

# Informe 01 **Lab** de Máquinas: emisiones, tecnología e innovación

Felipe Trujillo Preuss

Escuela de Ingeniería Mecánica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

felipe.trujillo.p@mail.pucv.cl

4 de septiembre de 2020

## 1. Introducción

En este informe se ejecuta una investigación exhaustiva sobre el efecto medioambiental de los motores de combustión interna (MCI) y motores de turbina a reacción (MTR) a través de la exposición de datos a nivel global de las emisiones producidas, el planteamiento de los componentes de la combustión estequiométrica y real, un análisis sobre los instrumentos de medición para los productos en los gases de combustión, un estudio de la normativa nacional vigente respecto a emisiones de vehículos motorizados y la consideración de parámetros operacionales del motor que influyen en la magnitud de estas emisiones.

Adicionalmente, se sopesan las distintas opciones de mejora para decrementar las emisiones contaminantes, separando en dos grupos: acoplamiento de dispositivos que no modifican los parámetros operacionales y la adopción de nuevas configuraciones con biocombustibles que si modifican los parámetros operacionales. Esto con el objetivo de evidenciar que existe margen de aplicación para los MCI y MTR en el futuro.

Por último, se plantea el desarrollo de un dispositivo innovador del área térmica, que involucre la utilización de una fuente de ERNC a pequeña escala. Esto se efectúa mediante la exposición de su alcance y oportunidad, la explicación de su funcionamiento y composición, el estudio del estado del arte de las distintas configuraciones ya existentes y la descripción de la propuesta de diseño.

## 2. Revisión de la literatura

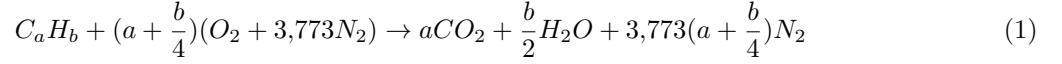
### 2.1. MCI y MTR

Actualmente, el 99.9 % del transporte global es potenciado con MCI y MTR, de hecho, el 95 % de esa potencia proviene de combustibles derivados del petróleo [1]. Este tipo de fuente de energía se utiliza debido a su alta densidad energética y fácil almacenamiento. La problemática radica en los gases de escape: el transporte de personas y bienes, basado en combustibles fósiles, contribuye un 25 % a las emisiones globales de  $CO_2$  [2].

La mayoría de los motores de servicio liviano funcionan con motores de encendido por chispa (MECH) y usan gasolina. La combustión es iniciada por una chispa eléctrica y la energía del combustible se libera cuando una llama se propaga a través de la mezcla aire-combustible que se comprime. En cambio, en los motores de encendido por compresión (MEC), el combustible se inyecta a alta presión y temperatura cerca del punto muerto superior y el calor es generado por autoignición cuando se mezcla con oxígeno.

Los motores de turbina a gas existen en tres tipos principales: turbojet, turbohélice y turbofan. El turbojet emplea un funcionamiento continuo con propulsión a chorro y consta de fases convencionales: admisión, compresión, combustión y escape [10]. En cuanto al turbohélice, utiliza los gases de escape para accionar el movimiento de una hélice en la parte frontal del motor. Por su parte, el turbofan posee un sistema de flujo axial, en el cual los gases generados por la turbina accionan un ventilador situado en la zona de admisión, produciendo el empuje.

En la combustión estequiométrica, si existe el suficiente aire disponible, el hidrocarburo a combustionar se oxida completamente.



Ahora bien, no todo el combustible que entra al motor es quemado en el interior del cilindro, por lo que se deben contabilizar componentes residuales, correspondientes a las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) e hidrocarburos restantes (HC). La fórmula generalizada de la composición de un combustible corresponde a:

$$C_nH_mO_r + \frac{n_{O_2}}{\phi}(O_2 + 3,773N_2) = n_p(\tilde{x}_{C_aH_b} \cdot C_aH_b + \tilde{x}_{CO} \cdot CO + \tilde{x}_{CO_2} \cdot CO_2 + \tilde{x}_{O_2} \cdot O_2 + \tilde{x}_{N_2} \cdot N_2 + \tilde{x}_{NO} \cdot NO + \tilde{x}_{NO_2} \cdot NO_2 + \tilde{x}_{H_2O} \cdot H_2O + \tilde{x}_{H_2} \cdot H_2) \quad (2)$$

$\phi$  es la relación aire combustible,  $n$  es el número de moles y  $\tilde{x}$  es la fracción molar.

Para combustibles convencionales basados en petróleo, la componente  $O_r$  se anula, a diferencia de los combustibles basados en alcohol.

Los MECH expulsan gases que contienen  $NO_x$  hasta en 1000 ppm, CO hasta en un 1 % e HC hasta en 2000 ppm [3]. Un dispositivo utilizado para medir el contenido de  $CO_2$  y CO corresponde al sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) [4], capaz de comparar los infrarrojos absorbidos en una celda de ensayo con respecto a una celda de referencia. La magnitud de  $NO_x$  se mide con un analizador quimioluminiscente, el cual hace reaccionar el componente con ozono. Esto produce una excitación eléctrica de las moléculas de  $NO_x$  que emite radiación medida con un fotomultiplicador y se efectúa una relación de proporcionalidad con la muestra. Con respecto a la medición de los niveles de HC, es posible utilizar un detector de ionización de flama (FID), en el cual la mezcla se quema con una pequeña llama de aire-hidrógeno, produciendo iones en una cantidad proporcional al número de átomos combustionados.

Un parámetro importante a considerar es la cantidad de oxígeno en los gases de escape, ya que deja en evidencia la calidad de la combustión de la mezcla, por consiguiente, el nivel de generación de gases contaminantes. Para medirlo se utiliza una sonda Lambda ubicada en el tubo de escape, posee como base una celda electrolítica a través de la cual, a temperaturas elevadas, la corriente es transportada por iones de oxígeno. La medida de oxígeno se transforma en un valor de tensión y se comunica a una unidad de control (ECU). Su nombre se debe al valor de referencia utilizado:  $\lambda > 1$  indicando una mezcla pobre, vale decir, con exceso de aire o falta de combustible, en el caso contrario,  $\lambda < 1$  indicando una mezcla rica, con excedente de combustible o falta de aire.

En Chile, la cantidad de emisiones para un motor MECH utilizado en un vehículo, se rige según el decreto supremo 211 de Octubre de 1991 [5]. En su artículo N°8 especifica que las mediciones de gases deben efectuarse en ralentí (entre 350 y 1100 RPM) y en un modo de alta velocidad (entre 2200 y 2800 RPM). Para obtener el certificado de aprobación, las mediciones deberán cumplir en ambos regímenes: un máximo de 0,5 % de CO, el conjunto  $CO_2 + CO$  debe ser menor a 6 % y la presencia de HC tiene un máximo de 100 ppm.

Los motores modernos, poseen un convertidor catalítico en el sistema de escape que reducen estas emisiones existentes en los gases de escape hasta en un 90 %, logrando cumplir con la normativa. No obstante, para que sea efectivo, la temperatura del catalizador utilizado debe llegar a 250°C, por ello se prioriza un encendido rápido de este dispositivo. Una vez alcanzada la temperatura, la tarea del motor es manipular la relación de aire-combustible apropiada para lograr bajas emisiones y alta eficiencia. Una mezcla más pobre en combustible reduce los niveles de CO y HC, junto con la inclusión de la recirculación de gases de salida (RGS) se puede decrementar el nivel de NO, pero estas estrategias deterioran la calidad de la combustión inevitablemente.

Con respecto a los MEC, no producen emisiones significativas de CO, sus niveles de  $NO_x$  son comparables a los MECH e incluso mayores y la cantidad de HC que expulsa es considerable. La formación de contaminantes en estos motores es dependiente de la distribución de combustible y cómo esa distribución cambia en el tiempo mientras se mezcla con el aire caliente. Dado que los motores MEC funcionan con una estequiometría significativamente pobre y el proceso de combustión del Diesel es esencialmente completo, su composición de gases es sencilla. Por ello, las emisiones se miden mediante un opacímetro, capaz de calcular la reflectancia relativa de las partículas recogidas en un papel de filtro. No miden la masa directamente, se utilizan para determinar las emisiones de humo visibles. Para la cuantificación de partículas en las emisiones se utilizan variedad de instrumentos como un contador de partículas de condensación (CPC), un escáner de movilidad

en tamaño de partículas (SMPS), un impactador eléctrico de baja presión (ELPI) o un espectrómetro de movilidad diferencial (DMS) [4].

La normativa que rige la emisión de contaminantes para el MEC corresponde al decreto supremo N°4 de Enero de 1994 [6]. Se considera sólo el humo visible (partículas en suspensión) medido a través de la opacidad, opacidad en flujo parcial o el índice de ennegrecimiento. Este último es un método reflectométrico capaz de medir el ennegrecimiento de un filtro de papel a través del cual se aspiran 330cc de gases de escape mediante una bomba colectora.

En cuanto a las turbinas de reacción utilizadas en aviación, que emplean combustibles derivados del queroseno y nafta, emiten gases de efecto invernadero (GEI) similares a los mencionados:  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ , óxidos de azufre ( $SO_x$ ) e hidrocarburos no quemados (UHC) [7]. Las emisiones del tráfico aéreo dependen principalmente de cinco variables: tipo de aeronave, tipo de motor, modo de operación, tipo de combustible y volumen de tráfico (número de vuelos y distancia recorrida) [8]. Como consecuencia, se efectúan estimaciones con modelos econométricos que relacionan las emisiones con el consumo energético del transporte de pasajeros y carga.

Ahora bien, no existen políticas públicas que regulen estas emisiones en la aviación, ya que sólo se dispone de planes correctivos realizando mediciones de la calidad del aire y estableciendo emergencias ambientales. La dirección general de aeronáutica civil (DGAC) publica regularmente una resolución de calidad ambiental (RCA) que traza los lineamientos para la regulación libre de emisiones aeroportuarias.

Es complejo implementar sistemas que reduzcan las emisiones sin que desmedren la eficiencia del motor o turbina. Por ello, es necesario identificar los parámetros que afectan la cantidad de contaminante. Una vez realizado ese ejercicio, se deben plantear potenciales soluciones referidas a modificaciones en el equipo, acoplamiento de nuevos dispositivos que manipulen los parámetros estudiados o la adaptación de un combustible ecológico.

## 2.2. Innovación en energía térmica

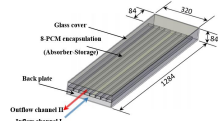
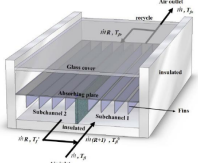
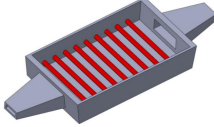
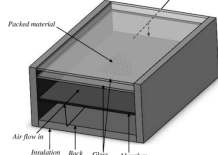
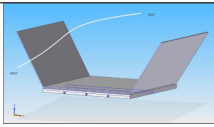
En nuestro país, las viviendas son responsables del 15 % del consumo energético. El 53 % de este consumo residencial se destina a calefacción, mediante la quema de combustibles fósiles o el uso de electricidad convencional [12]. Esta última es una fuente de alto costo debido a su aumento de precio en un 30 % durante los meses de invierno debido al denominado "Límite de invierno". Respecto a los combustibles fósiles, dan como resultado un aumento significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero al medioambiente, de hecho, su utilización en la aplicación mencionada constituye el 5 % de las emisiones de  $CO_2$  a nivel nacional.

En el lineamiento global sobre el uso de energías limpias, una fuente factible a utilizar en calefacción residencial es la energía solar. Contrariamente a la creencia popular, el sol en invierno posee altos niveles de radiación incidente y los días fríos son generalmente soleados, por lo que constituye una alternativa sustentable y sostenible a implementar. La principal desventaja que posee la implementación de esta fuente de energía renovable es la intermitencia o generación discontinua. No obstante, la tecnología disponible permite almacenar parte de esta energía para ser utilizada en horas vespertinas.

Adicionalmente, en el marco de la tendencia mundial hacia una economía circular, se propone efectuar la reutilización y/o reciclado de material de desecho metálico para la construcción de partes en un sistema capaz de extraer energía solar y utilizarla en calefacción residencial.

El calentador de aire solar (SAH) es un dispositivo que funciona mediante la circulación de aire activa con un ventilador (convección forzada). El aire frío ingresa al dispositivo, se calienta en el trayecto y es eyectado hacia el espacio a calefaccionar. Posee tres componentes básicos: la placa de absorción, el vidrio y la cubierta. La placa de absorción se fabrica a partir de metales de alta conductividad como el aluminio o cobre y se cubre con pintura negra para aumentar su efectividad, es la encargada de transferir calor al aire. El vidrio templado transparente tiene por función permitir el paso de radiación solar. Por último, la cubierta provee estabilidad estructural y protección a los elementos, que junto a capas de aislante térmico permite mantener la energía térmica.

Se han desarrollado diversas configuraciones con sus características particulares a través del tiempo, las más importantes se condensan en la tabla N°1.

Tabla N°1: Configuraciones de calentadores de aire solar			
Configuración	Mejora	Imagen	Referencia
Con almacenamiento térmico	+ densidad energética		[13]
Con aletas	+ eficiencia y mejor convección		[14]
Una o dos pasadas de aire	+ eficiencia térmica		[15]
Vidrio simple o doble	+ eficiencia térmica		[16]
Con reflectores	+ temperatura operacional		[17]

La configuración más destacable corresponde a la inclusión de un material de almacenamiento térmico por calor latente (PCM), el cual es capaz de retener energía térmica al pasar de estado sólido a líquido. Mediante un ciclo de carga y descarga de energía, puede calentar el aire en horas vespertinas sin necesidad de radiación. El material más aceptado por sus propiedades y costo es la cera orgánica (Paraffin Wax), utilizado en la fabricación de velas [13].

Una configuración poco estudiada y no incluida en la tabla N°1 corresponde a un SAH de tres pasadas de aire, hasta el momento sólo se ha aplicado en la deshidratación de productos alimenticios como hojas de menta [18] y papas [19]. Se ha comprobado que logra una eficiencia mejor que la configuración de una pasada o dos en un análisis basado en energía y exergía [20].

### 3. Desarrollo

#### 3.1. MCI y MTR

A partir de la información recopilada en [3], se procede a elaborar una tabla que condensa los parámetros que afectan la magnitud de emisión de contaminantes en los MCI y MTR.

Tabla N°2: Parámetros operacionales reguladores de emisiones para MTR y MCI		
MECH	MEC	MTR
Relación aire-combustible Tiempo de chispa Fracción de gas quemado	Difusión de la flama Tiempo de inyección Distribución de combustible	Calidad de la combustión Cantidad de aire en la mezcla Volumen en la cámara de combustión

Con respecto al tratamiento de gases de combustión en MCIs, se utilizan y se siguen desarrollando dispositivos acoplados a los sistemas existentes: convertidores catalíticos, trampas de  $NO_x$  y filtros de particulado. Si bien aportan a la reducción de emisiones, no solucionan el problema de raíz que apunta a influir directamente en los parámetros expuestos en la tabla N°2.

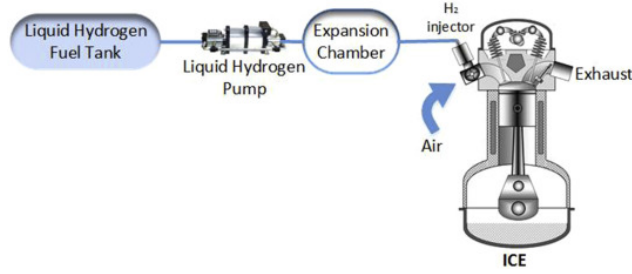


Figura 1: Representación del sistema de almacenamiento e inyección de hidrógeno líquido en un MCI [21]

El enfoque en la reducción de consumo de combustible y el impacto de GEI en los MCI con la transformación de los sistemas existentes, involucran directamente la hibridación y decremento en el peso total del vehículo. Ahora bien, la utilización de biocombustibles es una opción que modifica positivamente los parámetros expuestos en la tabla N°2, proporcionan una alternativa de almacenamiento alternativa y facilitarían una transición hacia la electromovilidad total en el largo plazo.

Concretamente, el uso de Hidrógeno como combustible ha demostrado un funcionamiento del motor a alta velocidad y emisiones de NOx aproximadamente 10 veces menos que la de un motor a gasolina. Esto involucra necesariamente la modificación del sistema del motor: un nuevo tipo de inyector y el acoplamiento de una bomba especializada, como se aprecia en la figura N°1. Debido a que el hidrógeno tiene algunas desventajas, como una energía de ignición muy baja y una densidad de energía volumétrica deficiente, se mezcla con otros combustibles, especialmente con gas natural [10].

Otro ejemplo concreto es el uso de glicerina utilizada en generadores biodiesel para cargar las baterías de los vehículos que compiten en la Formula E [11]. Sistema desarrollado por la empresa Aquafuel, que permite a los productores de biodiesel generar su propia energía eléctrica y utilizar calor residual para generar vapor de proceso. Por cada 34 [kg] de biodiesel fabricados, se producen 4 [kg] de glicerina, que debido a su alto contenido en oxígeno ofrece una combustión limpia.

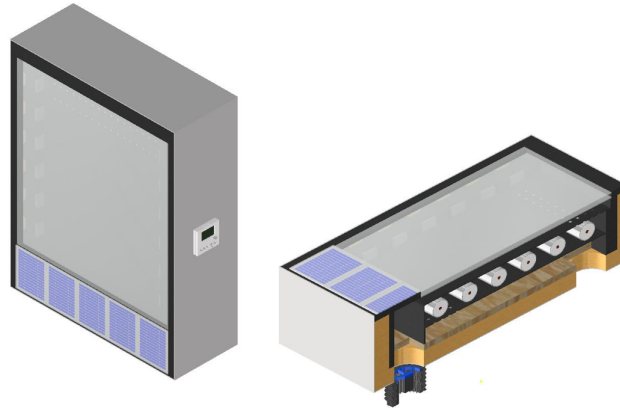
De manera análoga, emplear combustibles alternativos en aviación proporcionan una oportunidad a corto plazo para mejorar la sostenibilidad, pero en cambio, no requiere cambios en el equipamiento actual [7]. A partir del 2014, distintas vías de producción de combustible alternativo iniciaron su disponibilidad: hidroprocesamiento de ésteres y ácidos provenientes de algas y vegetales para fabricación de queroseno parafínico sintético, procesamiento de azúcares para producir etanol o butanol, fermentación de levadura para producir hidrocarburo fareseno, entre otros.

### 3.2. Desarrollo de dispositivo basado en ERNC a pequeña escala

La propuesta consiste en un dispositivo calentador de aire solar con almacenamiento térmico autónomo (CASATA). Su funcionamiento se basa en la aspiración de aire a baja temperatura, mediante un ventilador alimentado por paneles fotovoltaicos, mientras que un panel térmico absorbe la energía solar en forma de calor, transfiriéndola al aire circundante. Como resultado se obtiene aire caliente entre 45-55°C para uso residencial efectivo en espacios de 20 a 30 metros cuadrados y con una potencia térmica máxima de 2750[W].

La configuración adoptada, expuesta en la figura N°2, corresponde a tres pasadas de aire, doble vidrio, múltiples aletas en la placa de absorción y almacenamiento térmico con material de cambio de fase. Las tres primeras características apuntan a la mejora en la eficiencia térmica y la convección forzada, destacando que el uso de tres pasadas de aire constituye un factor innovador en el diseño propuesto. Los pasos se efectúan a través de agujeros en las placas de absorción. Con respecto a las aletas, se determinó su posicionamiento a 48° con respecto a la horizontal de la placa de absorción, para mitigar el efecto de caída de presión causada por las turbulencias en el campo de flujo del aire.

Por otro lado, el sistema de almacenamiento térmico se efectúa mediante tubos de aluminio rellenos con cera orgánica, un material de cambio de fase, que permite despachar energía térmica durante al menos 1 hora sin la necesidad de irradiación solar directa. Esto se logra mediante un ciclo de carga y descarga de energía: la absorción de calor derrite la cera en su punto de fusión y posteriormente se le entrega la energía al aire



Fuente: elaboración propia

Figura 2: Isométrico y vista en corte del dispositivo CASATA modelado en 3D

circundante cuando es requerido. El material de almacenamiento es capaz de contener una gran densidad de energía, pero posee una baja conductividad térmica que dificulta la remoción de calor en el centro de los tubos, por ello vienen acoplados con cilindros de cobre en su interior.

La estructura completa se encuentra forrada con aislante térmico (Mineral Wool) sellado con planchas de aluminio, dándole un aspecto modular.

## 4. Conclusiones

Algunos países tienen la ambición de eliminar el MCI y eso implica un proceso extenso: incrementar la capacidad de generación eléctrica y almacenamiento, transformar el sistema de distribución eléctrica y desarrollar sistemas de carga inteligentes junto con variada infraestructura. Es particularmente difícil transportar carga por vía aérea y terrestre con motores eléctricos, debido a la baterías de gran tamaño y peso que se necesitarán. Mientras esta transformación se lleva a cabo, aún hay margen para mejorar los MCI y MTR existentes: su adaptación y modificación hacia el uso de combustibles ecológicos.

En este informe se ha demostrado satisfactoriamente la viabilidad de este lineamiento. Ahora bien, aún quedan otras alternativas por estudiar, que decremantan el consumo de combustible y son aplicables en el corto plazo: colectores de escape integrados, turbocompresores de geometría variable, desactivación de cilindros y un ratio de compresión variable. Las posibilidades de mejora son múltiples y su integración permitirá al MCI seguir con su notable existencia.

Con respecto a la innovación planteada en el área térmica correspondiente a un calentador de aire solar, el dispositivo propuesto cumple con el uso de una fuente de ERNC y su utilización a pequeña escala para la calefacción de espacios. Incluso, su principal desventaja consistente en la generación de potencia discontinua es mitigada con el acoplamiento de un sistema de almacenamiento térmico. No obstante, esta amortiguación no es considerable, ya que sólo permite una prolongación de su funcionamiento en aproximadamente 1 hora. Adicionando otros parámetros como la localización e instalación, es necesario efectuar un análisis detallado de las limitaciones para acotar su aplicabilidad, con el objetivo de aumentar su factibilidad.

## 5. Bibliografía

- [1] Kalghatgi, Gautam. (2019). Development of Fuel/Engine Systems—The Way Forward to Sustainable Transport. Engineering. 5. 10.1016/j.eng.2019.01.009.
- [2] International Energy Agency (IEA), CO2 emissions from fuel combustion – Overview, 2020. Available from: <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview-2020-edition>
- [3] Heywood, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 2018. Chapter 11, "Pollutant Formation and Control"
- [4] Bosch, R.: Automotive Handbook, 6th edition, Robert Bosch GmbH and SAE, 2004.
- [5] Decreto Supremo N°211. "Normas sobre emisiones de vehículos motorizados livianos" Ministerio de transportes y telecomunicaciones, Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 18 de Octubre de 1991.
- [6] Decreto Supremo N°4. "Normas de emisión de contaminantes aplicables a vehículos motorizados y procedimientos para su control" Ministerio de transportes y telecomunicaciones, Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 07 de Enero de 1994.
- [7] Nelson, E. S., Reddy, D. R. (2017). «Green Aviation: Reduction of Environmental Impact Through Aircraft Technology and Alternative Fuels (Sustainable Energy Developments)» (1st ed.). CRC Press.
- [8] European Environment Agency. «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook» (2019). Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxembourg: Web.
- [9] Universidad Politécnica de Madrid, «ETSI Aeronáuticos UPM (2011). [En línea].  
Link: <https://www.aero.upm.es/departamentos/economia/investiga/informe2011/motores/4.6.Motores.htm>
- [10] Antonio Paolo Carlucci. (2019). «Alternative Fuels for Internal Combustion Engines». Chapter: The Future of Internal Combustion Engines. University of Salento, Italia: Intechopen.
- [11] Martins, Jorge Brito, Francisco. (2020). Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. Energies. 13. 4086. 10.3390/en13164086.
- [12] Cristián Yáñez, Adelqui Fissore SCh, Arturo Leiva G. (2019). Usos de energía de los Hogares Chile 2018. Ministerio de Energía: In -Data, CChC.
- [13] Salih, Salah Najim, Saleh Jalil, Jalal. (2019). Numerical Modeling for Novel Solar Air Heater Utilizing Wax Paraffin-PCM. vol.19. 1-8.
- [14] Yeh, Ho-Ming Ho, Chii-Dong. (2013). Collector Efficiency in Downward-Type Internal-Recycle Solar Air Heaters with Attached Fins. Energies. 6. 5130-5144. 10.3390/en6105130.
- [15] Saxena, Abhishek Verma, Prashant Srivastava, Ghanshyam Yadav, Nandkishore. (2019). Design and thermal performance evaluation of an air heater with low cost thermal energy storage. Applied Thermal Engineering.
- [16] Singh, Satyender Dhiman, Prashant. (2014). Using an Analytical Approach to Investigate Thermal Performance of Double-Flow Packed-Bed Solar Air Heaters with External Recycle. Journal of Energy Engineering. 141. 04014031. 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000211.
- [17] SunilRaj, B.A. Eswaramoorthy, M.. (2019). Experimental study on hybrid natural circulation type solar air heater with paraffin wax based thermal storage. Materials Today: Proceedings. 23. 10.1016/j.matpr.2019.06.381.
- [18] Kesavan, S. Arjunan, T.V.. (2018). Experimental study on triple pass solar air heater with thermal energy storage for drying mint leaves. International Journal of Energy Technology and Policy. 14. 34. 10.1504/IJETP.2018.088276.
- [19] Kesavan, S. T V, Arjunan Selvaraj, Vijayan. (2018). Thermodynamic analysis of a triple-pass solar dryer for drying potato slices. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 10.1007/s10973-018-7747-0.
- [20] Velmurugan, Kalaivanan, Kalaivanan. (2015). Energy and Exergy Analysis of Multi-Pass Flat Plate Solar Air Heater—An Analytical Approach. International Journal of Green Energy. 12. 10.1080/15435075.2014.888662.
- [21] Gurz, Mehmet Baltacıoğlu, Ertuğrul Hameş, Yakup Kaya, Kemal. (2017). The meeting of hydrogen and automotive: A review. International Journal of Hydrogen Energy. 42. 23334-23346. 10.1016/j.ijhydene.2017.02.124.