “MCI”, y un aspecto importante el control de la velocidad de régimen de trabajo en condiciones máximas.

Los turbocargadores son componentes que aportan significativamente a la disminución del calentamiento global y su contaminación atmosférico, por tal razón se hace necesario sus diseños óptimos, para esto se necesita tener sus características predominantes que la dan sus mapas de eficiencias, pero se hace necesarios bancos de pruebas muy costoso y de grandes prestaciones tecnológicas para su confiabilidad. En esta investigación propuesta por [53], se centra en desarrollar un enfoque alternativo que considera un modelo físicamente para predecir la eficiencia, aumento de presión y pérdidas en los turbocargadores con sus geometrías correspondientes.

Para los turbocargadores existe un componente de gran interés como lo es la turbina, por tal razón se debe hacer diseños que cada vez sean más precisos. En esta investigación, propuesta por [54], se encarga de entregar una metodología novedosa, para contribuir con un modelo de regresión en base a la serie de Taylor, donde se expande las funciones para las pequeñas variaciones de sus variables, como los caudales máxicos. Las simulaciones arrojaron una concordancia sincrónica entre las dos turbinas, la turbina ACM simple, el MAPE es de 2,34 % con un 90 % de los casos con errores inferiores al 3,8 %. Para la turbina del turbocompresor, el MAPE es del 1,27 % y el 90 % de los casos tienen errores inferiores al 2,5 %. Por lo tanto, la metodología propuesta y el modelo han demostrado ser altamente confiables.

El trabajo de investigación presentado por [55], documenta un estudio en la caracterización de sistemas de turbocargadores conformado por dos etapas, cuyos fundamentos se basan en un modelo de valor medio de un motor Diésel que valida sus datos de soporte. Este producto determina una estructura de modelos que son representativos en dirección a un motor virtual, donde se puede utilizar eficazmente para ampliaciones relacionadas con el análisis y el control.

Para seleccionar óptimamente las características de eficiencia, reducción de emisiones de escape, mínimo consumo de combustible, tanto en los motores de chispa como los de encendido por compresión, se realizó un trabajo de investigación desarrollado por [56], del cual propone un modelado 1D general que emplea coincidencias entre el motor y el turbocargador. En este estudio se utilizaron modelos a través de ecuaciones matemáticas del flujo inestable, del impeller y difusor y pérdidas de calor. Este trabajo aporta una metodología que supera algunas limitaciones relacionadas con el empleo del mapa de rendimiento constante. También se orienta en dar una directriz para continuar trabajando en este campo de investigación con el propósito de incluir procedimientos dentro de un modelo 1D que se aborda a un motor turboalimentado.

En la investigación realizada por [57], se describe los conceptos del modelado analítico de los componentes de las turbomáquinas desde su modelo de desempeño hasta los modelos de zona única, que se han utilizado en tiempo. Se presenta el desarrollo de una variedad de modelos en el tema de las pérdidas que ocurren en los rotores. Describiendo el modelo desde su diseño, rediseño, mapeo y sus alcances. En este trabajo se recomienda que los ejemplos realizados muestran una variación definida en la capacidad de predicción y una cierta incertidumbre real respecto a las dependencias funcionales dentro de los parámetros de modelado,

esto desde el punto de vista de los modelos basados en la heurística y otros desde la óptica de los modelos físicos orientados a datos.

En la investigación propuesta por [58], se desarrolla un novedoso modelo de interpolación de los mapas de rendimiento, donde se incorpora las leyes físicas. Este estudio mejora la precisión de la simulación, manteniendo su practicidad y robustez. Este método se puede aplicar tanto al compresor como a la turbina. Se concluye que el análisis comparativo de los resultados que arrojaron las pruebas y los cálculos, presentan que el nuevo modelo propuesto del turbocargador brinda resultados precisos y confiables.

Según [59], se estudió y desarrolló un método para simular el ciclo del motor en base al flujo de las dos zonas del compresor y el de la línea media de la turbina. Este método se utiliza en el diseño integrado de los turbocargadores sin mapas de prueba. También se logró analizar la sensibilidad de sus parámetros. Aquí se obtuvo como resultados que los métodos pueden predecir el rendimiento del turbocargador con alta precisión, menos del 5 % de error, tanto para el compresor como para la turbina. El método de simulación del turbocargador mostro una mejora significativa en la precisión predictiva para simular rendimientos del turbocargador especialmente para condiciones de bajo flujo y velocidades bajas de funcionamiento.

La investigación elaborada por [60], trata el desarrollo de un modelo de turbina de geometría fija y variable, su propósito es el de proporcionar unas condiciones de contorno eficiente para diseñar motores de combustión interna y turbocargadores. Este modelo se implementó en uso dinámico unidimensional y se utilizó para observar flujos inestables de las turbinas. El modelo utilizado se aplicó a un turbocargador donde ha sido posible lograr en un amplio rango operativo, en una reproducción altamente precisa de la dinámica de fluidos de la turbina.

Uno de los grandes inconvenientes en el turbocargador es la transferencia de calor desde la turbina al compresor, desmejorando su rendimiento; para dar solución a esta problemática los investigadores [61], propusieron modificar los mapas de eficiencia para obtener uno más práctico, al tener en cuenta la transferencia de calor. En este modelo se utilizaron criterios matemáticos, se realizaron experimentos con los turbocargadores y se observaron sus correlaciones de entradas y salida.

En el estudio propuesto por [62], se trabajó en la turboalimentación asistida por componentes eléctricos, se aplicó a diversos vehículos con tecnologías apropiadas a los motores de gasolina y diésel, se obtuvo un factor económico atractivo al reducir sus emisiones y bajos nivel de consumo, donde se estima que la turboalimentación ofrece una reducción de más del 10 % en las emisiones de gases que contribuyen al calentamiento global, también se afirma que el costo inicial de la turboalimentación puede compensarse con creces con las reducciones de costos en la reducción del tamaño del motor y la racionalización de las diversas clases de motores.

Cámara de combustión

En el trabajo de investigación presentado por [63], se describe un nuevo diseño de una cámara de combustión de dos zonas, la principal y piloto, ubicadas secuencialmente. En este estudio arrojó que para reducir emisiones y mejorar el rendimiento de la combustión, se debe tener en cuenta una buena mezcla de combustible y aire conducida en una corriente de aire a través de un flujo conducido en estructura de vórtice.

Para la investigación desarrollada por [64], se establecen las condiciones generales de funcionamiento y las características de rendimiento de una cámara de combustión anular para una turbina, que utiliza etanol y metano, basados en inyección directa. En el desarrollo del modelo se predicen y analizan las principales características de la cámara de combustión, también se tuvo muy presente la distribución de la temperatura y la eficiencia de combustión en su recorrido longitudinal.

Según [65], proponen un diseño de una cámara de combustión estructurada por medio de un modelo matemático y empírico en su etapa preliminar. Este estudio se basa en el uso del CFD y da como resultado que la caída de presión total en la cámara de combustión es de 0,017 frente a la relación supuesta de 0,07 en la etapa de diseño, también se presenta el diseño mediante el método numérico en una imagen extensa del proceso dentro del flujo de la cámara de combustión, donde se incluye la micromezcla, la distribución de la temperatura y la presión a lo largo de la cámara de combustión.

En el estudio realizado por [66], se desarrolla un diseño de una microturbina. En este trabajo se demostró la aplicación de una metodología para diseñar una turbina a gas de alta capacidad de potencia donde se proyecta su cámara de combustión de una microturbina derivadas de un turbocargador. Aquí se presentan la metodología con especificaciones definidas para su construcción.

La tesis realizada por [67], tuvo como objetivo la evaluación en la composición de turbocargadores vehiculares para la microgeneración energética y también, el desarrollo de un modelo de una cámara de combustión tubular para abastecer a la microturbina de gas derivada del turbocargador. Se utilizó como herramienta el “cycle, time” y “CFD”. En este trabajo se tienen fuente de incertezas identificadas, al medir las presiones dinámicas donde los valores de las lecturas son bajas (80 a 500 Pa) con incerteza de 8,66 Pa, representa una fracción significativa de la lectura.

Las cámaras de combustión describen comportamientos no lineales y por tal razón se hace muy conveniente obtener modelos que represente la dinámica en un proceso en partícula, en este caso se basó en referencia a una caldera de vapor industrial, se utilizó la herramienta de simulación “EcoSimpro”, en el cual sus modelos en el entrenamiento de operarios se ve facilitado al no ser necesario el conocimiento del código con que se han desarrollado, este estudio fue realizado por [68].

El estudio de [69], genera condiciones del aire o gas en niveles energético altos, estos gases calientes son producido por los sistemas denominados cámaras de combustión, que es el corazón de una planta, en especial las calderas convencionales. El diseño desarrollado en este trabajo responde a sus objetivos planteados, constituye en una herramienta de grandes prestaciones para los profesionales de la industria, es aplicable a las calderas de vapor de cualquier complejo o planta química.

Para que una cámara de combustión tenga un rendimiento alto, se debe conocer muy detallado el comportamiento del análisis de su combustión por tal razón se describe la metodología de los estados a través de sus reacciones en base a la relación de aire respecto a su combustible, como lo propone [70]. En este estudio se obtuvo los análisis de las principales reacciones químicas en combustión, composición fraccional, fracciones de mezcla, productos de combustión y la relación general de la combustión, según el aire a mezclar en base a la estequiometría de combustión, ya sea completa e incompleta

En la investigación abordada por [71], se realiza un diseño térmico y constructivo de una cámara de combustión de un combustor experimental para la simulación de procesos reales de combustión. En este estudio se analizan distintas variantes constructivas y se valoran la influencia en su comportamiento, su estabilidad térmica y las pérdidas energéticas. También se concluyó que no es factible construir la variante 1 por las altas temperaturas de pared que se obtiene, la variante 2 y 4 no garantizan una estabilidad térmica en la cámara y produce incremento de agua y de energía, la variante 3 mantiene condiciones térmicas en el horno favorables y es más sencilla constructivamente, pero los gastos energéticos y de montaje son mayores.

Plenum

En el estudio realizado por [72], se amplía las dinámicas para modelar correctamente los flujos de las masas negativas (oleajes en contraposición). Este tema se analiza por trabajos previos sobre el modelado de compresión donde se reemplaza la aproximación empírica en el compresor de gas húmedo, donde se ajusta a la curva los resultados de los datos experimentales de un compresor, obteniéndose buenos resultados y también, se recolecto valores de gran precisión de las pérdidas por fricción e incidencias de las compresiones de los gases húmedos y secos.

Para evitar la sobrepresión en la salida de los gases del compresor, existe un estudio que fue propuesto por [73], donde se presenta la aplicación de métodos no lineales y teorías de Lyapunov, con el fin de prevenir cualquier condición de sobrepresión en compresores centrífugos de velocidad constante, basado en especial con el modelo de Moore-Greitzer. En este documento como resultados se da la simplificación del diseño y configuración de controlador dando consigo una buena eficiencia y rendimiento del compresor.

La reducción de la inestabilidad del aire a la salida del compresor en el turbocargador se debe al diseño de un proceso denominado plenum, que es el objetivo de la investigación por parte de [74], en el que se determina la configuración óptima de la dinámica del fluido de salida por el compresor, en el que se realizaron cálculos para determinar sus parámetros y la efectividad del plenum impelente por métodos de la dinámica de fluidos computacional, CFD. En conclusión, se tiene que este trabajo se incrementa la optimización numérica de las formas geométrica fuera de la cámara de combustión anular. La eficiencia de todo el conjunto donde está el caudal del compresor se estima en 1,28 % sobre el valor de la eficiencia politrópica para los parámetros en general.

En el estudio de los efectos de la salida de los gases en el turbocargador se tiene como referente el trabajo de investigación de [75], en cual se hacen modelos en CFD, para los procesos de la geometría de la válvula de descarga y en especial en la cámara impelente o el comúnmente, llamado el plenum. Cabe señalar, que en este estudio la orientación de la válvula de retención genero una distorsión combinada de la dinámica turbulenta y la presión total del caudal del compresor. También se logró encontrar la relación donde el proceso sea práctico y conveniente para su implementación, para cualquier aplicación de entrada al compresor.

En el estudio de las inestabilidades del flujo de salida de los turbocompresores se evidencia lo delicado de este estado del fluido, tanto es así, que puede destruir completamente la maquina térmica, por tal razón, [76], propone un método que presenta las características experimentales y la señal de presión de salida de operación inestable del compresor. Con esta información, es posible determinar el valor de los parámetros del modelo de Greitzer para el punto de operación seleccionado.

Se presenta una investigación realizada por [77], en el cual se basa en un enfoque que modela la dinámica de los fluidos inestables en un sistema de compresión, mediante el uso de un gráfico de enlace. En este enlace interviene el flujo de energía durante la sobrepresión del compresor. En este estudio se utilizó como referencia el modelo de Greitzer donde representa la respuesta transitoria de la dinámica de fluido en estudio, este modelo grafico se utiliza como modelo básico para construir sistemas de compresión más complejos en este campo de acción.

En los compresores centrífugos en la salida de su flujo comprimido, se presenta inestabilidad, conocida comúnmente como sobrepresión. En este proyecto de investigación por parte de [78], se encontró por primera vez un mapa que describe ampliamente la evolución de la inestabilidad típica de un compresor a altas velocidad de operación de 185000 rpm y a una velocidad del impulsor de 593 m/s.

En la industria de hidrocarburos el transporte de gas está sometido a utilizar principalmente los compresores centrífugos, en ellos se presenta continuamente el efecto de surge o sobrepresiones en la salida de sus gases, por tal razón se presenta una investigación realizada por [79], que da solución a este problema, en este escrito se resalta en esencia, la de establecer una ley de control, en este desarrollo se tiene como referencia el modelo de Moore and Greitzer para el resonador de Helmholtz.

En la investigación desarrollada por [80], se enfoca en obtener un modelo de un sistema en un compresor centrífugo con acústica en las tuberías de escapes. Este modelo se amplió a partir del conocido modelo de Greitzer donde se adiciono la dinámica acústica de la tubería, en las ecuaciones del sistema general de compresión. También se estudiaron dos configuraciones de compresión y sus resultados se compararon con las mediciones de la información experimental a través de los diagramas de bode.

Filtro

La degradación de un filtro en un vehículo cuando está en continua movilidad hace que el turbocargador funcione de mal forma, acarreado efecto en el ambiente, pérdida de torque en el motor y aumento de combustible. A razón de esta problemática [81], desarrollo una propuesta que cuantifica el impacto del filtro de aire obstruido. En este trabajo se obtuvo el impacto del filtro de aire obstruido dentro de los vehículos con motor “SI”, y su resultado fue bajo. Otro aspecto que se logró al comparar la inducción del aire forzado y el filtro de aire fue en el intervalo de 89 % al 91 % de su superficie.

En el siguiente estudio realizado por [82], se presenta los materiales de un filtro de aire y también su diseño a través de la herramienta de 3D. En este escrito se plasma la investigación numérica basada en parámetros estructurados con el propósito de predecir el rendimiento de filtrado de las partículas que están el flujo del compresor. Los resultados obtenidos muestran que las estructuras geométricas del modelo no pudieron copiar completamente el filtro real debido a que se ignoró la curvatura del lazo del hilo. Por tal razón el modelo del filtro 3D requiere de una mayor optimización.

El diseño de un filtro se propone por [83], que describe la obstrucción de los filtros plisados a través de tres fases, como, filtración de profundidad, filtración de superficie y por último reducción del área filtrante. En este escrito se utilizan herramientas estadísticas, que dan como resultado los comportamientos de la velocidad de filtración de la distancia correcta de los pliegues y el diámetro aerodinámico medio de la masa

de las partículas. La ventaja del modelo utilizado se deriva de la metodología de Novick del cual se requiere un mínimo de datos propios del medio filtrante, en la actualidad se validan los modelos con el tipo de medio filtrante.

En el trabajo realizado por [84], se tiene como propósito mostrar la contribución de la restricción proporcionada por la carcasa del filtro y el conducto de aire de admisión a la restricción total que es producida por el sistema de filtración del aire de medio ambiente. Este trabajo concluye que con el IAD se puede quitar fácilmente sin que se note cambio en el funcionamiento del motor, esto reduce la restricción ocasionada por el sistema más caliente y afectará negativamente a la ocupación del aire al cilindro con cargas repetitivas.

Se hace necesario observar el funcionamiento de un filtro para evitar problemas futuros en el motor, por tal razón se realiza una propuesta por [85], que se enfoca en una metodología de diagnóstico y pronóstico de un filtro de aire del cual se basa en modelos de flujo del aire y volumen de control. Como conclusión en este trabajo se propone un enfoque del volumen de control para evaluar el aire en el filtro a través de aplicaciones de motores no potenciados. El método consiste en estimar un único parámetro, este método propuesto estima también la presión de aguas abajo del filtro de aire.

Para conocer más detallado el problema de la obstrucción del filtro de aire se desarrolló una investigación realizada por [86], donde aplica una metodología de ensayos estructurados y organizados, para comparar el efecto de las diferentes etapas de la obstrucción del filtro sobre el rendimiento, en un motor diésel monocilindrico de cuatro tiempos refrigerado por agua. Como conclusión de este trabajo, la investigación se realizó con los efectos de la obstrucción del filtro en su rendimiento y las emisiones del motor de combustión interna para obtener resultados que se mantengan constantes en sus condiciones de operación.

En el siguiente estudio realizado por [87], se construyó un filtro de aire con un tamaño requerido según las condiciones que permitan aumentar su resistencia a las partículas de polvo y demás elementos extraños. En este trabajo se concluye que la prueba de flexión de muestras poliméricas presentó que el material es capaz de soportar la fuerza máxima de aproximadamente de 200 N, cuando el punzón se movió 11 mm en la dirección del eje Z. Este evento de flexión no se agrietó, ni se rompió, pero permaneció deformado cuando se retiró su carga.

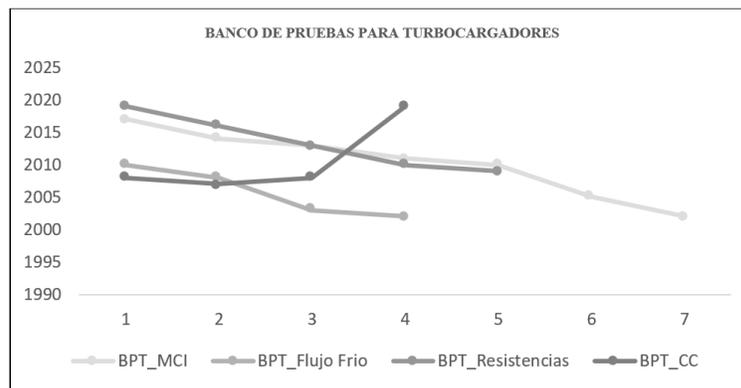
En la investigación efectuada por [88], se especifica en forma detallada el proceso de filtración del cual se optimiza el rendimiento del mismo. También, en este estudio se desarrollan los modelos de filtro de fibra metálica. Como conclusión, el modelo obtenido se aplica para estudiar los efectos del diámetro de la fibra del filtro en dirección del gradiente de porosidad en el proceso de filtración. Debido a que una mejor interpretación de este proceso se hace beneficiosa para la optimización del rendimiento del filtro fibroso.

En la investigación propuesta por [89], se trabajó en un modelo 2D semi numérico, para predecir la caída de presión instantánea y la eficiencia de recolección de filtros formados por pliegues rectangulares y triangulares, tanto de regímenes de filtración en profundidad como en superficie, basado en la herramienta CFD, siendo este un modelo semi empírico. En este trabajo el modelo seminumerico es muy práctico para el diseño y desarrollo de filtros plisados con formas rectangulares y triangulares con partículas de 1, 5 y 10 micromilímetros de diámetros, observando una relación razonable de la formulación y de las simulaciones en CFD a macro escala previamente, en los casos de pliegues triangulares donde la obstrucción prematura del canal no es común.

Según [90], estudia un filtro con técnicas de filtración basadas en el uso del carbón activado. En este artículo se describe el modelo matemático y las simulaciones de sus dinámicas. Hallándose las características de sus capas límites alrededor de los granos del carbón activado, su difusión y su absorción dentro del grano. Otros aspectos que el modelo cuenta es con la interacción de la temperatura, humedad y la absorción de del aire. En este estudio los resultados son alentadores, habiendo incluido en el modelo una mezcla compleja entre 5 contaminantes y teniendo muy presente la humedad.

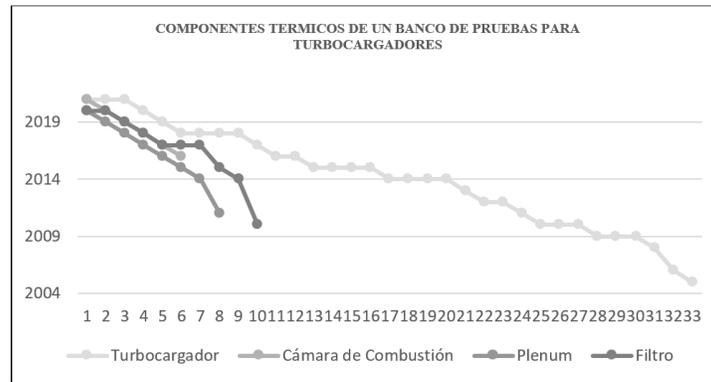
Análisis e interpretación

En la Gráfica 5, se presenta los escritos más relevantes de los bancos de pruebas para turbocargadores desde el año 2002 hasta 2019, donde se denota que el banco más utilizado en el tiempo desde 2002 hasta el 2017 es el de motores de combustión interna MCI. Seguido del banco de pruebas de flujo de aire caliente por uso de resistencias, desde 2010 hasta 2019. En esa dirección aparece el flujo de aire frío desde 2002 hasta el 2015 y como último, se presenta el banco de flujo caliente por medio del uso de la cámara de combustión, esta opción es la que está siendo muy acogida para futuras investigación por ser un proceso que esta soportado por combustibles amigables al medio ambiente como propano o biocombustibles de tercera generación.



Gráfica 5. Resumen referencias bibliográficas

En la Gráfica 6, se hace referencia a los componentes que conforman estructuralmente un banco de pruebas para turbocargadores, como el turbocargador, cámara de combustión, plenum y filtro. Los turbocargadores son componentes fundamentales para los motores de carga y de pasajeros, se encuentra en la línea del tiempo activos desde 2005 hasta el 2021 y su uso se observa con una tendencia progresiva, es decir que estos seguirán siendo componentes necesarios en la industria automotriz por su aporte al medio ambiente y a la adaptación de los nuevos combustibles amigables con el ambiente. La cámara de combustión es otro componente de gran interés de los bancos de pruebas para turbocargadores. Presenta una tendencia vertiginosa desde el año 2016 hasta el 2021, del cual utiliza combustible como el gas propano o natural, amigable con el medio ambiente. El plenum es utilizado para realizar las transformaciones de energía cinética y potencia con el propósito de conocer el flujo del compresor y de permitir las tomas de medidas del flujo, este se ubica en el tiempo desde 2011 hasta 2020 y por último el filtro, es un componente muy necesario e indispensable para proteger el turbocargador, está en el tiempo desde 2010 hasta 2020.



Gráfica 6. Componentes que integran un banco de pruebas para turbocargadores

Conclusiones

Con lo estudiado en razón a las referencias bibliográficas existen más bancos de pruebas para turbocargadores en base de motores, han sido tecnificados para investigación, su costo de funcionamiento y mantenimiento es muy alto. Por tal razón estos bancos están ubicados en entidades que subsidian las compañías o empresas privadas del campo automotor. El otro banco más desarrollado es el de flujo frío, este es un producto tecnológico y muy comercial para pruebas de alineamiento de los turbocargadores y su interés es ofrecer una solución muy básica, pero para el usuario final es de gran relevancia. Mientras que el banco de pruebas de calentamiento por resistencias es acogido para determinar características muy puntuales de otros procesos térmicos, un punto contrario a este es el gasto desmedido de la potencia activa de sus resistencias a la hora de realizar sus pruebas.

Referencias

- [1] L. G. Sánchez, M. de J. Fabela, O. Flores, J. R. Hernández, D. Vázquez, and M. E. Cruz, “Revisión de la Normativa Internacional sobre Límites de Emisiones Contaminantes de Vehículos de Carretera,” *Instituto mexicano del transporte*, no. 562. p. 83, 2019, [Online]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>.
- [2] P. Galbraith and G. Stillman, “A framework for identifying student blockages during transitions in the modelling process,” *ZDM - Int. J. Math. Educ.*, vol. 38, no. 2, pp. 143–162, 2006, doi: 10.1007/BF02655886.
- [3] M. L. R. Palmero;, J. M. Acosta, and M. A. Moreira, “La teoría de los modelos mentales de johnson-laird y sus principios: una aplicación con modelos mentales de célula en estudiantes del curso de orientación universitaria,” *Investig. em Ensino Ciências*, vol. 6, no. 3, pp. 243–268, 2001.
- [4] R. G. Sargent, “Verification and validation of simulation models,” *Simulation Research Group, New York*, p. 10, 1984.
- [5] Kishurim, Tecnice, Cognitek, Tecnimat, Griduc, and Gidsaw, *El modelamiento matemático en la formación del ingeniero*, Primera ed. Bogota: Ediciones Fundación Universidad Central, 2013.

- [6] C. Turnitsa, J. J. Padilla, and A. Tolk, "Ontology for modeling and simulation," *Proc. - Winter Simul. Conf.*, pp. 643–651, 2010, doi: 10.1109/WSC.2010.5679124.
- [7] J. B. Heywood, "Combustion and its Modeling in Spark-Ignition Engines," *International Symposium COMODIA 94*. pp. 1–15, 1994.
- [8] J. Arrègle, J. J. López, J. M. García, and C. Fenollosa, "Development of a zero-dimensional Diesel combustion model. Part 1: Analysis of the quasi-steady diffusion combustion phase," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 11, pp. 1301–1317, 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00079-6.
- [9] F. V. Bracco, "Introducing a new generation of more detailed and informative combustion models," *SAE Tech. Pap.*, 1975, doi: 10.4271/751187.
- [10] J. M. Luján, V. Bermúdez, J. R. Serrano, and C. Cervelló, "Test bench for turbocharger groups characterization," *SAE Technical Papers*, p. 8, 2002.
- [11] M. Capobianco and S. Marelli, "Transient Performance of Automotive Turbochargers: Test Facility and Preliminary Experimental Analysis," in *SAE Technical Papers*, 2005, vol. 2005-Septe, p. 11, doi: 10.4271/2005-24-066.
- [12] O. Leufvén, "Compressor Modeling for Control of Automotive Two Stage Turbochargers," *Linköpings universitet*, 2010.
- [13] A. W. Costall, R. M. McDavid, R. F. Martinez-Botas, and N. C. Baines, "Pulse performance modeling of a twin entry turbocharger turbine under full and unequal admission," *J. Turbomach.*, vol. 133, no. 2, pp. 1–9, 2011, doi: 10.1115/1.4000566.
- [14] A. Blazevic and I. Filipovic, "Turbochargers performance testing with special emphasis on the compressor map," in *11th International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology*, 2013, no. May 2016, pp. 961–968.
- [15] A. T. Thompson, "The effect of altitude on turbocharger performance parameters for heavy duty diesel engines: experiments and gt-power modeling," *Colorado State University*, 2014.
- [16] A. Calo, "Advanced Characterisation of Turbochargers with the focus of Modelling Two-stage Turbocharging Systems Calogero Avola A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Department of Mechanical Engineering," *University of Bath*, 2017.
- [17] F. A. R. Filho, R. M. Valle, J. E. M. Barros, and S. D. M. Hanriot, "Automotive turbocharger maps building using a flux test stand," in *SAE Technical Papers*, 2002, p. 10, doi: 10.4271/2002-01-3542.
- [18] C. Holt, L. S. Andrés, S. Sahay, P. Tang, G. La Rue, and K. Gjika, "Test Response of a Turbocharger Supported on Floating Ring Bearings - Part I: Assessment of Subsynchronous Motions," in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2003, vol. 5 B, pp. 969–974, doi: 10.1115/detc2003/vib-48418.

- [19] M. I. Bin Othman, “Design and Build a Turbocharger Stand and Airflow Circuit Piping for an Automotive Turbocharger Testing Apparatus,” *Universiti Malaysia Pahang*, 2008.
- [20] B. S. G. Gregory David Uhlenhake, “Characterization of turbocharger performance and surge in a new experimental facility,” *The Ohio State University*, 2010.
- [21] P. Olmeda, A. Tiseira, V. Dolz, and L. M. García-Cuevas, “Uncertainties in power computations in a turbocharger test bench,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 59, pp. 363–371, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2014.09.055.
- [22] M. Cormerais, P. Chesse, and J. F. Hetet, “Turbocharger heat transfer modeling under steady and transient conditions,” *Int. J. Thermodyn.*, vol. 12, no. 4, pp. 193–202, 2009, doi: 10.5541/ijot.1034000257.
- [23] H. Mohtar, “Increasing Surge Margin of Turbocharger Centrifugal Compressor Automotive Application,” *Ecole Centrale de Nantes*, 2010.
- [24] J. R. Serrano, P. Olmeda, A. Tiseira, L. M. García-Cuevas, and A. Lefebvre, “Theoretical and experimental study of mechanical losses in automotive turbochargers,” *Energy*, vol. 55, pp. 888–898, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.04.042.
- [25] G. S. Chesse; D. Chalet, “Experimental Study of Automotive Turbocharger Turbine Performance Maps Extrapolation,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2016-April, no. April, 2016, doi: 10.4271/2016-01-1034.
- [26] D. Tomasz, “Turbocharger performance and surge definition on a steady flow turbocharger test stand,” *University of BATH*, 2019.
- [27] A. O. Mo. German, “Reconstrucción y diseño de una turboturbina,” *Universidad de los Andes (Bogota)*, 2007.
- [28] G. G. Venson and J. E. M. Barros, “Turbocharger performance maps building using a hot gas test stand,” in *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2008, pp. 777–785, doi: 10.1115/GT2008-50994.
- [29] D. Naundorf and H. Bolz, “Turbocharger test stand with a hot gas generator for high-performance supercharging systems,” *MTZ worldwide*, vol. 69, no. 10, pp. 22–24, 2008, doi: 10.1007/bf03226916.
- [30] R. Vijayakumar et al., “Design and testing a bespoke cylinder head pulsating flow generator for a turbocharger gas stand,” *Energy*, vol. 189, no. xxxx, p. 116291, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116291.
- [31] A. Andrearczyk, “Flow characteristics of an automotive compressor with an additively manufactured rotor disc,” *Arch. Thermodyn.*, vol. 42, no. 1, pp. 3–13, 2021, doi: 10.24425/ather.2021.136944.
- [32] A. A. Schmidt, J. Plánka, T. Schmidt, O. Grabherr, and D. Bartel, “Validation of a dry sliding wear simulation method for wastegate bearings in automotive turbochargers,” *Tribol. Int.*, vol. 155, p. 106711, 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106711.

- [33] S. Mousavi, A. Nejat, S. S. Alaviyoun, and M. Nejat, “An Integrated Turbocharger Matching Program for Internal Combustion Engines,” *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 14, no. 4, pp. 1209–1222, 2021, doi: 10.47176/JAFM.14.04.32037.
- [34] S. S. Alaviyoun and M. Ziabasharhagh, “Experimental thermal survey of automotive turbocharger,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 21, no. 5, pp. 766–780, 2020, doi: 10.1177/1468087418778987.
- [35] R. R. Erdmenger et al., “Development of a new low-cost tandem variable geometry turbocharging concept for turbocharger applications,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 141, no. 3, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1115/1.4041279.
- [36] R. McMullen and Y. Pino, “Conditioning Turbocharger Compressor Map Data for Use in Engine Performance Simulation,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 11, no. 4, pp. 491–507, 2018, doi: 10.4271/03-11-04-0033.
- [37] J. E. Chung, J. W. Chung, N. H. Kim, S. W. Lee, and G. Y. Kim, “An investigation on the efficiency correction method of the turbocharger at low speed,” *Energies*, vol. 11, no. 2, pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/en11020269.
- [38] B. Wu, Z. Han, X. Yu, S. Zhang, X. Nie, and W. Su, “A method for matching two-stage turbocharger system and its influence on engine performance,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 141, no. 5, p. 18, 2018, doi: 10.1115/1.4039461.
- [39] John Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals, Second edi.* New York, 2018.
- [40] A. Romagnoli et al., “A review of heat transfer in turbochargers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. April, pp. 1442–1460, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.119.
- [41] B. Remy, B. Bou-Saïd, and T. Lamquin, “Fluid inertia and energy dissipation in turbocharger thrust bearings,” *Tribol. Int.*, vol. 95, pp. 139–146, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.014.
- [42] Q. Wang, J. Ni, X. Shi, and Y. Liu, “Gasoline Engine Turbocharger Matching Based on Vehicle Performance Requirements,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-April, no. April, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1283.
- [43] N. F. Sakellaridis, S. I. Raptotasio, A. K. Antonopoulos, G. C. Mavropoulos, and D. T. Hountalas, “Development and validation of a new turbocharger simulation methodology for marine two stroke diesel engine modelling and diagnostic applications,” *Energy*, vol. 91, no. January, pp. 952–966, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.08.049.
- [44] J. R. Serrano, P. Olmeda, F. J. Arnau, M. A. Reyes-Belmonte, and H. Tartoussi, “A study on the internal convection in small turbochargers. Proposal of heat transfer convective coefficients,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 587–599, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.053.

- [45] S. Zhu, K. Deng, and S. Liu, “Modeling and extrapolating mass flow characteristics of a radial turbocharger turbine,” *Energy*, vol. 87, pp. 628–637, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.032.
- [46] F. Payri, P. Olmeda, F. J. Arnau, A. Dombrovsky, and L. Smith, “External heat losses in small turbochargers: Model and experiments,” *Energy*, vol. 71, pp. 534–546, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.04.096.
- [47] J. Fu et al., “A comparative study on various turbocharging approaches based on IC engine exhaust gas energy recovery,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 248–257, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.07.023.
- [48] G. Liśkiewicz, L. Horodko, M. Stickland, and W. Kryłłowicz, “Identification of phenomena preceding blower surge by means of pressure spectral maps,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 54, pp. 267–278, 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2014.01.002.
- [49] X. Fang, W. Chen, Z. Zhou, and Y. Xu, “Empirical models for efficiency and mass flow rate of centrifugal compressors,” *Int. J. Refrig.*, vol. 41, pp. 190–199, 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.03.005.
- [50] N. Sakellaridis and D. Hountalas, “Meanline modeling of radial turbine performance for turbocharger simulation and diagnostic applications,” *SAE Technical Papers*, p. 13, 2013.
- [51] M. Deligant, P. Podevin, and G. Descombes, “Experimental identification of turbocharger mechanical friction losses,” *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 388–394, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2011.12.049.
- [52] H. Nguyen-Schäfer, *Rotordynamics of Automotive Turbochargers*. 2012.
- [53] M. Nakhjiri, P. Pelz, B. Matyschok, L. Däubler, and A. Horn, “Physical modeling of automotive turbocharger compressor: Analytical approach and validation,” *SAE Technical Papers*, p. 14, 2011.
- [54] X. Fang and Q. Dai, “Modeling of turbine mass flow rate performances using the Taylor expansion,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 13, pp. 1824–1831, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.04.016.
- [55] M. Canova, F. Chiara, G. Rizzoni, and Y. Y. Wang, “Model-based characterization and analysis of diesel engines with two-stage turbochargers,” *SAE Tech. Pap.*, no. April, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1220.
- [56] F. Bozza and V. De Bellis, “Steady and unsteady modeling of turbocharger compressors for automotive engines,” *SAE Tech. Pap.*, 2010, doi: 10.4271/2010-01-1536.
- [57] D. Japikse, “Turbomachinery performance modeling,” *SAE Technical Papers*, p. 26, 2009.
- [58] Guillaume Martin and Vincent Talon, “Implementing Turbomachinery Physics into Data Map-Based Turbocharger Models,” *SAE Int.*, vol. 2, no. 1, pp. 211–229, 2009.
- [59] W. Zhuge, Y. Zhang, X. Zheng, M. Yang, and Y. He, “Development of an advanced turbocharger simulation method for cycle simulation of turbocharged internal combustion engines,” *Proc. Inst. Mech.*

- Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 223, no. 5, pp. 661–672, 2009, doi: 10.1243/09544070JAUTO975.
- [60] J. R. Serrano, F. J. Arnau, V. Dolz, A. Tiseira, and C. Cervelló, “A model of turbocharger radial turbines appropriate to be used in zero- and one-dimensional gas dynamics codes for internal combustion engines modelling,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 12, pp. 3729–3745, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.06.031.
- [61] M. Cormerais, J. F. Hetet, P. Chesse, and A. Maiboom, “Heat Transfer Analysis in a Turbocharger Compressor: Modeling and Experiments,” *Copyright* © 2006 SAE International, p. 12, 2006.
- [62] S. Arnold, C. Balis, D. Jeckel, S. Larcher, P. Uhl, and S. M. Shahed, “Advances in turbocharging technology and its impact on meeting proposed California GHG emission regulations,” *SAE Technical Papers*, no. 724, p. 16, 2005.
- [63] W. Yousef, V. Sychenkov, N. Davydov, V. Varsegov, and R. Khaliulin, “Experimental investigation of a two-zone dry low emission gas turbine combustor,” *Procedia Environ. Sci. Eng. Manag.*, vol. 8, no. 1, pp. 275–281, 2021.
- [64] W. O. Irrazabal Bohorquez, J. P. Dutra, C. Martinez-Bazan, F. Cruz Peragón, and C. Gutiérrez-Montes, “The Effects of Burning Alcohol Fuels in Fuel Flexible Annular Gas Turbine Combustors on the Overall Operating Conditions,” in *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 2020, p. 10, doi: 10.26678/abcm.encit2020.cit20-0485.
- [65] M. Nalla Mohamed and R. Sivaprasad, “CFD simulation for the design of combustor in turbocharger test rig,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2161, no. October, 2019, doi: 10.1063/1.5127597.
- [66] T. M. Onose Araujo Cunha and R. E. Pereira Silva, “Dimensioning of a Combustion Chamber for Microturbine Based on Automotive Turbocharger,” in *17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 2018, no. November, p. 10, doi: 10.26678/abcm.encit2018.cit18-0670.
- [67] D. V. Pinto, “Análise comparativa do desempenho de turbocompressores veiculares com câmara de combustão tubular na microgeração de energia,” *Universidade de Caxias do Sul*, 2017.
- [68] S. P. Díaz, “Obtención de un Modelo Dinámico para Simulación de una Caldera de Vapor Industrial,” *Planta, Valladolid (España)*, p. 8, 2016.
- [69] J. Peñalba Galán, “Modelado y Simulación de una Caldera Convencional.” p. 99, 2004.
- [70] E. Brizuela and S. D. Romano, “Análisis de la combustión completa e incompleta,” in *Capítulo libro*, vol. 2, 2003, pp. 24–48.
- [71] H. P. G. J. A. Cabrera Rodriguez, J. A. Barroso Estebanez, “Consideraciones sobre una cámara de combustión experimental de 400 kW,” *Ing. Mecánica*, vol. 3, no. 2, pp. 37-41–41, 2000.
- [72] T. T. K. C. Holden, “Modeling and Control of a Wet-Gas Centrifugal Compressor,” *IEEE Transactions*

On Control Systems Technology, p. 16, 2020.

- [73] M. Shafieian, M. Zavar, and M. Rahmanian, “Simulation and control of surge phenomenon in centrifugal compressors,” *Trait. du Signal*, vol. 36, no. 3, pp. 259–264, 2019, doi: 10.18280/ts.360309.
- [74] A. M. Danilishin, Y. V. Kozhukhov, S. V. Kartashov, A. A. Lebedev, K. G. Malev, and Y. R. Mironov, “Design optimization opportunity of the end stage output plenum chamber of the centrifugal compressor for gas pumping unit,” *AIP Conference Proceedings*, p. 9, 2018.
- [75] Y. Sheoran, B. Bouldin, R. Hoover, and M. Matwey, “A centrifugal compressor operability correlation with combined total pressure and swirl distortion,” in *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2017, vol. 1, pp. 1–11, doi: 10.1115/GT2017-63721.
- [76] F. Grapow and G. Liśkiewicz, “Compressor modeling using Greitzer model validated by pressure oscillations,” *Trans. Inst. Fluid-Flow Mach.*, vol. 133, pp. 69--89, 2016.
- [77] N. Uddin and J. T. Gravdahl, “Bond graph modeling of centrifugal compression systems,” *Simulation*, vol. 91, no. 11, pp. 998–1013, 2015, doi: 10.1177/0037549715612124.
- [78] X. Zheng and A. Liu, “Phenomenon and mechanism of two-regime-surge in a centrifugal compressor,” *J. Turbomach.*, vol. 137, no. 8, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1115/1.4029547.
- [79] A. Hafaifa, B. Rachid, and G. Mouloud, “Modelling of surge phenomena in a centrifugal compressor: Experimental analysis for control,” *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 632–641, 2014, doi: 10.1080/21642583.2014.956269.
- [80] S. Y. Yoon, Z. Lin, C. Goyne, and P. E. Allaire, “An enhanced Greitzer compressor model including pipeline dynamics and surge,” in *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 2011, vol. 133, no. 5, pp. 4731–4736, doi: 10.1115/1.4003937.
- [81] F. Synák, A. Kalašová, and J. Synák, “Air filter and selected vehicle characteristics,” *Sustain.*, vol. 12, no. 22, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/su12229326.
- [82] Y. Sheng, Q. Ren, L. Zhang, and Y. Wang, “Modeling and simulation of DEHS aerosol filtration by a three-dimensional knitted spacer air filter,” *Build. Environ.*, vol. 186, no. October, p. 107365, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107365.
- [83] J. C. Laborde, L. D. E. L. Fabbro, V. M. Mocho, and L. Ricciardi, “Contribution To the Modelling of Industrial Pleated,” *Comunicacion*. p. 9, 2019.
- [84] M. Toma, C. Stan, and I. Fileru, “The restriction produced by the air filtration system versus the restriction produced by the air filter,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 178, p. 6, doi: 10.1051/mateconf/201817809002.

- [85] F. Landolsi, H. Jammoussi, and I. Makki, “Air filter diagnostics & prognostics in naturally aspired engines,” in *2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2017*, 2017, pp. 61–65, doi: 10.1109/ICPHM.2017.7998306.
- [86] S. R. Vishal, K. O. Prataprao, N. A. Pravin, and A. Rammohan, “Investigation of effect of air filter clogging on performance and emissions from engine,” *2017 International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems, ICMDCS 2017*, pp. 1–6, 2017.
- [87] L. M. Janutienė, Kandrotaitė and A. H. Habil, “Analysis and modelling of automotive air filter as a substitute for powercore item,” in *International Scientific Journal*, 2017, vol. V, no. 6, pp. 223–226.
- [88] Y. Wang et al., “Modeling Study of Metal Fiber Diesel Particulate Filter Performance,” *SAE Technical Papers*, no. April, p. 8, 2015.
- [89] A. M. Saleh and H. Vahedi Tafreshi, “A simple semi-numerical model for designing pleated air filters under dust loading,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 137, pp. 94–108, 2014, doi: 10.1016/j.seppur.2014.09.029.
- [90] M. Ward, “Modeling Filter Bypass: Impact on Filter Efficiency,” *ASHRAE Transactions*, p. 11, 2010.